

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

**SPATIALISATION DES FACTEURS DE L'ÉROSION EN NAPPE POUR UNE
GESTION DURABLE DES SOLS EN AFRIQUE DE L'OUEST À L'AIDE DES SIG ET
DU MODÈLE RUSLE2**

**MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN
SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**PAR
NORMAND VILLEMURE**

AVRIL 2006

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

AVANT-PROPOS

Mon Baccalauréat en géologie de l'environnement m'a ouvert des horizons en environnement me mettant sur des pistes de recherches. Ensuite, j'ai réalisé un stage professionnel : jeune stagiaire international (J.S.I.) grâce au soutien financier de l'agence canadienne de développement international (A.C.D.I.). Ce stage, exécuté par le carrefour de solidarité internationale de Sherbrooke (C.S.I) en partenariat avec l'association Kilabo et les fédérations paysannes du cercle de Dioïla, au Mali, s'est déroulé du 5 janvier au 3 juin 2003. Intitulé «Gestion des ressources naturelles au sein des fédérations paysannes», il avait pour objectif principal de mettre au point un outil de sensibilisation et de formation sur la lutte contre l'érosion afin de soutenir les fédérations paysannes dans l'application de leurs politiques de protection de l'environnement. Un Guide de sensibilisation et de formation sur des cas de dégradation de l'environnement observés dans le cercle de Dioïla et un autre nommé Guide de formation sur le Karité ont été réalisés. Le travail préliminaire à l'élaboration de ces deux guides a été effectué selon la méthode participative avec l'implication directe des commissions environnementales des fédérations, des stagiaires et de l'encadrement Kilabo. Cette expérience m'a permis de créer de bons contacts avec l'ONG Kilabo et d'acquérir de nombreuses connaissances sur l'environnement, les sols et la vie sociale au Mali. De là est venue la motivation de faire une maîtrise sur la problématique de l'érosion hydrique. J'étais alors conscient des conséquences de l'érosion sur l'insécurité alimentaire au Mali. Je me suis alors lancé dans un projet de deux ans et demi.

Les buts poursuivis par ce travail sont en partie utopiques, idéalistes mais réalisables pour ceux qui y croient. Améliorer la sécurité alimentaire en réduisant l'érosion hydrique est nécessaire au Mali. Par contre, le seul changement dans la gestion des terres ne saurait satisfaire les carences alimentaires. Des changements politiques, sociaux et techniques à l'interne comme des changements à l'international pourraient faire toute la différence. L'ampleur d'une recherche comme celle-ci comporte des limites bien précises. Bien que la consultation et l'observation ont été faites sur place et qu'un document d'aide à la gestion des sols face aux impacts de l'érosion en nappe a été produit, le manque de temps et d'argent nous ont obligé à négliger un aspect important du projet : le retour. L'objectif d'une maîtrise sans groupe de recherche reste un document sans durabilité et praticabilité. Ce document est-il condamné à dormir sur les étagères de la bibliothèque de l'UQÀM?

Je voudrais continuer d'avoir « quelques raisons d'espérer » (Pierre Dansereau). Un proverbe malien m'encourage à ne pas lâcher : « Doni Doni Kononi Bagnagada » (qui signifie : Petit à petit l'oiseau fait son nid).

Merci d'espérer avec nous.

Normand Villemure

Ce document est le résultat d'une belle collaboration entre deux mondes : l'Afrique et le Canada. Le projet a réussi à rassembler des scientifiques et des paysans, des étudiants et des professeurs, des militants et des gouverneurs. La réalisation de ce mémoire n'aurait pu être possible sans l'aide de nombreuses personnes et groupes. Du plus profond de mon être je leur offre toute ma reconnaissance.

Je remercie tout d'abord **Alfred Jaouich** mon directeur de recherche au Département des Sciences de la Terre et de l'atmosphère l'UQÀM.

Bakary Berthé (co-chercheur, ingénieur agronome et agent de Kilabo chef d'antenne à Baguinéda). Merci à toi, sans ton courage, ta ténacité, ton souci des autres, ta générosité et tes compétences innombrables en terre malienne, rien de tout cela n'aurait été si bien fait. « Ala ka si ni kènèya di an ma ».

Denise Fontaine (Agente de recherche et de planification et technicienne en laboratoire au Département des Sciences de la Terre et de l'atmosphère l'UQÀM). Tu as été pour moi une mère de laboratoire et un catalyseur de mes émotions face à un travail dont je n'avais aucune idée de son ampleur.

Mille fois merci à Marco Labrie, Chantale Dumont et tous les autres membres du Carrefour de Solidarité International de Sherbrooke (CSI) de m'avoir donné « la première chance » de l'expérience en coopération internationale.

Michel Preda (Géologue au département des Sciences de la Terre et de l'atmosphère l'UQÀM), Pierre Cayer (Institut des Sciences de l'Environnement) Agnieszka Adamowicz (GEOTOP-UQÀM-McGILL), Sophie Tran (COMERN), Bertrand Fournier (consultant en statistiques UQÀM) pour leurs analyses. Merci à Jean-Gabriel Roger, au département Géologie-Mines de Tecslut International Ltée.

Nakorian Doumbia (animatrice à ENDA-sida, Dioïla), ma grande sœur du vieux continent, je te dis merci. Tu as été ma famille, mon soutien et mon guide interculturel. Merci à toute la famille Doumbia de m'avoir hébergé.

Merci à Moussa Traoré (technicien agronome, et agent de Kilabo chef d'antenne à Boidié) qui m'a offert une grande aide pour la logistique à Boidié. Merci à tous les membres de Kilabo qui ont soutenu notre travail (N'Dji Coumaré, Adama Koné, Bakary Doumbia, Moktar Traoré, Ablo Traoré, Fusini Coulibaly, Mariame Traoré, Baro Traoré, Porchio Sogoba, Sanogo...

Merci à Seydou Diabaté (ingénieur géologue, chef de la section cartographie géologique à la Direction Nationale de la géologie et des Mines du Mali), pour m'avoir prêté son bureau et ses documents pour préparer mon terrain. Merci à Mamadou Kalapo (Institut géographique du Mali).

Un merci particulier aux leaders de la fédération paysanne de Dobenkan du cercle de Boidié (Ibrahim Traoré, Soumana Traoré, Mamou Koné, Modibo Sako, Yoro Diallo, Boubou Diallo, Mamadou Nimanga, Mamou Sylla, Sekou Traoré, Sougoba Berthé, Madou Coulibaly, Badia Coulibaly, Mamadou Keita, Basidi Traoré, Badoulaye Doukouré, Mamadou Sanogo). Merci à vous tous pour m'avoir fait confiance et reçu dans vos villages, vos maisons avec un accueil si chaleureux. « Ala ka an kisi gèrègèrè ma ».

Je remercie la Mairie de Boidié (Secrétaire générale : Mamary Dembele; Maire : Maoula Sacko; 1^{er} adjoint : Issa Toungara; 2^e adjoint : Baba Djabaté; 3^e adjoint : Yah Traoré).

Les membres du SLACAER (Service local appuis, conseils, aménagements, équipements rural à Baraouéli; qui relève de la Direction régionale de l'appuis au monde rural de Ségou). Ils m'ont permis d'avoir des informations précieuses sur l'agrométéorologie du milieu.

Koné Traoré, ORS (Office Riz de la région de Ségou à Tamani).

Toumani Doumbia, agent de sécurité à l'aéroport international de Senou.

Les groupes de soutien

Département des Sciences de la Terre et de l'atmosphère l'UQÀM, l'institut des Sciences de l'environnement de l'UQÀM, Kilabo (association malienne non-gouvernementale), bureau de la coopération internationale de l'UQÀM, le Carrefour de Solidarité Internationale de Sherbrooke (CSI), les frères de Saint-Gabriel et la caisse populaire Desjardins de la Vallée du Saint-Maurice.

Sans oublier ma mère Denise Thibeault pour tout l'amour qu'elle m'a donné, Israël Desrosiers pour la correction et son amitié. Merci à Amélie, Diane et Hélène pour la correction. Merci à mon amie de cœur Hélène Hébert pour son soutien et son encouragement dans les moments les plus durs.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------|
| AVANT-PROPOS | ii |
| LISTE DES FIGURES..... | ix |
| LISTE DES TABLEAUX..... | xi |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES | xiii |
| LISTE DES SYMBOLES..... | xiv |
| RÉSUMÉ | xv |
| INTRODUCTION | 1 |
| 0.1 Problématique générale..... | 1 |
| 0.2 Problématique spécifique..... | 2 |
| 0.3 Objectifs..... | 6 |
| 0.4 Problématique de recherche..... | 7 |
| 0.5 Hypothèses..... | 8 |
| 0.6 Approche adoptée | 9 |
| 0.7 Présentation du document..... | 10 |
| | |
| CHAPITRE I | |
| REVUE DE LA LITTÉRATURE..... | 12 |
| 1.1 Notions sur l'érosion des sols | 12 |
| 1.2 Les processus de l'érosion en nappe..... | 14 |
| 1.3 La dynamique des nutriments | 32 |
| 1.4 Modélisation des processus d'érosion en nappe | 55 |
| | |
| CHAPITRE II | |
| MATÉRIEL ET MÉTHODE..... | 62 |
| 2.1 Contexte physique de l'étude au Mali | 62 |
| 2.2 Étude préliminaire..... | 75 |
| 2.3 Description des analyses..... | 85 |

| | |
|---|-----|
| 2.4 Les sols de la zone d'étude | 91 |
| 2.5 Analyse systémique | 97 |
| 2.6 Paramétrer RUSLE2 : simulation et spatialisation | 117 |
| CHAPITRE III | |
| RÉSULTATS | 125 |
| 3.1 Caractérisation des « profils types » | 125 |
| 3.2 Caractérisation des systèmes d'érosion (sol/surfaces combinatoires) | 143 |
| 3.3 Simulations et spatialisation | 156 |
| CHAPITRE IV | |
| DISCUSSION | 182 |
| 4.1 La spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe | 182 |
| 4.2 La spatialisation pour une gestion durable des sols en Afrique de l'Ouest | 184 |
| 4.3 Limites de l'étude | 186 |
| CONCLUSION | 188 |
| BIBLIOGRAPHIE | 190 |
| APPENDICE A : Calculs..... | 199 |
| APPENDICE B : Plantes culturales (Toure et al. 2000)..... | 204 |
| APPENDICE C : Fiches d'échantillonnages 2 à 34..... | 208 |
| APPENDICE D : Codes et fiches de terrains quotidiennes | 237 |
| APPENDICE E : Photos de l'exoscopie des grains de quartz | 239 |
| APPENDICE F : Planche photographique..... | 240 |
| APPENDICE G : Exemple d'aménagement de la surface 3 du SE-I..... | 247 |
| APPENDICE H : Carte de gestion des sols | 249 |
| APPENDICE I : Tableau du scénario 2..... | 258 |

LISTE DES FIGURES

| Figure | Page |
|--------|--|
| 1.1 | Diagramme de Hjulström.....18 |
| 1.2 | Pente de type complexe (profil convexe-concave), adapté de Foster et <i>al.</i> (2002).....19 |
| 1.3 | Effet combiné d'une litière et d'une canopée lorsque la hauteur moyenne de chute des gouttes de pluie ne dépasse pas 1 mètre, Wishmeier et Smith (1978).....21 |
| 1.4 | Effet splash, Foster et <i>al.</i> (2002).....28 |
| 1.5 | Loi du minimum, (Jones et Jacobsens, 2001).....33 |
| 1.6 | Cycle de l'azote, (Jones et Jacobsens, 2001).....39 |
| 1.7 | Cycle du phosphore, (Jones et Jacobsens, 2001).....43 |
| 1.8 | Six règles à respecter pour la restauration des sols (ROOSE E. 1994).....53 |
| 2.1 | Localisation de Boidié, modifié de Technical University of Berlin (2004) et de FAO (2004).....62 |
| 2.2 | Données agro-météorologiques des campagnes 1999 à 2004. Les pluies utiles pour la commune de Barouéli, SLACAER, 2004.....65 |
| 2.3 | Carte géostructurale simplifiée de l'Afrique de l'ouest (Casenave et Valentin, 1989).....66 |
| 2.4 | La coupe géologique du bassin de Sikasso (Girard et al. 1998).....68 |
| 2.5 | Géomorphologie des unités principales de paysages au Sahel (Penning et al. 1991).....71 |
| 2.6 | Carte du Bassin du Niger, ALY OULD O. (2003).....72 |
| 2.7 | Carte CBN1, secteur de référence de l'étude77 |
| 2.8 | Coupe du sol à Kamba.....81 |
| 2.9 | Lieu d'identification de sol et d'échantillonnage.....85 |
| 2.10 | L'écosystème et le système sol.....99 |
| 2.11 | Système d'érosion.....102 |
| 2.12 | Seconde étape de l'intégration agriculture-élevage (1960-1995) (Ferault, 2003).....103 |
| 2.13 | Carte de l'utilisation des sols à Dilango106 |
| 2.14 | Étapes successives supposées de l'évolution d'un plateau moyen du bassin versant du fleuve Niger dans notre secteur de référence (adapté de Boulet et <i>al.</i> 1982).....109 |

| | | |
|------|--|-----|
| 2.15 | Mécanismes de transformations des cuirasses ou sols gravillonnaires en sols tropicaux ferrugineux (adapté de Boulet et <i>al.</i> 1982)..... | 109 |
| 2.16 | Relation entre les sols dans la toposéquence du secteur de référence (adapté de Boulet et <i>al.</i> 1982)..... | 110 |
| 2.17 | Étude du système d'érosion de la station..... | 112 |
| 2.18 | Toposéquence coupe A..... | 113 |
| 2.19 | Nuances de la toposéquence élémentaire: coupe B..... | 113 |
| 2.20 | Toposéquence élémentaire : coupe C..... | 114 |
| 2.21 | Coupe de la plus grande pente pour trouver le facteur L..... | 115 |
| 2.22 | Limitation du système d'érosion à l'aide de toposéquences : coupes D, E, F, G et H..... | 116 |
| 2.23 | Paramètres nécessaires à l'utilisation du logiciel RUSLE2 dans la section « climate »..... | 118 |
| 2.24 | Utilisation des SIG (adapté de Nafo, 2000)..... | 123 |
| 2.25 | Modèle conceptuel de la spatialisation des impacts de l'érosion en nappe..... | 124 |
| 3.1 | Concentrations d'aluminium dans les eaux de filtration des sols pour chaque test de dispersion..... | 127 |
| 3.2 | Concentrations de fer dans les eaux de filtration des sols pour chaque test de dispersion..... | 127 |
| 3.3 | Concentrations de Mg et Ca dans les eaux de filtration des sols pour chaque test de dispersion..... | 129 |
| 3.4 | Graphique des valeurs moyennes des types de sols selon la première et la deuxième fonction discriminante..... | 132 |
| 3.5 | Graphique de différenciation des types de sols selon la texture..... | 134 |
| 3.6 | Carte des sols du secteur de référence..... | 145 |
| 3.7 | Pourcentage de la répartition des unités de sol dans le secteur de référence..... | 145 |
| 3.8 | Cartographie du facteur C | 146 |
| 3.9 | Carte des systèmes d'érosion..... | 147 |
| 3.10 | Carte de la caractérisation des systèmes d'érosion avec les surfaces combinatoires..... | 148 |
| 3.11 | Comparaison des deux scénarios pour l'érosion..... | 171 |
| 3.12 | Comparaison des deux scénarios pour la conservation des nutriments..... | 171 |
| 3.13 | Carte de gestion des sols..... | 172 |

| | | |
|------|--|-----|
| 3.14 | Répartition des feuillets..... | 173 |
| 3.15 | Terrasse progressive et adoucissement de la pente (adapté de Roose, 1994)..... | 177 |
| 3.16 | Masse (Kg/ha) racinaire en fonction de l'âge (jours) pour les 10 premiers centimètres du facteur C de la bande alternante selon RUSLE2..... | 177 |
| 3.17 | Pourcentage de couverture par la canopée en fonction de l'âge (jours) du facteur C de la bande alternante selon RUSLE2..... | 177 |
| 3.18 | Aménagement de bandes alternantes selon la longueur critique (Lc)..... | 178 |
| 3.19 | Billons en courbes de niveau cloisonnés (A) et billons alternés (B)..... | 179 |
| 3.20 | Fossés aveugles avec talus amont enherbé (A), fossés de diversion (B), bourrelets de diversion en terre (C), banquettes forestières (D)..... | 180 |
| 3.21 | Chenal exutoire (Roose, 1994)..... | 181 |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableaux | Pages |
|----------|---|
| 1.1 | Facteur couvert végétal et techniques culturales (C) pour diverses cultures en Afrique Occidentale (d'après Roose, 1994)23 |
| 1.2 | Pertes sélectives par érosion en nappe sur une pente de 7 % à Adiopodoumé en fonction du couvert végétal, Côte d'Ivoire. (Roose, 1994)26 |
| 1.3 | Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i> (L) Moench).....52 |
| 1.4 | Pearl or Bulrush Millet (Millet à chandelle, millet perle) (<i>Pennisetum americanum</i> (L) Leeke, Syn: <i>P. glaucum</i> , <i>P. spicatum</i> , <i>P. typhoides</i>).....53 |
| 1.5 | Modèles numérique (modifié de Nafo, 2000).....56 |
| 1.6 | Niveau de confiance des paramètres de RUSLE260 |
| 2.1 | Zones climatiques (Toure et <i>al.</i> 2000)64 |
| 2.2 | Périodes géologiques importantes avec leurs processus. La savane étant le soudanien. Adapté de Penning et <i>al.</i> 1982.....70 |
| 2.3 | Tailles granulométrique utilisées par RUSLE2 et mailles, modifié de Foster et <i>al.</i> (2002).....87 |
| 2.4 | La « Soil taxonomy » américaine et équivalents approximatifs dans les classifications française et FAO (cité de Keita, 2002).....92 |
| 2.5 | Les grandes étapes des itinéraires techniques du système agraire (adapté de Ferault, 2003).....104 |
| 2.6 | Calcul de l'érosivité EL30 pour une averse individuelle. Foster et <i>al.</i> (2002).....118 |
| 2.7 | Exemple de procédure utilisée pour calculer les besoins azotés des activités culturales (adapté de Breman et <i>al.</i> 1996).....120 |
| 3.1 | Résultats des tests de dispersion avec la lecture de l'absorption atomique où A : absorption atomique et T : test avec le numéro.126 |
| 3.2 | Résultats des ANOVA selon le type de sol130 |
| 3.3 | Corrélations des deux fonctions discriminantes selon les variables131 |

| | | |
|------|--|-----|
| | | xii |
| 3.4 | Corrélations agrégées des variables chimiques..... | 133 |
| 3.5 | Résultats des ANOVA selon le type de sol | 133 |
| 3.6 | Analyse des argiles à la diffraction-x | 136 |
| 3.7 | Analyse des roches mères à la diffraction-x | 137 |
| 3.8 | Légende des sols du secteur de référence | 140 |
| 3.9 | « Profils types » des sols du secteurs de référence | 142 |
| 3.10 | Tableau de caractérisation des systèmes d'érosion. (1 de 5 pages) | 149 |
| 3.11 | Scénario 1 (simulations de pertes en terres et en nutriments des systèmes d'érosion du secteur de référence) (page 1 de 3). | 158 |
| 3.12 | Synthèse des simulations selon les systèmes d'érosion..... | 162 |
| 3.13 | Solutions aux surfaces combinatoires problématiques..... | 164 |
| 3.14 | Synthèse du scénario 2..... | 170 |
| 3.15 | Utilisation de la carte de gestion des sols | 174 |
| 3.16 | Ajustement de la matière organique selon les types de sols | 175 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|-------------|--|
| BRM | La Base de Référence Mondiale en sol. |
| CID | Convention Internationale sur la lutte contre la Désertification (remplacée aujourd'hui par le sigle CCD). |
| CILSS | Comité permanent Inter-États de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel. |
| CCD | La Convention des Nations Unies sur la lutte Contre la Désertification. |
| CIRAD | Centre français de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement. |
| CPCS | Comission de Pédologie et de Cartographie des Sols (Classification française des sols 1967). |
| DEM | « Digital Elevation Model » |
| DNCNM | Direction Nationale de la Conservation de la Nature du Mali. |
| FAO | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. |
| GERDAT | Groupeement d'Étude et de Recherche pour le Développement de l'Agronomie Tropicale. |
| GCES | La Gestion Conservatoire de l'Eau, de la biomasse et de la fertilité des Sols. |
| GEOTOP | Centre de recherche en Géochimie isotopique et en Géochronologie. |
| GPS | « Global Position System ». |
| IER | Institut d'Économie Rurale (au Mali). |
| IRD | Institut français de Recherche pour le Développement. |
| ISBN | « International Standard Book Number ». |
| ORSTOM | Maintenant devenu l'IRD, Institut français de Recherche pour le Développement. |
| PIRT | Projet d'Inventaire des Ressources Terrestres au Mali. |
| PNUD | Programme des Nations Unies pour le Développement. |
| PSS | Projet Production Soudano-Sahélienne |
| RUSLE2 | « Revised Universal Soil Loss Equation-Version 2 ». |
| SIG | Système d'Information Géographique. |
| SLACAER | Service Local Appuis, Conseils, Aménagement, Équipement Rural à Barouéli. |
| SP-PNAE-CID | Secrétariat permanent du Plan National d'Action Environnementale (Mali) et la Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification. |
| USDA | « United States Department of Agriculture ». |

LISTE DES SYMBOLES

Majuscule

| | |
|--------|------------------------------------|
| A | Sol perdu par érosion (t/ha/an) |
| Al | Aluminium |
| BP | « Before present » de l'année 1950 |
| C | Carbone |
| Fm | Formation |
| Kg | Kilogramme |
| M | Molaire |
| M.O. | Matière organique |
| M.O.F. | Matière organique fraîche |
| N | Azote |
| P | Phosphore |
| T | Température (°C) |

Minuscules

| | |
|-----|--------------------|
| ac | acre |
| g | gramme |
| ha | hectare |
| l | litre |
| m | masse (g) |
| méq | milliéquivalents |
| mg | milligramme |
| µm | micromètres |
| ppm | partie par million |
| t | tonne |

RÉSUMÉ

Selon la FAO (2000), le problème d'insécurité alimentaire est majeur dans le nord, nord-est et le centre du Mali. Cette étude se situe dans le centre du Mali en zone soudano-sahélienne aux environs du village de Boidié dans le cercle de Barouéli, à l'intérieur de la région de Ségou. Le secteur de référence de la zone d'étude a comme limites : $-6^{\circ} 40'$ de longitude et $13^{\circ} 10'$ de latitude. Dans le cercle de Barouéli l'érosion hydrique des sols et la déforestation sont les dégradations de l'environnement dominantes qui ont comme issue une perte de fertilité des sols (D-IC SAHEL, 2002). Sur les glacis ferrugineux tropicaux des régions soudano-sahéliennes l'impact de l'érosion hydrique et plus précisément l'érosion en nappe est grande. Les pertes en terre calculées sont de 0,5 à 40 t/ha/an (Roose, 1994).

L'objectif de cette étude est d'évaluer la spatialisation des impacts de l'érosion en nappe pour une gestion durable des sols à Boidié à l'aide de RUSLE2 et des SIG. Pour se faire, une étude de terrain de deux mois au Mali a été réalisée. Des données météorologiques, géomorphologiques, pédologiques et agronomiques ont été recueillies, ainsi que des échantillons pour l'analyse en laboratoire. Ces analyses sont la granulométrie, l'absorption atomique, la diffraction-X et les C, N, P totaux. Le modèle RUSLE2 a été utilisé pour le calcul d'érosion en nappe et les SIG pour la spatialisation, la cartographie et les analyses thématiques.

Le modèle RUSLE2 permet de trouver des pratiques culturales et de conservations qui réduisent l'impact de l'érosion en nappe. La spatialisation des impacts est possible avec la méthode des systèmes d'érosion. L'utilisation de la carte de gestion des sols des environs de la commune de Boidié permettrait de diminuer l'érosion moyenne des systèmes d'érosion de 65 à 91 %. La perte en nutriment des sols est diminuée et la fertilité est augmentée. La durabilité moyenne des sols est accrue. Bref, la sécurité alimentaire à Boidié serait mieux assurée à long terme, sans coût exagéré et par une gestion intégrée au système social.

Par contre, il ne faut pas oublier les limites du modèle RUSLE2. Le modèle s'applique seulement à l'érosion en nappe et néglige certaines interactions entre les facteurs de dégradations des sols. De surcroît, un projet semblable doit impliquer une étude de terrain laborieuse et coûteuse pour atteindre un bon résultat (carte de gestion des sols de Boidié). Finalement, l'efficacité d'utilisation de la carte par les populations locales n'a pas encore été évaluée.

MOTS-CLÉS : Érosion en nappe - Modélisation - Spatialisation - Afrique de l'Ouest - Sols tropicaux - Systèmes d'érosion - Gestion durable - SIG - RUSLE2.

INTRODUCTION

La science de l'environnement se doit d'avoir une vision globale, d'utiliser le « microscope » (Rosnay, 1975). Pour ce faire, il faut réussir à regarder globalement un problème spécifique. On se doit de détecter les engrenages, les régulateurs et les interactions entre les variables des systèmes économiques, sociales et environnementales par l'approche systémique. De nature à utiliser cette conception, nous verrons dans un premier temps la problématique générale de la sécurité alimentaire. Nous ferons un survol de la problématique spécifique de l'érosion hydrique dans la région de Ségou. Dans un deuxième temps, nous établirons les objectifs de cette recherche, la problématique de recherche et les hypothèses. Nous décrirons ensuite la méthode adoptée pour réaliser nos objectifs. Finalement, nous ferons une brève présentation de l'articulation de notre document.

0.1 Problématique générale

L'Afrique subsaharienne est la région la plus marquée par la sous-alimentation. Elle est aussi celle où se trouve le plus grand bassin de personnes sous-alimentées (FAO, 2003). Elle est une région très marquée par la carence alimentaire, mais ce n'est pas son seul handicap. L'Afrique subsaharienne est caractérisée par une vulnérabilité régionale. Elle fait partie des régions où la désertification est la plus présente : Afrique, l'Asie, l'Amérique du Sud et les Caraïbes et la Méditerranée septentrionale (Nations Unies, 2003). De plus, l'impact du climat est encore plus frappant à cause de l'influence des changements climatiques sur le milieu « Sachant en outre que les pays [...] des zones arides ou semi-arides ou des zones sujettes aux inondations, à la sécheresse et à la désertification, [bref des milieux fragiles comme certaines région de l'Afrique subsaharienne] » (Nations Unies, 1992). Pour renchérir le côté vulnérable de l'Afrique on peut se fier à l'article 7 dans la *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* qui met l'emphasis sur la priorité

d'aide à l'Afrique. De plus, dans le *Bilan 2001 de l'IPCC sur les changements climatiques : Conséquences, adaptation et vulnérabilité*, l'Afrique fait partie du chapitre de vulnérabilité régionale.

« Selon la région, les systèmes naturels et sociaux sont dotés de caractéristiques, de ressources et d'institutions diverses et sont soumis à des contraintes différentes qui engendrent une sensibilité et une capacité d'adaptation particulières. Il s'ensuit une disparité marquée des préoccupations essentielles propres à chacune des grandes régions du monde. De plus, les incidences du changement climatique, la capacité d'adaptation et la vulnérabilité varient à l'intérieur même de chaque région. La plupart des régions peu développées sont particulièrement vulnérables, du fait qu'une grande partie de leur économie relève de secteurs sensibles au climat et que la modicité de leurs ressources humaines, financières et naturelles et leurs faibles capacités institutionnelles et technologiques réduisent considérablement leur capacité d'adaptation. En Afrique, en Amérique latine et en Asie, où les possibilités d'adaptation sont généralement faibles [...] »

En Afrique, les variations des débits saisonniers des cours d'eau, les inondations et les sécheresses, les problèmes de sécurité alimentaire, les répercussions sur les pêches, les conséquences sanitaires et l'atteinte à la diversité biologique figurent parmi les principales vulnérabilités et les grands sujets de préoccupation.

0.2 Problématique spécifique

Dans le même ordre d'idée, la problématique de la sécurité alimentaire peut se développer par le problème de dégradation du sol qui est la source des aliments. En effet, selon l'analyse diagnostique globale de la situation environnementale au Mali (Diarra et al, 2003), 80% de la population serait touchée par l'érosion des sols. Cette même étude montre que la dégradation des sols cause des externalités importantes et qu'elles concernent en priorité l'érosion des sols et la déforestation. Sans compter que le problème de l'érosion des sols (principalement l'érosion hydrique en zone soudano-sahélienne) est un grand problème que plusieurs scientifiques, hommes politiques, autorités locales et paysans soulignent. Ce processus de dégradation est si important qu'il aggrave plusieurs facteurs de vulnérabilité régionale propres à la région de Ségou.

0.2.0 La réalité de la région de Ségou : l'érosion hydrique et les facteurs de vulnérabilité régionale.

Dans cette partie du travail, nous verrons que l'érosion hydrique ne peut être combattue sans tenir compte des facteurs de fragilité géographique. Ces facteurs qui augmentent la vulnérabilité de la région de Ségou à l'insécurité alimentaire seront traités dans l'ordre suivant : la pauvreté économique, la pluviométrie, la production agricole, le pâturage et les points d'eau, la politique et la végétation.

Dans un premier temps, la pauvreté économique produit un cercle vicieux au sein des populations locales. La nourriture est difficile à acheter puisque l'argent manque, solution, il faut produire! L'appauvrissement des sols par l'érosion hydrique réduit la production alimentaire. Il faudrait donc changer la gestion des sols : élaborer des dispositifs anti-érosifs, faire une agriculture durable, régénérer les couverts végétaux et amender les sols. Par contre, ces actions nécessaires provoquent des coûts. En effet, le simple paysan n'a pas assez d'argent pour nourrir sa famille. Comment un paysan ayant des bénéfices par homme-jour très bas (300 FCFA jusqu'à des bilans négatifs) peut subvenir aux dépenses annuelles moyennes destinées à l'alimentation d'une famille s'élevant à 74 250 FCFA (DNSI 1998, cité de Breman et *al.* 1998). Donc, il peut encore moins investir dans la restauration des sols et la lutte contre l'érosion. Alors, le cycle de dégradation des terres continue et augmente de plus en plus. Une étude de Diarra et *al.* (2003) a été réalisée pour le compte du SP/PNAE-CID en vue d'évaluer les coûts pour l'économie nationale des dépenses indirectes que la dégradation de l'environnement entraîne. Selon cette étude qui se base sur l'analyse diagnostique globale de la situation environnementale au Mali, le montant total des pertes en terme de PIB varierait entre 20,9 et 26,5 %, soit 2 fois la dette extérieure du Mali, ce qui montre l'impact fortement négatif de la dégradation. Les différents éléments entrant dans le calcul concernent en priorité l'érosion des sols et la déforestation (Diarra et *al.* 2003). Il faut savoir que dans le cercle de Baroueli de la région de Ségou, l'érosion hydrique des sols et la déforestation (qui accélère l'érosion par l'eau) sont dominants. Même si le relief de la zone est relativement plat, la perte de fertilité des sols par érosion hydrique se présente comme une réalité (D-IC SAHEL, 2002). Bref, les gains environnementaux d'une lutte anti-érosive pourraient être très

grands sur le plan économique, environnemental et ainsi pourraient augmenter la sécurité alimentaire.

Dans un deuxième temps, le climat d'une région peut affecter grandement la sécurité alimentaire. D'une part par le déficit en pluie qui crée une réduction de la production et d'autre part par la dégradation des sols par l'eau de pluie et de ruissellement. Par exemple, la pluviométrie (cumul du 1er Mai au 31 octobre) au cours de la saison 2002 a été déficitaire dans l'ensemble par rapport à celui de l'année 2001 pour la même période (MAEP, 2003). Ce qui résulte à une diminution généralisée de la production. La région de Ségou comporte une particularité climatique. Quoique le climat n'ait pas une grande pluviosité, il est très agressif. L'intensité des orages est élevée, le ruissellement est fort et la différence de température (sécheresse et humidité) entre les saisons cause une déstructuration des sols. Ce climat agressif est un facteur influent de vulnérabilité de la région à l'érosion hydrique.

Dans un troisième temps, nous savons tous que la production agricole est nécessaire à la sécurité alimentaire. La campagne agricole 2002 – 2003 du Mali est caractérisée par une baisse de productivité générale, mais surtout dans le nord des régions de Kayes, Koulikoro et dans les régions de Ségou et de Mopti. Pour ces régions, toutes les cultures à l'exception du sorgho et du maïs ont enregistré des baisses significatives variant entre -23,7 % pour le fonio et -52,0 % pour le blé par rapport à la campagne antérieure (MAEP, 2003). Par ailleurs, il faut noter que les rendements sont en baisse pendant que les superficies de mises en valeur de terres ont été grandement augmentées. Ce déséquilibre cause une mauvaise gestion des terres. Le Mali compte environ 30 millions d'ha de terres arables (soit 23,8 % du territoire), dont 11,4 millions ha de terres sous cultures et jachères sur lesquels 3 à 3,5 millions ha sont cultivés chaque année et un potentiel de 1 million d'ha irrigables. Cependant, les sols présentent des contraintes importantes du point de vue agronomique. Le niveau de fertilité des sols est de moyen à faible, ils ont souvent des carences en azote, phosphore, potassium et soufre et ils ont une forte sensibilité à l'érosion hydrique (PNUD, 2004).

Ensuite, pour la campagne 2002-2003, les pâturages et les points d'eau sont : dans la région de Ségou, moyens à l'exception de la zone exondée de Sokolo et Nampala où ils sont

mauvais. Donc, les déplacements de troupeaux seront plus nombreux pour trouver de bonnes zones de pâturage. Par ailleurs, selon Touré et *al.* (2000), la région de Ségou est la quatrième région d'élevage avec 14,6 %. Ce qui donne un indice sur la présence possible de surpâturage et de problèmes d'érosion qui s'en suit.

Par la suite, le contexte politique du Mali est particulier. Suite aux événements de 1991 et des changements récents au pouvoir, le Mali est en pleine restructuration de son gouvernement. La décentralisation des pouvoirs, quoi qu'elle soit bonne pour certaines raisons, cause beaucoup de problèmes. La gestion des terres en est grandement affectée. Les nouveaux règlements environnementaux ne sont pas toujours compris ou respectés, les autorités locales ne sont pas encore en mesure d'appliquer les règlements et les problèmes fonciers font augmenter la négligence des terres. Celles-ci, abandonnées rendues infertiles et sans couvert végétal rendent la tâche d'autant plus difficile. À qui revient le devoir de s'en occuper : le gouvernement, les fédérations paysannes, les associations de femmes? La politique de décentralisation trop rapide a comme conséquence une mobilisation chaotique du peuple. Tous veulent s'en occuper, mais à quel prix? Est-ce que je pourrai garder cette terre? Le bien commun devient-il moins populaire? Par ailleurs, la situation politique en Côte d'Ivoire a eu des répercussions au Mali. En effet, la Côte d'Ivoire est le principal débouché pour le bétail malien spécialement pour celui des régions de Sikasso, Ségou, Mopti et Tombouctou (MAEP, 2003). Les événements en Côte d'Ivoire sont de nature à perturber ce flux d'échange voire même le stopper. Ce faisant, une diminution de la demande en bétail conduirait à une baisse des prix des animaux. Cette baisse réduirait le pouvoir d'achat des acteurs de la filière pour leur accès aux denrées alimentaires.

Finalement, les forêts situées à proximité de la ville de Ségou subissent la pression anthropique suite à la forte densité des populations. Certaines forêts du Cercle de Barouéli commencent à être occupées sur leurs bordures, dans les zones favorables aux cultures (Touré et *al.* 2000). La déforestation qui accentue l'érosion hydrique est caractéristique du cercle de Barouéli. La pression faite sur les ressources ligneuses est due à la grande demande de Bamako et de la proximité de la ville de Ségou qui a de grands besoins en bois-énergie. Par ailleurs, de plus en plus d'agriculteurs défrichent de nouvelles zones pour les cultiver ou

les transformer en parcs agro-forestiers. Un autre exemple est celui que souligne Roose (1994) : les feux tardifs. Comme on peut en voir dans les savanes soudaniennes et soudano-sahéliennes au mois de mai juste avant les pluies, les feux de brousse sont catastrophiques. Le couvert végétal est diminué et le sol moins protégé. Par conséquent, le sol est plus vulnérable et sensible à l'érosion hydrique.

Tout compte fait, la sécurité alimentaire dans la région étudiée est en danger. La région de Ségou n'a pas une « capacité de support » (sect. 2.5.0) assez forte pour résister aux dégradations qui mettent en danger la sécurité alimentaire. Donc, comment faire pour augmenter la « capacité de support » de cette région? C'est en améliorant les capacités des systèmes sociaux, économiques et environnementaux. Donc, en rectifiant les mécanismes de fonctionnement du système sol (faisant partie du système environnemental). La capacité du système à supporter la production nécessaire à la sécurité alimentaire se fera en contrôlant le mieux possible la régulation du système sol, en évitant les ruptures du système, en favorisant une évolution progressive du système et en ayant un bilan positif en nutriments. En d'autres mots, garder un équilibre en sol et environnement. Pour ce faire, nous nous sommes posés les objectifs que voici.

0.3 Objectifs

0.3.0 Objectif de recherche.

Spatialiser les impacts de l'érosion en nappe pour une gestion durable des sols en Afrique de l'Ouest (aux environs d'un village de la région de Ségou) à l'aide des SIG et du modèle RUSLE2.

0.3.1 Objectifs spécifiques.

Améliorer les références pédologiques locales. Analyser et décrire des « profils types » de sols. Montrer l'applicabilité du modèle RUSLE2 dans la région de Ségou. Montrer les impacts de l'érosion en nappe dans le secteur de référence. Produire une carte locale de gestion des sols.

0.4 Problématique de recherche

Dans le but de réaliser les objectifs posés et en tenant compte des bases théoriques du chapitre I, nous avons dégagé une problématique de recherche. Ensuite, des hypothèses ainsi que l'approche adoptée sont émises.

La multidisciplinarité de ce travail nécessite l'utilisation de plusieurs concepts et théories en interactions. La science des sols elle-même utilise plusieurs disciplines spécialisées (ex : physique, chimie, biologie, microbiologie, etc.). Les recherches sur l'érosion des sols sont menées à plusieurs échelles, du niveau d'Alerte mondiale en passant par des projets d'Alerte Précoce au niveau du Sahel (CILSS, voir Di Vecchia *et al.* 2001) jusqu'à des bilans de nutriments spatialisés à l'échelle d'un territoire de savane (Manlay, 2004). De plus, les approches adoptées sont de plus en plus variées (approche spatialisée, bilans de nutriments et de pertes en sol, étude des processus, étude des états de dégradation, etc.). Par ailleurs, ce genre d'étude nécessite de multiples outils (télédétection, système d'information géographique, modèles numériques, outils analytiques). Malgré les nombreux travaux sur le sujet, il subsiste pourtant encore de fortes incertitudes aujourd'hui sur la manière d'évaluer et de prédire l'érosion hydrique des sols. Les indicateurs utilisés pour la caractérisation ou la gestion des états dégradés divergent selon les études, et les prévisions quant à l'évolution des sols à moyen et long terme sont controversées. Nous verrons au chapitre I la complexité de l'érosion en nappe et des nutriments dans les sols tropicaux. Le phénomène de l'érosion hydrique est la résultante de plusieurs variables internes et externes aux sols cultivés. Ils ont été très étudiés individuellement, mais la compréhension de leurs interactions reste très approximative. De surcroît, l'érosion en nappe est liée à une grande variabilité des manifestations du phénomène. Les processus en interaction sont également dépendants des facteurs externes qui sont très variables dans le temps et dans l'espace. En conséquence, l'évolution de l'érosion en nappe sera spécifique du milieu et des échelles de temps et d'espace étudiées. Cela rend difficile le transfert des résultats d'un contexte à un autre. Par ailleurs, les investigations nécessaires pour caractériser dans le temps ce phénomène et les facteurs du milieu qui le provoquent sont lourdes et coûteuses. En conséquence, il existe très peu de chroniques d'observations suffisamment longues,

homogènes et complètes pour analyser l'évolution du sol sur le moyen terme et qui pourraient valider les prédictions faites en terre malienne.

L'étude que nous faisons doit intégrer trois disciplines majeures : la cartographie, la pédologie et la modélisation. Dans un premiers temps, nous verrons que la cartographie réalisée par le PIRT n'est pas assez précise pour une étude de spatialisation des impacts de l'érosion en nappe dans le but d'améliorer la gestion des sols localement. Par ailleurs, des projets de télédétection comme celui du CILSS sont gigantesques et également imprécis pour des études à grandes échelles. Elles n'aident qu'à donner une idée globale des problèmes. Dans un deuxième temps, l'érosion en nappe des sols dans la région Ségou au Mali n'a jamais été évaluée de cette manière et à l'échelle de la commune (du village de Boidié). De plus, les données sur la dynamique des nutriments en sols malien et en particulier dans la région de Ségou sont rares. La diversité et le caractère très complexe des toposéquences de sols à grande échelle apportent un énorme défi à cette recherche. Dans un troisième temps, les modèles d'érosion sont nombreux et comportent des limites bien précises quant à leur applicabilité au Mali.

0.5 Hypothèses

Voici les neuf hypothèses que nous avons posées : 1) La caractérisation de « profils types » est possible à l'échelle du secteur de référence. 2) Les sols ferrugineux tropicaux sont l'unité de sol la plus sensible à l'érosion en nappe. 3) Les pentes réelles de terrain du secteur de références sont spatialisables avec des modèles numériques. 4) L'érosion en nappe cause un fort pourcentage de perte d'éléments nutritifs. 5) La croûte de battance et l'hydromorphie sont des facteurs manquant à RUSLE2. 6) Les toposéquences définissent un système d'érosion. 7) La spatialisation peut se faire selon les systèmes d'érosion. 8) L'utilisation de méthodes pour diminuer l'érosion est spatialisable. 9) La spatialisation des impacts de l'érosion en nappe est projetable à de grandes échelles à petite échelle pour un même bassin versant.

0.6 Approche adoptée.

Afin de réaliser ces objectifs, il faut adopter une approche de travail adéquate. L'étude n'est pas uniquement un travail sur les sols, c'est un travail sur un système en évolution : le système sol. Ce système très complexe est en interaction avec le système économique, social et environnemental. Des paysans vivent sur ces sols. Ils se nourrissent des produits de la terre, ils ont des revenus économiques grâce à celle-ci, ils évoluent dans un milieu géophysique qui a, en partie, sculpté leur culture. De plus, la diversité des processus concernés, la multiplicité des interactions ainsi que la forte variation des facteurs du milieu qui les contrôlent rendent le phénomène de l'érosion en nappe en Afrique de l'Ouest très variable dans le temps et l'espace.

Devant cette complexité, il est nécessaire de faire des choix du point de vue de l'échelle de temps et de l'unité d'espace. L'échelle d'espace choisie est celle du système d'érosion, dans un bassin versant. Elle nous semble adaptée à l'étude du couplage entre les processus d'érosion et de dynamique d'éléments nutritifs. Un secteur de référence dans le bassin versant du fleuve Niger a été choisi. À l'intérieur de celui-ci plusieurs systèmes d'érosion sont présents. La toposéquence (la séquence entre le sol et la topographie) est bien définie. Finalement, nous avons choisi le secteur de référence aux alentours du village de Boidié qui fait partie du cercle de Barouéli dans la région de Ségou.

Puisque RUSLE2 est adapté aux études menées à l'échelle de la parcelle ou du périmètre, les résultats de ce modèle serviront à décrire les différents systèmes d'érosion pour ensuite spatialiser le tout au secteur de référence. Par ailleurs, l'échelle de temps nous a été imposée par le modèle RUSLE2 qui fait une moyenne sur vingt ans. Ce qui est très intéressant et convaincant pour un particulier ou un groupe de paysans d'investir sur leur territoire. Une autre échelle de temps utilisée est la comparaison de processus successifs. Par exemple, sur un même type de sol dans un même système d'érosion, il peut y avoir des points d'étude sans érosion, avec érosion en nappe et avec érosion linéaire. L'évolution de ce sol fait que le premier exemple est un climax ou presque, les autres sont un système en rupture l'un moins avancé que l'autre. Alors, nous pouvons mettre un « âge d'évolution » de processus au sol. Ces choix d'échelles ont été faits dans le but de faciliter la spatialisation.

Pour ce faire, il nous était nécessaire de compléter la méthode avec trois outils complémentaires : des analyses en laboratoire de « profils type » et de facteurs de station de Dilango, l'utilisation des SIG pour la spatialisation et du modèle RUSLE2 pour les simulations. Les analyses en laboratoire ont été utiles surtout pour la paramétrisation des modèles. L'intérêt de l'utilisation de modèles consiste à faire des simulations dans le temps pour prévenir les impacts de l'érosion en nappe en utilisant de meilleures pratiques agricoles. L'utilisation des SIG nous permet de spatialiser les résultats sans faire le travail laborieux de cartographie en peu de temps et en identifiant les systèmes d'érosions présents sur des cartes numérisées.

0.7 Présentation du document

Dans le premier chapitre, sur la base d'une revue de la littérature existante, nous commencerons par rappeler les fondements de l'érosion. Ensuite, nous verrons les processus de l'érosion en nappe. Puis, nous aborderons la dynamique des nutriments en insistant sur son importance pour une gestion durable des sols en Afrique de l'Ouest. Nous verrons ensuite des modèles numériques et évaluerons le succès de ces derniers à rendre compte de phénomènes de l'érosion en nappe et de la dynamique des nutriments et ce, autant du côté pratique que théorique. Cette analyse bibliographique nous amènera à faire des choix quant à la conduite d'analyses et au type de modèle numérique à utiliser. Le modèle RUSLE2 sera présenté et son analyse de sensibilité sera faite.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la méthodologie mise en place pour cette étude. Nous prendrons connaissance de la problématique de recherche dégagée par la revue de la littérature. Face à celle-ci, des hypothèses seront ensuite posées. Par conséquent, la contextualisation du milieu physique sera exposée. Puis, nous verrons l'étude préliminaire que nous avons réalisée au Mali. Dans cette étape, des échantillons ont été recueillis pour fin d'analyses. Celles-ci seront décrites avant de développer l'analyse systémique des sols. Finalement, nous déploierons la méthode de paramétrisation du modèle RUSLE2 et de la spatialisation des impacts de l'érosion en nappe.

Dans le troisième chapitre, nous ferons la caractérisation des « profils types ». Pour ce faire, les résultats des analyses seront exposés. Ces résultats développent des profils de sol selon la texture, les propriétés de dispersions (oxyhydroxydes, types d'argiles, bases etc.), les nutriments, les régimes hydriques, la tolérance en perte de sol, le pH etc. Ensuite, les systèmes d'érosion seront caractérisés à l'aide des SIG selon la méthode des toposéquences et des surfaces combinatoires. De plus, ces systèmes nous serviront à faire deux scénarios de simulation des impacts de l'érosion en nappe. Par ailleurs, la spatialisation des impacts de ce type d'érosion nous permettra de concevoir une carte de gestion des sols pour réduire l'érosion dans le secteur de référence. Finalement, nous discuterons sur les limites de notre approche et sur notre perspective.

Pour finaliser le travail, une conclusion regroupant les grandes idées sera exposée. Puis, viendront les appendices incluant les calculs, des supports théoriques, des planches photographiques, les synthèses des fiches de terrains et les exemples de données à recueillir avec une fiche de terrain quotidienne.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, nous donnerons les informations nécessaires à la compréhension de l'érosion des sols. Nous donnerons des notions sur l'érosion (érosion, érosion en nappe et tolérance en perte de sol). Nous expliquerons les processus qui régissent l'érosion en nappe en décrivant tous les facteurs. Nous étudierons la dynamique des nutriments des sols tropicaux en rappelant leurs fondements théoriques. Puis nous verrons comment on les traite à travers la modélisation. En dernier lieu, nous ferons une synthèse des modèles disponibles pour en choisir un qui convient à cette recherche.

1.1 Notions sur l'érosion des sols

1.1.0 Érosion

Le mot érosion vient de « *erodere* », verbe latin qui signifie « ronger ». L'érosion ronge la terre et transporte le sol. Selon Foucault et Raoult (1995) on la définit comme « 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 ». C'est un processus naturel qui cherche à aplanir le relief, il abaisse les montagnes tout en engraisant les vallées et forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable, tolérable (Roose, 1994).

Nous savons qu'il y a plusieurs types d'érosion : hydrique, éolienne, mécanique, glaciaire. Celui qui nous intéresse, c'est l'érosion par l'eau. Elle est due à l'action de l'eau sur le sol ou sur la roche présente. Il y a quatre types d'érosion hydrique : l'érosion marine, l'érosion en nappe, l'érosion linéaire et l'érosion en masse. Nous décrivons seulement l'érosion en nappe, celle qui concerne cette recherche.

1.1.1 Érosion en nappe

L'érosion en nappe (sheet erosion) est le stade initial de la dégradation des sols par érosion hydrique. Elle est caractérisée par une eau de ruissellement sans griffe, sans rigole (rill erosion) et sans ravinement (gully) visible. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies (effet splash), les particules sont arrachées et transportées. Ce phénomène est surtout observé sur les pentes faibles où l'eau ne peut se concentrer. Le processus de l'érosion en nappe dépend de l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement. Ensuite, elle dépend de l'énergie cinétique des pluies, c'est-à-dire l'impact des gouttes qui arrachent les particules. En effet, la battance des gouttes de pluie va envoyer des gouttelettes dans toutes les directions, de plus, elle dépend de la durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies. Seulement, sous l'effet de la gravité les gouttelettes auront une vitesse plus importante vers l'aval que vers l'amont. En réalisant une moyenne sur l'ensemble des gouttelettes sur une pente, la vitesse sera dirigée de l'amont vers l'aval. Conséquemment, il y aura formation de flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre ce qui entraînera un ruissellement en nappe (Roose, 1994). Cette eau qui ruisselle se charge de sédiments et les déposera en aval. Des signes permettent de caractériser l'érosion en nappes : l'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés, la remontée de cailloux à la surface du sol (Roose, 1994) et des dépôts de particules fines ou de minéraux ferromagnésiens en surface. Si celle-ci n'est pas contrôlée, le processus d'érosion continue et dépendamment du système d'érosion, les griffes, les rigoles et le ravinement s'ajouteront à elle.

1.1.2 La tolérance en perte de sol

Dans le domaine de l'érosion, la tolérance a d'abord été définie comme la perte en terre tolérée car elle est équilibrée avec la formation du sol par l'altération des roches. Elle varie de 1 à 12 t/ha/an (Roose, 1994) en fonction du climat, du type de roche, de l'épaisseur des sols et des types de sols, des horizons humifères. Par contre, cette approche nie l'importance de l'érosion sélective des nutriments et des colloïdes qui font la fertilité des sols. Alors, ce même auteur a tenté de définir la tolérance comme : « l'érosion qui ne provoquerait pas de baisse sensible de la productivité des terres ». Il s'est alors buté à certains obstacles majeurs comme par exemple la perte de productivité des différents types de sol en fonction de

l'érosion. Nous garderons cette approche visionnaire pour spatialiser l'impact de l'érosion tout en se basant sur les chiffres du tableau des « profils types » (tab. 3.9)

1.2 Les processus de l'érosion en nappe

Les fondements théoriques de l'érosion en nappe sont multiples. À la partie 1.1.1 de cet ouvrage, nous avons vu ce qu'était l'érosion en nappe. Dans cette partie, nous verrons les facteurs de formation du processus pour mieux le comprendre. Nous étudierons les facteurs les plus importants que Wishmeier et Smith (1978) ont utilisé pour élaborer « The Universal loss equation » (la formule universelle de perte en terre) : $A \text{ (Mg/ha/an)} = R.K.S.L.C.P.$ Par ailleurs, nous soulignerons des processus qui d'après certains auteurs pourraient eux aussi être des facteurs de formation d'érosion en nappe. Ceux-ci sont l'érosion sélective, la croûte de battance et l'horizon argileux (hydromorphie).

1.2.0 Facteur climatique (R) : « érosivité » des pluies

Le climat est le premier facteur de génération de l'érosion en nappe. En climat tropical, les pluies sont très agressives. L'énergie de la battance des pluies sur les sols dénudés détruit l'agglomération des mottes de sols et la structure en arrachant des particules de terre (Ellison, 1944). Cette énergie des gouttes (effet splash) est causée par une vitesse de chute (fonction de leur hauteur de chute et de la vitesse du vent) et par un certain poids (fonction de leurs diamètres). Au bout de 10 m de chute, la vitesse des gouttes de pluie atteint 90 % de la vitesse finale, déterminée par l'équilibre entre l'attraction universelle et la résistance à l'air de la surface portante de la goutte ((Lawson, 1940 et Bradford, 1983) cité de Roose, 1994). De plus, le vent peut augmenter l'énergie des gouttes de pluie de 20 à 50 % (Lal, 1975. cité de Roose, 1994). Par ailleurs, dans chaque région on peut observer des averses de différentes intensités. Les pluies sont d'autant plus nocives qu'elles sont agressives et violentes. Selon l'esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (RUSA de Wishmeier et Smith, 1978) en Afrique de l'Ouest et du « Centre-Situation » des parcelles d'érosion (d'après les données pluviométriques rassemblées par le Service Hydrologique de l'ORSTOM et arrêtées en 1975) le facteur au Mali se distribue de 100 au nord (près de Tombouctou) à 800 au sud (région de Sikasso). Bref, l'énergie des gouttes de pluie qui

tombent sur le sol défait les agglomérats en surface du sol selon sa sensibilité au détachement. C'est ce qui nous amène à parler de l' « érodibilité » du sol.

1.2.1 Facteur sol (K) « érodibilité » : la sensibilité du sol à l'érosion

En sachant que l'énergie de la battance des pluies attaque directement le sol s'il n'est pas protégé, il faut alors observer comment réagissent les sols à ce phénomène en fonction de leur différence. Premièrement, il faut considérer « l'érodibilité » comme un facteur représentant la sensibilité d'un sol au détachement des particules, au transport des sédiments, à la quantité et le taux de ruissellement qu'il provoque face à une « érodibilité » donnée. La sensibilité du sol à l'érosion est un effet combinatoire de variables externes et internes aux sols. Nous verrons plus en détail ces variables tout en gardant la perspective sur les sols tropicaux.

Selon plusieurs auteurs, le facteur K est étroitement lié à la structure et à la granulométrie du sol. Une granulométrie fine et grossière a une valeur de K faible tandis qu'une granulométrie moyenne a une valeur de K modéré et les granulométries riches en limons ont une valeur de K élevé Foster et *al.* (2002). En effet, les sols argileux ont une valeur de K faible car ils sont résistants au détachement grâce aux forces de LONDON-VAN-DEER WAALS et des propriétés des argiles (Morel, 1989). Les sols sableux s'exposent moins au transport par le ruissellement à cause de leur perméabilité, mais sont sensibles au détachement. Les loams sont un mélange des deux précédents, ils sont moyennement résistants aux détachements et produisent un ruissellement modéré. Finalement, les sols limoneux sont sensibles à l' « érodibilité » puisqu'ils se détachent facilement, produisent beaucoup de ruissellement et sont caractérisés par des sédiments fins pouvant être transportés par celui-ci. Par ailleurs, la pierrosité est une autre variable du facteur K. En effet, les graviers d'un minimum de 5 millimètres ont la capacité de réduire l'érosion Foster et *al.* (2002) comme une couverture de protection du sol (on peut parler de la technique du mulch).

Le profil du sol joue également un rôle dans l' « érodibilité ». Celui-ci peut montrer des régimes hydriques qui feront varier le ruissellement. Foster et *al.* (2002) définissent les

groupes hydrologiques comme des index de ruissellement ou dit autrement, le reflet des conditions de drainage des sols. Il faut regarder le drainage de surface et le drainage en profondeur. Pour bien visualiser le concept, prenons l'exemple d'un sol sableux en surface, argileux en profondeur et se situant dans un bas-fond. La position et la couche d'argile (agissant comme une nappe d'eau perchée en saisons des pluies) montre un groupe hydrologique élevé (à grand ruissellement) en profondeur. Par contre, le sable étant perméable montre un groupe hydrologique bas (ruissellement presque nul) en surface.

L'« érodibilité » des sols est aussi fonction des techniques culturales. La préparation du lit de semence et les sarclages superficiels influencent l'état de la surface du sol. Par le fait même, la structure est changée et ses qualités physiques (comme la capacité d'infiltration) aussi. Compte tenu de ce qui précède, la structure fait varier le facteur K et les techniques culturales aussi. En effet, quand un sol est travaillé, l'indice d'« érodibilité » augmente significativement au fil des années ($K = 0,03$ à $0,12-0,18$) Roose et Sarrailh (1989-90), car le taux d'éléments grossiers et les agglomérats stables reste plus faible.

Dans un autre ordre d'idées, le facteur K évolue également dans le temps. En effet, les premières années d'une évolution régressive d'un sol (1 à 3 ans) les valeurs de K sont généralement faibles. Malheureusement, la sensibilité croît à mesure que le réseau racinaire primitif (antérieur) et les matières organiques se dégradent (25 à 50 % du carbone organique sont généralement perdus en 2 ans en régions tropicales), Roose et Sarrailh (1989-90). Vers la troisième ou quatrième année, dépendamment des conditions initiales d'évolution des matières organiques du sol, l'indice d'érosivité grimpe jusqu'à la valeur maximale et oscille. Ensuite, après cinq à six années, l'indice d'érodibilité diminue parce que l'horizon humifère a été décapé ou bien mélangé au sous-sol plus graveleux ou enrichi en argile, en fer ou en calcaire (Roose et Sarrailh, 1989-90).

Roose (1994) a quantifié le facteur K en Afrique de l'ouest : les sols ferrallitiques ($K = 0,01$ à $0,2$) sont généralement plus stables que les vertisols et les sols bruns tropicaux ($K = 0,1$ à $0,2$) et surtout que les sols ferrugineux lessivés ($K = 0,2$ à $0,3$). Tous les sols gravillonnaires dès la surface sont stables ($K < 0,05$) (effet mulch). D'où une classification

des sols selon leur érodibilité (Bollinne et Rosseau, 1978 cité dans Roose et Sarrailh, 1989-90) : $K < 0,1$ Sols très résistants à l'érosion; $0,10$ à $0,25$ Sols assez résistants à l'érosion $0,25$ à $0,35$ Sols moyennement sensibles à l'érosion; $0,35$ à $0,45$ Sols assez sensibles à l'érosion; $> 0,45$ Sols très sensibles à l'érosion.

Dans ces derniers paragraphes, nous avons parlé d'averses, de ruissellement, de régimes hydriques des sols et de leurs résistances face à l'attaque de l'eau. Alors, il faut se demander qu'est-ce qui fait varier la vitesse et l'énergie de la nappe d'eau ? D'où l'étude du facteur topographique.

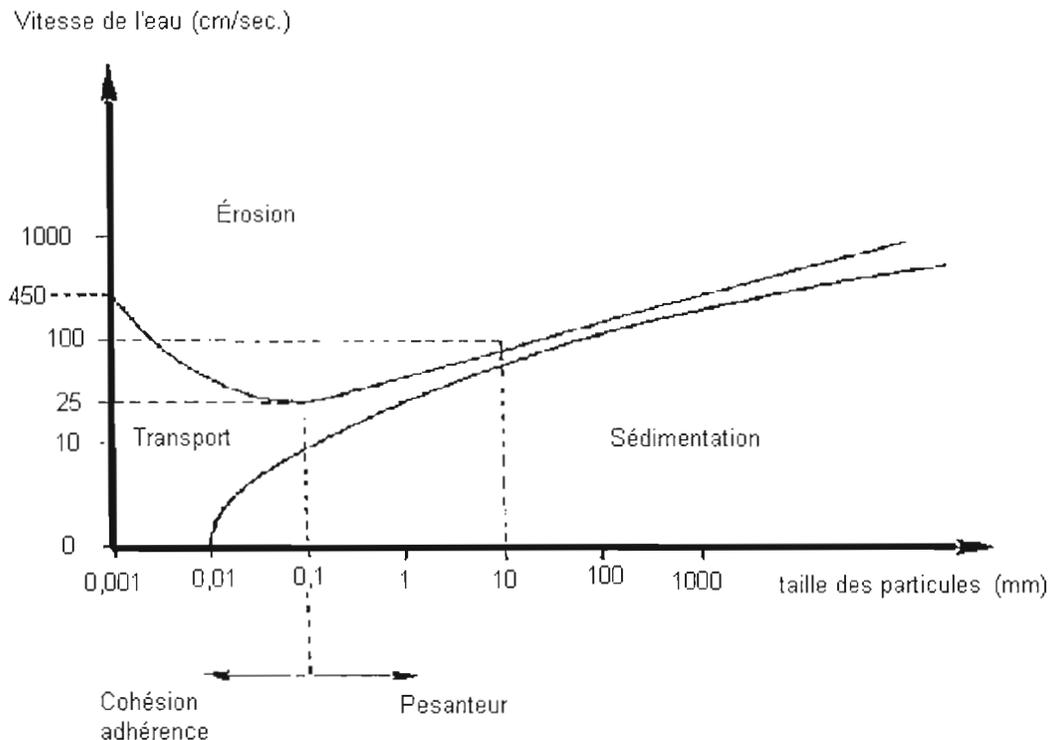
1.2.2 Facteur pente (SL) : la longueur ininterrompue de la pente (L) et son degré d'inclinaison (S)

Dans le but de faciliter la compréhension du processus d'érosion, prenons pour acquis qu'il y a une formation d'une nappe de ruissellement lorsqu'il y a incapacité d'infiltration du sol. Pour connaître les variables des paramètres intrinsèques du sol qui régissent le ruissellement voir Collinet (1988). La nappe d'eau ruisselant sur les sols va causer une érosion. Elle détachera les particules de sol pour les transporter et les déposer. Comme on le voit sur la figure 1.1 la nappe d'eau doit avoir une certaine vitesse (v) pour pouvoir éroder, transporter ou déposer des particules de sols de taille (ϕ). Par exemple, quand ϕ est égale à $0,001$ mm la nappe d'eau érode les particules lorsqu'elle atteint une vitesse de 450 cm/sec. Si la vitesse diminue, même jusqu'à être nulle, la nappe ne peut que transporter les particules déjà érodées.

Le diagramme de Hjulström nous apporte des informations très importantes : les matériaux argileux sont plus cohérents. Les matériaux plus grossiers ont des particules lourdes qui exigent une vitesse supérieure du ruissellement. On peut aussi remarquer que les matériaux ne peuvent être érodés tant que les écoulements s'effectuent à une vitesse plus petite que 25 cm/seconde. De plus, le transport des particules fines argileuses et limoneuses s'effectue facilement, même pour de faibles vitesses. C'est ce qui explique l'érosion sélective

que nous expliquerons plus loin dans ce chapitre. À partir du fait que la vitesse de ruissellement détermine en partie l'érosion, on peut supposer que le degré d'inclinaison et la longueur de la pente pourraient faire varier la vitesse de ruissellement.

Figure 1.1 : Diagramme de Hjulström, 1939. Modifié de Roose, 1994.



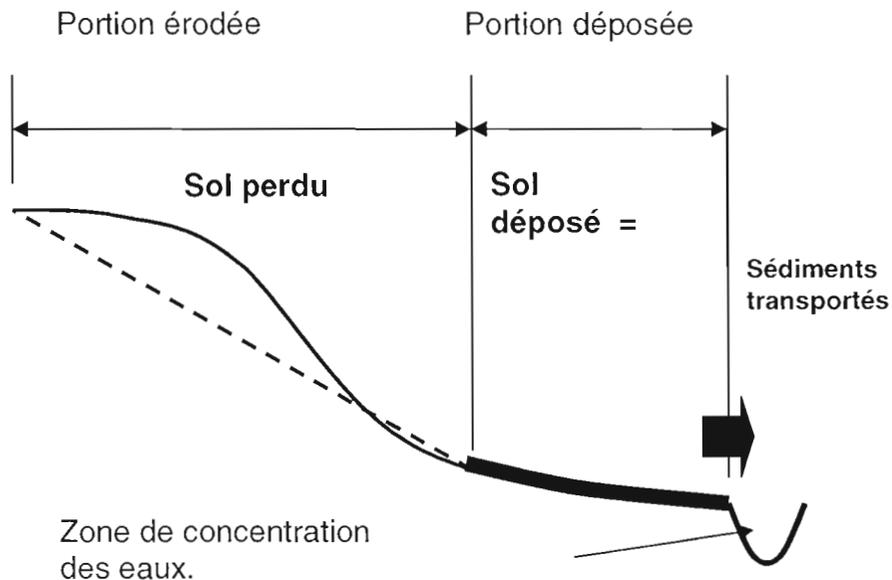
Aux Etats-Unis, Wischmeier et Smith (1978) ont prouvé que sur des parcelles soumises aux pluies naturelles durant 17 ans et de pente de 3 à 18 %, une équation de calcul de l'érosion utilisant l'inclinaison et la pente:

$$E = \sqrt{L} / 100 (0.76 + 0.53 S + 0.076 S^2)$$

Dans cette formule les symboles sont : E (l'érosion (t/ha)), S (inclinaison de la pente (%)) et L (longueur de la pente (pied)). D'autres études ont été faites en Afrique de l'Ouest et ont montré que l'inclinaison de la pente était plus importante que la longueur de la pente dont l'influence est intimement liée à l'état de la surface du sol (en particulier sa rugosité). Par contre, l'érosion en nappe quant à elle peut être quant à elle très néfaste sur de longues pentes

à petite inclinaison Roose (1994). Par ailleurs, la forme de la pente régie le mode d'érosion et de transport des sédiments comme le montre la figure 1.2.

Figure 1.2 : Pente de type complexe (profil convexe-concave), adapté de Foster *et al.* (2002).



Le facteur (SL) varie de 0,1 à 5 (Roose, 1994) dans les situations les plus fréquentes de culture en Afrique de l'Ouest. L'effet des gouttes de pluies et de la nappe sur le sol peut aussi varier en fonction d'un autre facteur, celui du couvert végétal qui se traduit par l'utilisation du sol et le mode de culture.

1.2.3 Facteur couvert végétal (C) : qui se traduit par l'utilisation du sol et le mode de culture

Ce facteur est très important. La végétation représente le couvert végétal du sol. Celle-ci agit comme toit qui protège le sol en réduisant la destruction des agglomérats par l'énergie cinétique des gouttes de pluies. La végétation agit également comme facteur d'infiltration de l'eau ce qui réduit le ruissellement et aide la structure du sol à mieux se

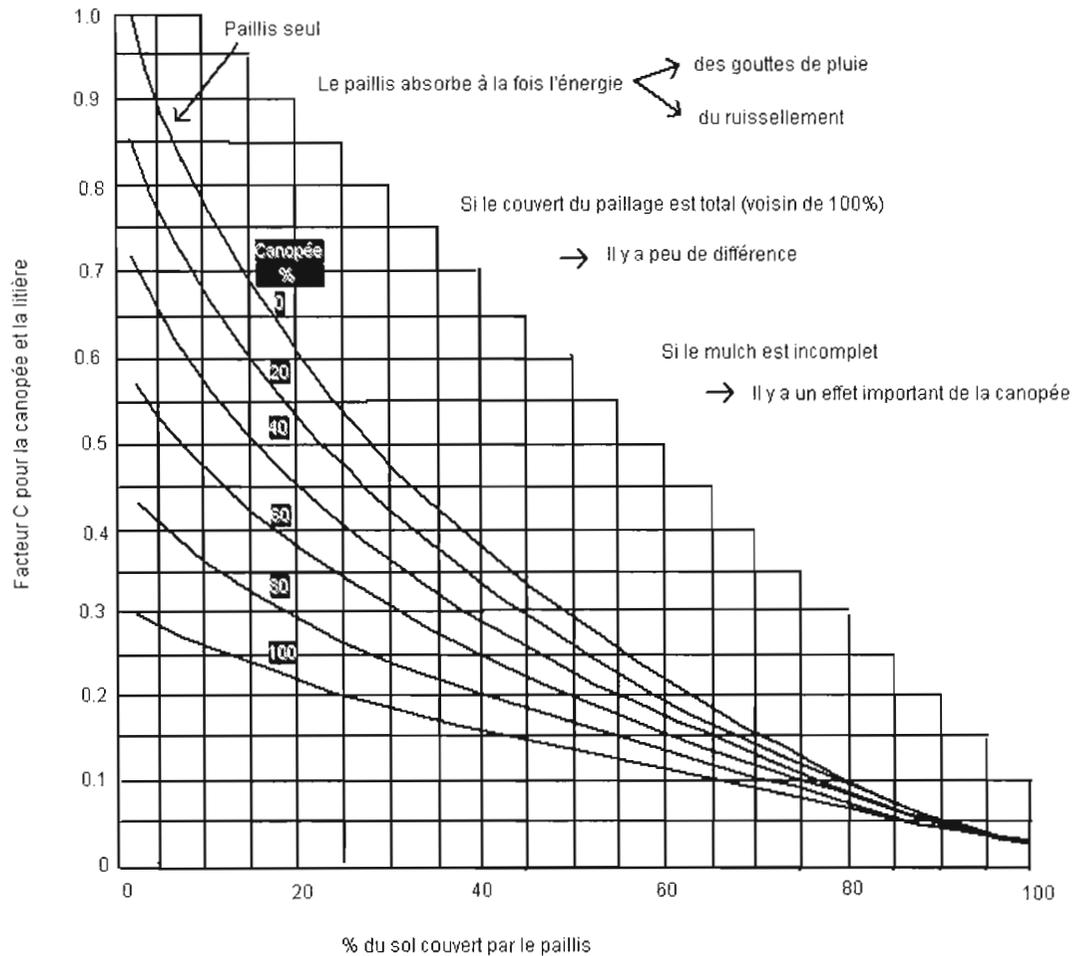
protéger contre le détachement. Bref, le facteur (C) fait varier les facteurs R et K selon l'utilisation du sol et le mode de culture.

Pour connaître l'impact du facteur (C), il faut connaître ses variables. La canopée va agir sur l'interception des gouttes de pluie. Comme nous avons vu dans la partie de « l'érosivité », l'énergie des gouttes de pluie va dépendre de la vitesse (donc de la hauteur qu'elles tombent), du vent et du diamètre. Donc, le moyen qu'a la canopée pour réduire la vitesse est de diminuer la hauteur de chute des gouttes. En parcourant une distance de dix mètres par rapport au sol la goutte atteint 90% de sa vitesse. Celle-ci peut être réduite par la canopée selon sa densité, sa hauteur et sa forme. Par ailleurs, la canopée va aussi capter de l'eau qui à cause de l'évapotranspiration n'ira jamais augmenter la nappe d'eau qui ruisselle (Foster et *al.* 2002). De plus, les tiges de la végétation agissent comme ralentisseur de la charge hydraulique.

L'autre variable est le couvert au sol, le paillis ou la litière. C'est tout le matériel qui est en contact avec le sol, qui intercepte les gouttes de pluie et celles tombant de la canopée. Pour en nommer que quelques uns, il y a les fragments de roches, les résidus de cultures, la litière végétale, le compost et le fumier (Foster et *al.* 2002). Comme le montre Wishmeier et Smith (1978) à la figure 1.3, le paillis a un grand effet sur l'érosion.

En effet, le paillis va absorber l'énergie des gouttes de pluie, éviter le détachement du sol. Selon Roose (1994), on constate que l'effet de la litière (paillis) sur l'érosion est extrêmement rapide et efficace si elle est bien utilisée. Sur une surface de sol défini, Roose (1994), arrive aux conclusions que si l'on couvre 20 %, on réduit l'érosion de 40 %. Si le paillage couvre 40 % du terrain, on réduit l'érosion de 60 % et si c'est de l'ordre de 80 %, on réduit l'érosion au dixième de celle que l'on peut trouver sur sol nu.

Figure 1.3 : Effet combiné d'une litière et d'une canopée lorsque la hauteur moyenne de chute des gouttes de pluie ne dépasse pas 1 mètre (modifié de Wishmeier et Smith, 1978).



Observons maintenant la variable de rugosité de la surface du sol. La rugosité est créée par la structure du sol présent et/ou par une opération quelconque. Elle se distribue selon des formes en pics et dépressions qui réduisent l'érosion. Dans les dépressions, le transport par le ruissellement est moindre (Foster et al. 2002). L'alternance de points hauts et bas de ce microrelief réduit l'orientation privilégiée du ruissellement. Une bonne structure en motte va réduire le détachement et favoriser l'infiltration (Foster et al. 2002).

Les autres variables sont la hauteur des billons, la biomasse du sol, la consolidation du sol et les antécédents de l'humidité d'un sol. Par exemple, la hauteur des billons ralentit le

ruissellement s'ils sont perpendiculaires à la pente la plus forte. Selon Breman, Sissoko et *al.* (1998), les options choisies de lutte contre le ruissellement pour des cultures produisent en moyenne 1.3 fois plus grâce au billonnage. Cette méthode optimise l'utilisation de l'azote et du phosphore. Ces mêmes auteurs montrent les nombreux avantages des labours : augmentation de l'infiltration de l'eau, la réduction du ruissellement et de l'érosion, l'augmentation de la capacité de stockage en eau du sol, la réduction des pertes d'eau par évaporation, l'amélioration de la porosité du sol, concentre la fertilité et la MO, stimule la croissance et l'établissement des plantules. Par contre, les labours sont insuffisants sur des sols sensibles au compactage et à l'encroûtement. Donc, il est nécessaire de combiner deux facteurs : le labour avec le mulching. Cet assemblage contribue à réduire et stabiliser la température du sol tout en favorisant le drainage de l'eau en profondeur (Breman et *al.* 1998).

Globalement, le facteur (C) varie de 1 sur sol nu à $1/1000^e$ sous forêt, $1/100^e$ sous prairies et plantes de couverture, 1 à $9/10^e$ sous cultures sarclées. Le tableau suivant donne un aperçu des ordres de grandeur de ce facteur.

Tableau 1.1 : Facteur couvert végétal et techniques culturales (C) pour diverses cultures en Afrique occidentale (Roose, 1994)

| | C moyen annuelle | |
|--|------------------|-------|
| | min | max |
| Sol nu | | 1 |
| Forêt, fourré dense, culture bien paillée | | 0,001 |
| Savane et prairie en bon état | | 0,01 |
| Savane ou prairie brûlée ou surpâturée | | 0,1 |
| Plante de couverture à développement lent ou plantation tardive, première année | 0,3 | 0,8 |
| Plante de couverture à développement rapide ou plantation hâtive, première année | 0,01 | 0,1 |
| Plante de couverture à développement lent ou plantation tardive, deuxième année | 0,01 | 0,1 |
| Maïs, mil, sorgho (en fonction de rendements) | 0,4 | 0,9 |
| Riz de plateau en culture intensive | 0,1 | 0,2 |
| Coton, tabac en deuxième cycle | 0,5 | 0,7 |
| Arachide (en fonction du rendement et de la date de plantation) | 0,4 | 0,8 |
| Niébé rampant | | 0,3 |
| Manioc, première année et igname (en fonction de la date de plantation) | 0,2 | 0,8 |
| Palmier, hévéa, café, cacao avec plantes de couverture | 0,001 | 0,3 |
| Ananas à plat (en fonction de la pente) plantation hâtive | 0,001 | 0,3 |
| - avec résidus brûlés | 0,2 | 0,5 |
| - avec résidus enfouis | 0,2 | 0,3 |
| - avec résidus en surface | 0,001 | 0,01 |
| Ananas sur billons cloisonnés (pente 7 %), plantation tardive | | 0,1 |

Bref, le facteur du couvert végétal est un concept en-soi qui intègre de bonnes pratiques culturales pour protéger le sol contre l'érosion. Par ailleurs, pour faire une agriculture durable, il faut quelquefois ajouter des pratiques de conservation à nos pratiques culturales même si celles-ci sont les plus optimisées possible.

1.2.4 Facteurs pratiques de conservation (P) : les mesures de protection éventuellement mises en œuvre

Les pratiques de conservation sont les dispositifs anti-érosifs que l'on ajoute à son champ pour réduire l'érosion en nappe. Il peut y avoir les cordons pierreux, les haies vives, les micro barrages de diversion ou micro barrages perméables, les terrasses, les cultures et plantations en courbes de niveau, la rotation et fumure, les bandes alternées, les fossés d'infiltration, Zaïr, demi-lunes, etc. (Roose, 1994; Roose, 1986; Smolikowski et al. 2001; Arrignon, 1987; Breman, Sissoko et al. 1998; Mietton, 1986; Dugué et al. 1993). La plupart de ces pratiques ont comme objectif de réduire l'érosion en contrôlant la direction du ruissellement ou en le réduisant. De plus, les mesures anti-érosives visent l'augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs du sol et de l'eau et agissent sur les caractéristiques physiques du sol (Breman, Sissoko et al. 1998). Ces pratiques sont en théorie très efficaces. Par contre, le milieu d'utilisation et le contexte culturel doivent être pris en compte lors de la mise en place de ces dispositifs anti-érosifs. La mentalité des GCES (Roose, 1994) doit à notre avis être adoptée pour l'implantation de projets. De plus, des études montrent certaines pratiques mieux adaptées pour l'Afrique de l'Ouest (Roose, 1986). Par contre, elles ne sont pas souvent accompagnées de restauration de la fertilité des sols (MO, mulch, plantations, haies vives etc). (Breman et al. 1998). De plus, il faut faire attention aux mesures anti-érosives (haies vives, cordons, digues, etc.) parce que certains auteurs pensent que ces mesures qui favorisent l'infiltration de l'eau peuvent causer un lessivage des éléments nutritifs.

Bref, les pratiques de conservation sont efficaces selon le milieu physique et social. Tous ces facteurs de RUSLE2 vont faire varier les impacts de l'érosion en nappe du sol. Par ailleurs, d'autres facteurs importants ne sont pas tenus en compte et sont, d'après plusieurs auteurs, (Roose, 1994; Breman et al. 1998; Casenave et Valentin, 1989) des processus intrinsèques de l'érosion en nappe. Ce sont l'érosion sélective, les croûtes superficiels et l'hydromorphie.

1.2.5 Érosion sélective : l'appauvrissement en particules fines

L'érosion sélective apparaît comme un problème fantôme. On ne peut l'observer facilement et on ne remarque pas directement ses conséquences pourtant très néfastes.

L'érosion sélective est particulière à l'érosion en nappe. La sélectivité de l'érosion s'explique par la capacité de la nappe d'eau (le ruissellement) à transporter des sédiments. Puisqu'elle n'a pas une grande capacité de charge ni une grande vitesse, (à cause de la rugosité de la surface du sol et des autres facteurs énumérés plus haut) elle ne peut transporter des sédiments trop lourds. Ce sont donc les argiles, les limons et la matière organique qui sont érodés (fig. 1.1). Les sables, quant à eux, rampent à la surface du sol et forment les sols colluviaux en bas de versant. De plus, la nappe agit à la surface du sol et érode les sédiments présents. Puisque les sols des savanes de l'Afrique de l'Ouest accumulent la matière organique et les nutriments dans les premiers centimètres à la surface du sol (Roose, 1994) leur fertilité est alors diminuée par ce processus. Le battage de la surface du sol par les gouttes de pluies et le ruissellement font du ravage. En effet, la squelettisation ou l'enrichissement en sable des horizons de surface par érosion sélective des particules fines, des matières organiques ou des nutriments montre une dynamique particulière. Suite à la battance des pluies qui tasse le sol, casse les agrégats, arrache des particules de sols, on peut remarquer sur des sols sensibles des formations environnantes à ce processus des pellicules de battance et des croûtes de sédimentation favorisant le ruissellement (Roose (1994)). Selon ce dernier, plusieurs effets de l'érosion sélective ont été vérifiés : les pertes en nutriments croissent parallèlement au volume ruisselé et érodé; les teneurs en nutriments décroissent moins vite que n'augmentent les volumes de terre et d'eau déplacés, on retrouve proportionnellement bien plus d'éléments nutritifs dans les eaux et les terres érodées que dans le sol en place (pour le carbone, azote, phosphore, l'argile, les limons jusqu'à (50 microns) et encore plus flagrant pour les bases échangeables (14 à 18 fois plus sous culture). De plus, la sélectivité de l'érosion en nappe est d'autant plus marquée que le volume érodé est faible et que l'on passe de la forêt à la culture et de la culture au sol nu. Le sol perdu par érosion est 2.5 fois plus riche en éléments nutritifs que le sol en place. Ce qui nous laisse croire que même une petite quantité de terre érodée peut causer une baisse considérable de rendement de

culture (Breman et al. 1998). Dans le tableau 1.2, il est possible d'observer les conséquences de l'érosion sélective dans un milieu donné.

Tableau 1.2 : Pertes sélectives par érosion en nappe sur une pente de 7 % à Adiopodoumé en fonction du couvert végétal, Côte d'Ivoire (Roose, 1994)

| Caractéristiques du sol / Facteur C | Érosion totale (kg/ha/an) | | | Indice de sélectivité par rapport au sol en place (10 cm) | | |
|--|---------------------------|---------|--------|--|---------|--------|
| | Forêt | Culture | Sol nu | Forêt | Culture | Sol nu |
| Carbone total | 26,4 | 855,6 | 2 725 | 12,8 | 2,1 | 1,5 |
| Azote total | 3,5 | 98,3 | 259 | 22,5 | 3,1 | 1,9 |
| Phosphore total | 0,5 | 28,5 | 111 | 6,6 | 1,4 | 1,3 |
| CaO échangeable | 3,0 | 49,9 | 113 | 492 | 18,5 | 9,7 |
| MgO échangeable | 2,2 | 29,0 | 45 | 327 | 14,1 | 5,1 |
| K ₂ O échangeable | 1,2 | 17,7 | 35 | 550 | 2,4 | 1,1 |
| Na ₂ O échangeable | 0,6 | 9,5 | 15 | 849 | 15,4 | 5,6 |
| CaO total | 3,7 | 57,1 | 139 | 216 | 8,8 | 5,0 |
| MgO total | 2,3 | 39,0 | 78 | 60 | 5,8 | 2,7 |
| K ₂ O total | 1,3 | 35,1 | 87 | 18 | 1,7 | 1,0 |
| Na ₂ O total | 0,6 | 12,6 | 27 | 49 | 3,2 | 1,6 |
| Argile 0-2 microns | 64,5 | 5 142 | 18 275 | 5,9 | 1,2 | 1,1 |
| Limons 2-50 microns | 33,8 | 2 179 | 7 115 | 7,7 | 2,5 | 1,9 |
| Sable fin 50-200 microns | 1,7 | 5 174 | 23 135 | 0,1 | 0,6 | 0,6 |
| Sable grossier 200-2000 | 0 | 19 305 | 89 375 | 0 | 0,9 | 0,9 |
| Érosion totale t/ha | 0,11 | 32 | 138 | | | |
| Ruissellement m ³ /ha | 210 | 5 250 | 6 300 | | | |

Dans ce tableau, nous pouvons voir les relations entre le type de sédiment (sable, limon, argile), le couvert végétal et les pertes quantitatives et qualitatives de l'érosion. En analysant les résultats de ce tableau, on remarque que les pertes quantitatives et qualitatives sont importantes à évaluer. En effet, la croissance des pertes chimiques est presque parallèle à celle des pertes en terre: elle est donc fonction inverse du couvert végétal. Par ailleurs, Roose (1994) a souligné que la migration du carbone et du phosphore se fait essentiellement

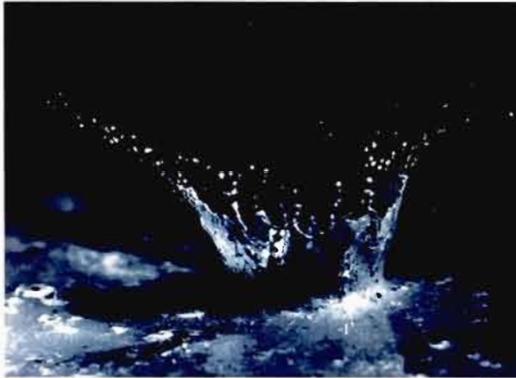
sous forme solide (terre de fond et suspension). Par contre, la migration de l'azote, des bases totales et surtout des bases assimilables, s'effectue exclusivement en solution.

Bref, l'érosion en nappe, par sa sélectivité, a un effet direct sur la fertilité des sols. Puisque cette fertilité est présente à la surface du sol et que l'érosion en nappe est un processus qui se développe à ce niveau, il est nécessaire de s'attarder aux croûtes de battance.

1.2.6 Les croûtes de battance

Les croûtes de battance commencent le processus d'érosion pluviale du sol par une dégradation de la structure de surface du sol. Les gouttes de pluies provoquent la formation d'une croûte épaisse de un à deux centimètres. La rugosité de la surface du sol disparaît alors pour laisser place à une surface lisse ayant perdu sa perméabilité, ce qui favorise le ruissellement des pluies par rapport à l'infiltration (Duchaufour, 2001). Les processus de formation de croûtes de surface sont très bien expliqués Casenave et Valentin (1989). Une croûte se forme par l'action de plusieurs mécanismes qui agissent simultanément ou successivement dans le temps. Les phases au cours d'une pluie sont : la mobilisation des particules, leur arrachement, leur transport et leur dépôts. Puisque nous parlons de croûte de battance (causé par les impacts des gouttes de pluie), nous parlerons des mécanismes qui lui sont propre pour ne pas biaiser le processus de formation en mélangeant les mécanismes associés au ruissellement, aux vents, à la dessiccation ou à l'induration. La mobilisation des particules se divise en deux processus : la dispersion colloïdale et le fractionnement (Casenave et Valentin, 1989). La dispersion colloïdale s'explique par les chocs des gouttes de pluies qui favorisent la dispersion des argiles et de sa mise en suspension dans l'eau de rejaillissement ou de ruissellement. Le fractionnement est, quant à lui, la désagrégation (destruction des agrégats) par l'impact des gouttes de pluies. Dans la séquence logique des événements, les gouttes provoquent l'effet splash (rejaillissement, voir figure 1.4)

Figure 1.4: Effet splash (tiré de Foster et *al.* 2002).



Alors, les grains de sables, les fragments d'agrégats et les argiles dispersés sont projetés autour du lieu de l'impact. L'intensité de ce processus et la distance de projection dépendent de l'énergie cinétique des pluies, de la texture du matériau et de la pente (Casenave et Valentin, 1989). Ces mêmes auteurs croient que les particules ainsi déplacées se déposent au sol en participant plus ou moins rapidement au comblement de la porosité inter-agrégat, à l'épaississement et à l'extension de la croûte. La formation d'un niveau moins poreux qui réduit la porosité superficielle et qui favorise le ruissellement est ensuite créé par le tassement, conséquence de l'absorption partielle de l'énergie des gouttes de pluies à la surface du sol. L'énergie restante après la mobilisation et le transport des particules. Finalement, le ruissellement intervient et les processus d'arrachement, de transport et de dépôts viennent influencer la croûte superficielle (que nous n'appelons plus croûte de battance, mais croûte de ruissellement).

Quel est l'impact de ces croûtes en Afrique de l'Ouest? Premièrement, les sols ferrugineux tropicaux fortement représentés dans les savanes soudano-sahéliennes sont particulièrement sensibles à une dégradation physique de leur surface. Cette sensibilité est due à leurs caractéristiques structurales médiocres. Cette dégradation peut entraîner un dysfonctionnement hydrique avec les conséquences qu'il implique: limitation de l'infiltration, augmentation du ruissellement et engorgement superficiel (Blic et Some, 1997). En effet, en zone de savane sèche, les états de surface semblent déterminants pour l'hydrodynamique superficielle. Le pourcentage de couvert végétal, l'activité faunique et la

réorganisation superficielle suffisent à expliquer significativement le coefficient d'infiltration mesuré sous pluies simulées pour des zones où la pluviométrie est inférieure à 800 mm (Casenave et Valentin, 1989). Par ailleurs, la formation de croûtes de battance évolue dans le temps et dans l'espace. En effet, les croûtes qui provoquent le ruissellement n'ont pas la même dynamique si elles sont initialement humides ou pas (Le Bissonnais et *al.* 1989-90). Ce qui nous laisse croire que le même sol aura une érodibilité différente selon les régimes hydriques, non seulement dû à la zone climatique, mais aussi d'après leur situation dans la toposéquence.

Bref, les croûtes de battance ont de grandes répercussions sur l'érosion hydrique des sols. Une bonne connaissance des croûtes de surface et de leur disposition dans l'espace peut aider à mieux gérer et conserver l'eau disponible des terres. Alors, l'érosion en nappe pourrait être atténuée. Par contre, ce n'est pas seulement les croûtes qui ont un impact non négligeable sur le ruissellement et le régime hydrique, l'hydromorphie est un processus important.

1.2.7 Hydromorphie

Dans la dynamique d'évolution des sols tropicaux la problématique de l'hydromorphie est présente. Ce mécanisme se retrouve surtout dans la dynamique des bas-fonds (Roose, 1980), dans les vallées des grands fleuves de l'Afrique de l'Ouest (Di Vecchia et *al.* 2001). Le climat étant très agressif dans ces régions, le processus d'hydromorphie lors de la mise en culture est très rapide par rapport à l'altération normale (Roose, 1980). En effet, dans les bassins à drainage latéral dominant, le phénomène d'appauvrissement des sols est observable (Dabin, 1984-85).

L'hydromorphie est un processus lié aux conditions physico-chimiques de la station. C'est un processus de réduction ou de ségrégation locale du fer libre, par une saturation permanente ou temporaire des pores par de l'eau réductrice. Cette eau est le plus souvent représentée par une nappe d'eau soit temporaire (perchée), soit profonde et permanente. On distingue quatre types d'hydromorphie : temporaire de surface (pseudogley),

planosolisation, temporaire d'imbibition capillaire et profonde permanente (gley) (Duchaufour, 2001). Nous nous attarderons sur les deux premiers types cités étant donné qu'ils sont représentés dans la zone d'étude. Ceux-ci sont très bien expliqués par Duchaufour (2001). L'hydromorphie temporaire de surface est caractérisée par une nappe perchée qui cause un engorgement de l'horizon de surface dans la saison des pluies (hivernage). Ce qui produit une réduction et une mobilisation partielle du fer et du manganèse suivie de leur précipitation localisée sous forme de tache de rouille ou concrétions par réoxydation en saison sèche. La planosolisation est une forme particulière d'hydromorphie de surface. Elle est liée à un changement brutal de la texture du sol au contact de l'horizon E (albiqes) et Bt (argique). Il se produit alors un appauvrissement de surface par élimination de l'argile et du fer qui résulte souvent en une ferrolyse, provoquant ainsi une dégradation plus ou moins complète des argiles.

Lorsque l'on s'attarde au processus dans les vallées des grands fleuves (comme celui du Niger qui nous concerne), le rôle primordial de l'inondation dans la genèse des sols est modulé par la topographie. C'est elle qui commande la durée de la submersion et par conséquent, de la phase d'engorgement et d'anaérobiose des sols ou hydromorphie. La différenciation granulométrique des sols est caractérisée par une texture fine (argile) dans les cuvettes où il y a absence de courant qui provoque une décantation d'éléments très fins en suspension (sols hydromorphes du référentiel CPCS, Duchaufour, 2001). Tandis que sur le bourrelet de berge où le courant rapide lors de la crue est brutalement freiné, se déposent des sédiments grossiers à l'origine de la texture plus grossière comme le sable et le limon (Di Vecchia et *al.* 2001). On retrouve également l'hydromorphie temporaire sur les couvertures pédologiques moyennement acides sous climat contrasté à saison sèche marquée et principalement sur des sols ferrallitiques (Latham et *al.* 1984-1985). L'hydromorphie est également un agent de genèse des sols. Selon Boulet et *al.* (1982), les conditions d'hydromorphie favorisent la différenciation ferrugineuse dans la toposéquence et dans l'horizonation. Voici un exemple de processus de la relation entre les sols rouges ferrallitiques et les sols beiges ferrugineux dans la toposéquence montrée par les auteurs : un processus de la mobilisation du fer fixé sur la kaolinite sous l'effet d'une forte baisse de pH. Celle-ci est induite par l'ultra dessiccation qui provoque une forte polarisation de l'eau et un

taux de dissociation élevé. La kaolinite libérée se redistribue dans le profil. Il s'ensuit un allègement de la texture des horizons A et AB et la différenciation d'un horizon illuvial responsable d'une hydromorphie secondaire. Cette alternance de fortes dessiccations et humectations dues aux conditions climatiques provoque alors la formation de sol beige à partir du centre de l'interfluve où les possibilités de drainage externe sont les plus réduites et où se développe une hydromorphie sur des surfaces légèrement déprimées. L'évacuation de l'eau libre s'effectue dès lors latéralement selon des discontinuités correspondant à des failles et crée de petits thalwegs à écoulement sporadique (vallées latérales) Boulet et *al.* (1982). Par ailleurs, le régime hydrique le long des versants d'un bassin peut être régi par l'hydromorphie. Il peut y avoir une sorte d'érosion chimique du fait de la circulation latérale de l'eau dans les horizons superficiels (Dabin, 1984-85). Cette circulation latérale peut être plus ou moins accentuée suivant l'état structural des volumes pédologiques. Ce dernier auteur, donne un exemple provenant d'un bassin versant en Guyane où le drainage latéral est dominant. Le phénomène d'appauvrissement est observable par le fait que le sol de haut de pente est plus pauvre en carbone que le sol au deux tiers de pente et la texture de la couche supérieure devient uniformément sablo-argileuse. À partir de quarante centimètres de profondeur, on observe une couche compactée qui diminue le drainage vertical, accentue le drainage latéral et provoque des phénomènes d'hydromorphie superficielle.

Bref, le lessivage semble être très important dans les horizons qui montrent des indices d'hydromorphie. En fait, les flux augmentent légèrement, mais systématiquement, et il faut faire intervenir des phénomènes cumulatifs tel que le drainage oblique. Cette hypothèse est confirmée par l'observation des lames minces de l'ensemble de la toposéquence (ROOSE E. 1979).

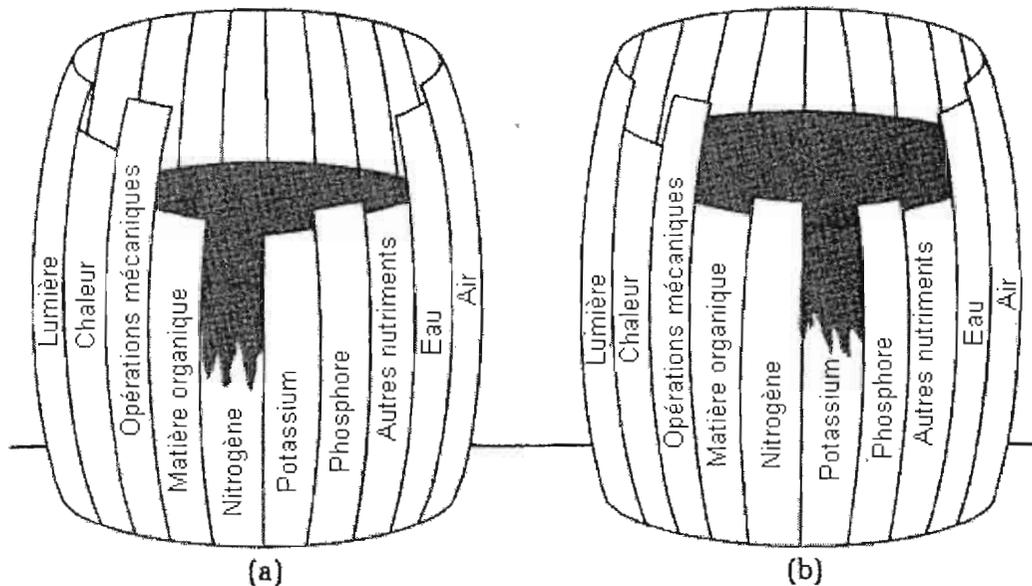
En conclusion, dans la partie 1.1 nous avons parlé de l'érosion en nappe et des processus qui la régissent. Nous avons également observé que ce type d'érosion provoque des pertes quantitatives (perte en sol) et qualitatives (perte en nutriments) des sols. C'est pour cette raison que la partie 1.2 est consacrée à la dynamique des nutriments.

1.3 La dynamique des nutriments

Dans cette partie du premier chapitre, il sera à l'étude la dynamique des nutriments dans les sols tropicaux. La connaissance de celle-ci permet de pouvoir prédire et contrôler les bilans d'éléments nutritifs pour les maintenir positifs. L'objectif du développement durable en milieu tropical et sub-tropical n'est pas que chimère, il faut conserver les sols et restaurer leur fertilité physique et chimique. La capacité du sol à supporter les cultures est directement proportionnelle à la gestion de celui-ci. Le plus grand perturbateur des sols est nul autre que l'homo sapien. Il faut donc adopter une gestion durable des sols en respectant la loi des bilans. C'est pour cette raison que nous verrons la dynamique des éléments problématiques de ces sols. Comme nous l'avons vu dans les paragraphes qui précèdent, l'érosion en nappe a un grand impact sur les nutriments, et dans notre cas sur la matière organique, l'azote, le phosphore, l'aluminium et les bases comme le Ca, Mg, K.

Un concept qui est important dans la dynamique des nutriments, c'est la loi du minimum (fig. 1.5). C'est-à-dire que certains éléments nutritifs des sols peuvent limiter la capacité de production du système sol. Comme on le voit dans la figure 1.5: le P (phosphore) et le N (azote) sont représentés par des lamelles de bois du baril qui sont les plus courtes. Alors, si l'on veut remplir le baril d'eau (l'eau représentant la capacité de production du sol), il faudra arrêter de le remplir (arrêt de la production du sol) où les lamelles sont plus basses. Sinon l'eau s'écoulera et la quantité d'eau dans le baril restera la même. Prenons l'exemple de sols où l'azote est le facteur limitant soit naturellement ou par évolution régressive suite à une exploitation de l'homme. Alors, si le sol est limité, il ne pourra pas produire plus que ce que l'azote présent peut fournir. Le sol aura donc une capacité de production minimale si l'on ne pratique aucune méthode d'amélioration, d'amendement ou de fertilisation du sol. Conséquemment, il faut étudier la dynamique de certains nutriments limitatifs des sols si l'on veut faire une agriculture durable.

Figure 1.5 : Loi du minimum (adapté de Brandy, 1984; cité dans Jones et Jacobsens, 2001)



1.3.0 Sol d'altération géochimique (climat tropical)

L'origine du processus d'altération géochimique, un processus fondamental de la pédogenèse, est la combinaison du milieu au facteur temps. Selon Duchaufour (2001), l'altération est une hydrolyse forte ou totale dans laquelle la matière organique n'intervient pas. Cette pédogenèse caractérise les climats chauds. Ce même auteurs a noté plusieurs propriétés communes aux sols localisés dans les régions chaudes: altération de type géochimique (fer libre sur fer total est habituellement supérieur à 60%) liée à un cycle long, teinte vive donnée par la forte concentration en fer bien cristallisé. On les appelle souvent « sols riche en sesquioxydes ». Ce sont des sols que l'on retrouve dans des zones climatiques intertropicales et subtropicales. Dans ces milieux, le facteur climat et matériau interfèrent avec le facteur temps en accélérant ou en freinant la vitesse du processus d'altération. Ces sols se nomment les sols fersiallitiques, les sols ferrugineux et les sols ferralitiques. L'altération augmente intégralement du premier au troisième. La capacité d'échange des argiles diminue du premier au troisième à cause de l'altération de plus en plus poussée, de la néoformation des argiles, de la perte en silices et en bases (Duchaufour, 2001).

1.3.1 Dynamique de la matière organique (M.O.) dans les sols tropicaux

Les sols tropicaux du Mali ont des taux de concentration en matière organique les plus bas connus (Breman et *al.* 1998). Étant donné que la M.O. détermine largement les propriétés physico-chimiques des sols comme la capacité d'échanger les bases et le pH, on peut affirmer que la minéralisation de la M.O. influence directement la nutrition de la végétation. (PIERI 1989, tiré de Breman et *al.* 1998). C'est donc un indice de pauvreté des sols au Mali. Alors, comment évolue cette matière dans les sols.

Il y a trois « types » de matière organique : la M.O. fraîche, les mor et les mull. La matière organique fraîchement constituée de débris végétaux et animaux de toutes natures qui se superposent au sol minéral (Duchaufour, 2001). Elle s'oppose à l'humus qui est une fraction organique colloïdale plus ou moins foncée et qui contracte des liens étroits avec l'argile et les oxydes libres. L'humus est le résultat de l'humification, une réorganisation de la matière organique fraîche au lieu de subir la minéralisation primaire. Les humus sont divisés en deux types : actif (mull) et peu actif (moder). Les composés humiques se minéralisent aussi, mais plus lentement que la matière organique fraîche. C'est ce qu'on appelle la minéralisation secondaire. L'humus joue un rôle considérable dans l'édification des structures du sol et dans l'orientation de la pédogénèse par ces associations organo-minérales (Duchaufour, 2001). D'une part, la matière organique améliore les caractéristiques physiques et chimiques d'un sol et d'autre part, fournit l'azote nécessaire aux plantes suite à la minéralisation. En s'humifiant, la matière organique donne des complexes colloïdaux humiques qui s'associent avec la matière minérale (particulièrement l'argile) pour constituer le complexe argilo-humique (ou complexe absorbant) ayant la propriété de retenir les cations provenant de la solution du sol (Di Vecchia et *al.* 2001). Donc, il faut connaître les processus de « turnover » de la matière organique (le renouvellement de l'humus) et de sa stabilisation pour conserver une bonne structure et une bonne orientation pédogénique au sol.

Prenons le cas d'un apport déterminé de litière où l'humus présent est actif (mull). Le « turnover » sera rapide, et donc le stock d'humus incorporé au sol restera faible étant donné le taux de minéralisation annuelle élevé. On remarque le contraire dans le cas d'un humus peu actif: « turnover » lent, minéralisation lente et le stock d'humus incorporé

beaucoup plus élevé (Duchaufour, 2001). Les agents de l'humification sont : les bactéries, les actinomycètes, les champignons et la faune du sol. Il faut noter que les bactéries interviennent dans les processus d'oxydo-réduction pour orienter la pédogenèse. Pour n'en nommer que quelques-unes il y a les bactéries du cycles de l'azote (*nitrosomonas*, *nitrobacter*, *Thiobacillus denitrificans*), celles du cycle du soufre (*Desulfovibrio*, *Thiobacillus*) et celles du cycle du fer (groupe des *ferro-bactéries*). Par ailleurs, la stabilité physico-chimique de l'humus dans les agrégats dépend de trois facteurs : la nature labile ou « récalcitrante » des composés organiques, la localisation du composé organique dans l'agrégat à l'égard des agressions et le milieu minéral (Duchaufour, 2001).

En milieu tropical, la M.O. dans les sols du climat soudano-sahélien se distribue comme suit : 2 g/Kg dans les sols sablonneux, 4 g/Kg dans les limoneux, 8 g/Kg dans les argileux (Breman et al. 1998). Ces auteurs ont remarqué que la M.O. dans l'argile est plus stable tandis que dans le sable elle se décompose rapidement. Pour la stabilité de la structure des sols, on peut parler de la formule du seuil critique de la M.O. Seuil critique : $M.O. (g/kg) = 0.05 * (\%argile + \%limon)$ (Breman et al. 1998). La formule sert à définir la stabilité de la structure du sol face à un seuil critique de la teneur en M.O. Bien que les rendements des cultures ne soient pas directement liés aux taux de matière organique du sol, si on dépasse certains seuils (seuil critique < 0,07), la structure s'effondre, le ruissellement et l'érosion s'accroissent, l'enracinement est moins efficace et les nutriments sont moins accessibles (Roose, 1994). Si le taux de M.O. est plus petit que le seuil, il y a immobilisation de l'N et du P et le coefficient d'utilisation d'engrais est réduit (nutriments ne sont pas disponibles pour les végétaux (Breman et al. 1998). Par ailleurs, la M.O. stable est proportionnelle à la teneur en argile, elle varie donc selon le type d'argile (kaolinite ou smectite (gonflant)) (Breman et al. 1998). Or, en zone tropicale, sur les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux à kaolinite, les matières organiques du sol jouent un rôle majeur dans la protection de la structure du sol et de la capacité de stockage de l'eau et des nutriments. L'argile kaolinite n'ayant qu'une capacité d'échange de cation de 14 milliéquivalents par 100 grammes, n'apporte que 1 à 2 méq. dans les horizons colonisés par les racines ($A + L \leq 20 \%$): l'humus par contre, peut fixer jusqu'à 250 méq. par 100 g (Roose, 1994).

Dans le cas où la matière organique est instable et que le milieu subit une perte de M.O., il y aura alors plusieurs conséquences sur les caractères physico-chimiques du sol. On remarquera une diminution sensible de la porosité (surtout la macroporosité) : naissance d'une pellicule de battance en surface, compaction des horizons profonds, création d'une discontinuité texturale, porale et hydraulique à la base de l'horizon labouré, perte continue et régulière des bases (surtout Ca et parfois K), diminution de la capacité de stockage de l'eau utile et des éléments nutritifs et réduction du profil exploité par les racines à l'horizon ameubli artificiellement (15 à 25 cm) (Roose, 1980). Il faut donc conserver la M.O. même lors de la mise en culture, mais ceci reste un problème en Afrique de l'Ouest. En général, nous pouvons remarquer une chute très rapide du taux de matières organiques du sol (20 à 60% du stock initial) durant la première année liée essentiellement au mode plus ou moins brutal de défrichage et de préparation du sol à la culture (Roose, 1994).

Plusieurs auteurs ont trouvé que les teneurs en M.O. des horizons superficiels des sols ferrugineux tropicaux dépendent surtout de la texture et que l'effet du climat peut être considéré comme secondaire. En effet, selon Feller et *al.* (1991), les teneurs en M.O. des horizons de surface des sols ferrugineux et ferrallitiques bien drainés et sous climats chauds ($T > 20^{\circ} \text{C}$) étudiés dans cette recherche sont essentiellement dépendantes de la texture du sol pour une gamme de pluviométrie comprise entre 600 et 3 000 mm par an. Les résultats de ces auteurs sont évidents. Premièrement, les variations des teneurs en carbone total avec la mise en culture sont d'autant plus importantes que le sol est plus argileux. Ensuite, concernant les différentes fractions, ils constatent que pour des sols sableux, la diminution des stocks de carbone est due essentiellement à celle des débris végétaux (20-2 000 μm), deuxièmement à la fraction limoneuse (2-20 μm) et assez peu dans la fraction argileuse (0-2 μm). Pour les sols sablo-argileux, la diminution est due essentiellement aux fractions limoneuse et argileuse. Quant aux sols argileux, la diminution est due prioritairement à la fraction argileuse, puis deuxièmement aux débris végétaux du sol et à la fraction limoneuse. La température et l'humidité du sol jouent eux aussi un rôle important dans la décomposition de la M.O. On suppose que dans toute la zone soudano-sahélienne la durée de l'hivernage suffit à décomposer la majorité des résidus.

Par ailleurs, les différents types d'humus peuvent jouer des rôles divergents : les acides fulviques maintiennent les colloïdes de la kaolinite à l'état dispersé et assurent leur migration, tandis que d'autres formes protègent la stabilité de la structure et ralentissent l'érosion (Roose, 1994). Si l'on veut restaurer les sols par des ajouts de M.O., ce n'est pas nécessairement une méthode de lutte anti-érosive. En effet, l'élévation de 1 % du taux de matières organiques du sol ne réduit que de 5 % l'érodibilité du sol (Wischmeier et al. 1972). Or, il faut des apports considérables de matières organiques évoluées pour augmenter de 1 % le taux de carbone de 10 cm de sol, c'est-à-dire 1 % de 1 500 tonnes de sol (Roose, 1994). L'amélioration de la résistance d'un sol à l'érosion pluviale est difficile à réaliser par l'augmentation du taux de matières organiques de l'horizon superficiel, puisqu'il faut compenser la minéralisation rapide en zone tropicale. De plus, il ne réduit les risques d'érosion que de 2 % sur les sols sableux ou argileux (ferrallitiques) et de 5 % sur les sols limoneux (ferrugineux). De surcroît, l'enfouissement brutal de 15 tonnes de paille peu évoluée entraîne une faim d'azote (fixé par la masse microbienne) et réduit les rendements. (Roose, 1994). Il vaut mieux prévoir un défrichement progressif et des techniques culturales préservant un fort taux de matières organiques, de mottes et de cailloux en surface.

Dans un autre ordre d'idées, une amélioration de la structure du sol semble être possible par l'apport de M.O. sous forme de racine. (Breman et al. 1998). L'usage d'engrais minéral devrait permettre de maintenir une production élevée de biomasse aérienne et racinaire, et par conséquent, une productivité du sol stable et satisfaisante (Roose et Sarrailh, 1989-90). Les racines superficielles fasciculées retiennent la surface de la terre, les racines pivotantes augmentent le volume de racines et occupent les macropores des sols ce qui réduit l'infiltration. Par contre, lorsqu'elles pourrissent, elles laissent des canaux stabilisés par la matière organique et favorisent l'infiltration. (Roose, 1994). Pour ce faire, on utilise généralement des légumineuses ayant un enracinement profond et étant capables de produire entre 4 et 8 tonnes de matière organique sèche/ha/an (Balasubramanian et Sekayange, 1992; Ndayizigiyé, 1992; König, 1992; cité dans Roose, 1994). Malgré ces apports de matière organique, il est nécessaire de prévoir un apport minéral complémentaire. D'une part, pour amender le milieu, amener le pH au-dessus de cinq dans le but de supprimer la toxicité aluminique et permettre aux légumineuses de se développer. D'autre part, pour compenser

les carences du sol en fournissant directement à la plante les nutriments dont elle a besoin, où elle en a besoin et au moment où elle est capable de les stocker. L'envers de la médaille des corrections directes des carences minérales du sol est qu'elles sont souvent trop coûteuses et peu raisonnables tant que le système de stockage du sol n'est pas amélioré (matière organique et taux d'argile) (Roose, 1994).

Pour plusieurs chercheurs, il est évident qu'aux niveaux de productions les plus intensifs, la qualité de la matière organique est plus élevée en terme de teneur en nutriments et, par conséquent, plus susceptible de se décomposer. En effet, il faut plus de matière organique pour maintenir la teneur cible en matière organique du sol parce que le taux de décomposition de la matière organique au niveau le plus intensif de production est plus élevé. Il s'ensuit que les teneurs cibles en matière organique sont relevées de 25 % pour les niveaux de production intensive, de 15 % pour les niveaux de production semi-intensive, et de 0 % pour les niveaux de production semi-extensive. (Breman *et al.* 1996)

En conclusion, la dynamique de la matière organique varie selon le niveau et le type de production, les apports en éléments nutritifs et le milieu biochimique. Pour cette raison, nous étudierons plus en détail la dynamique de l'azote dans les sols.

1.3.2 Dynamique de l'azote dans les sols tropicaux.

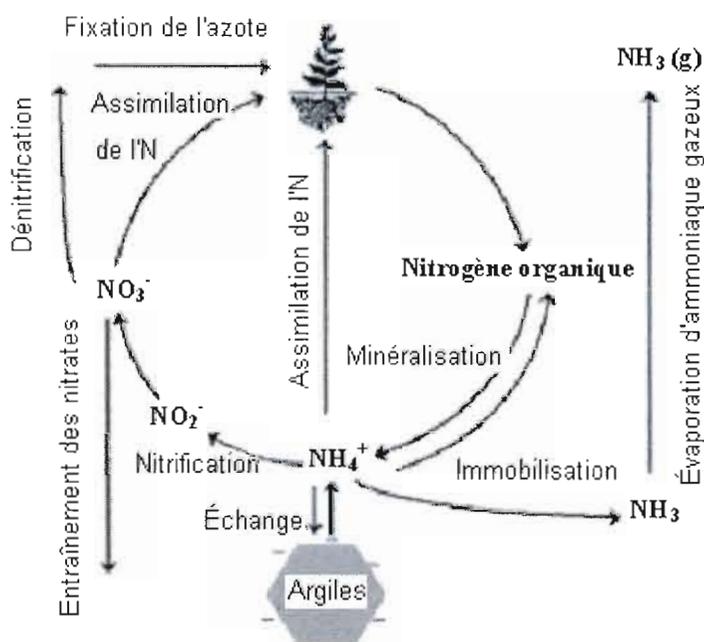
L'azote constitue, avec le carbone, l'aliment de base de la plante. C'est le facteur déterminant des rendements par son influence favorable sur la croissance de l'appareil végétatif (Di Vecchia *et al.* 2001). De plus, le déficit en azote et phosphore est plus limitatif que le manque de pluie et de la variabilité de celle-ci (Penning, 1991; cité dans Breman *et al.* 1998). Ces deux faits nous montrent l'importance de la dynamique de l'azote dans la gestion des sols et l'importance de certains processus qui le gouverne.

Le cycle de l'azote au sein de la biosphère est lié à la transformation des formes organiques de l'azote en azote minéral, qui est ensuite absorbé par les racines et réorganisé au sein des tissus vivants. Ceux-ci sont alors re-minéralisés après leur mort pour boucler le

cycle (cycle simple représenté par le demi-cercle droit de la figure 1.6). Par contre, le cycle se complique lorsque l'on tient compte des gains et des pertes avec le milieu extérieur comme l'illustre la figure 1.6. On peut affirmer que le cycle de l'azote n'est bien réalisé que dans des écosystèmes permanents, tels que les forêts (Duchaufour, 2001).

L'azote existe sous deux formes, celle qui est directement assimilable (forme minérale) et celle qui constitue la réserve (forme organique). Comme on le voit à la figure 1.6, la forme assimilable peut être échangeable (soit cationique NH_4^+) ou soluble (anionique NO_3^-). La réserve d'azote se retrouve dans la M.O.F., les composés humiques et la biomasse morte. La minéralisation des réserves d'azote en forme assimilable se fait selon trois processus selon l'ordre qui suit : la protéolyse (transformation des protéines en acides aminés), l'ammonification (processus dominant qui produit du NH_4^+) et la nitrification (les bactéries *nitrosomonas* oxydent le NH_4^+ en NO_2^- et les *nitrobacter* transforment l'acide nitreux en nitrique).

Figure 1.6 : Cycle de l'azote (adapté de Jones et Jacobsens, 2001).



Ensuite, il faut analyser les gains et les pertes. Dans les sols cultivés, le cycle de l'azote subit une grande influence des facteurs externes au système. Les entrées et les sorties en dehors de l'agrosystème prennent une trop grande importance. Les gains sont provoqués par la fixation symbiotique (fixation par la plante). Ils peuvent atteindre plus de 100 Kg/ha/an d'N lorsque l'on cultive des légumineuses (Duchaufour, 2001). À l'opposé du cycle, il y a les pertes sous trois formes : l'entraînement des nitrates (fig. 1.6), la dénitrification (qui reste limitée dans les sols filtrants et bien aérés) et l'évaporation d'ammoniaque gazeux. De plus, le cycle peut être brisé et causer ainsi des sorties d'azote. L'utilisation des fanes de niébé pour le fourrage de bétail, la récolte de la culture sans laisser de résidus au champ et l'érosion en sont de bons exemples (Bremner *et al.* 1996) et ont été corroborés par certaines études. Bremner *et al.* (1998) montrent que le recyclage des résidus de culture par compostage ou paillage et l'application de fumier permettent de réapprovisionner le sol en N et P, de maintenir et augmenter les rendements. Roose (1994) montre que les pertes d'azote par érosion vont de 3.5 kg sous forêt dense à 98 kg/ha/an sous culture extensive.

Par ailleurs, trois facteurs de station entrent en jeu dans la nutrition azotée des plantes cultivées : l'alimentation en eau, l'acidité du milieu et la présence du phosphore. Premièrement, il est important de retenir que, pour toutes cultures, la nutrition azotée est en relation étroite avec l'alimentation en eau. En effet, les stress hydriques provoquent une carence azotée (Duchaufour, 2001). Bremner *et al.* (1998) montrent que, grâce au billonnage qui réduit le ruissellement et favorise l'infiltration, l'azote et le P sont plus utilisés et les cultures sont plus productives. Deuxièmement, les études démontrent que la plupart des espèces cultivées, sauf exception, préfèrent l'alimentation nitrique. Toute acidification du milieu ralentit la nitrification et provoque une baisse de croissance (Duchaufour, 2001). Ce contexte d'acidité des sols du Mali sera présenté à la section 1.3.4 et au tableau 3.9. En regardant le rôle de la rhizosphère (couche mince qui entoure la surface absorbante des racines) nous pouvons noter l'existence d'une concurrence entre la plante et la biomasse microbienne pour l'absorption de l'azote minéral. Or, l'azote ammoniacal est plus facilement réorganisé dans le sol et l'azote nitrique est plus disponible pour la plante (Duchaufour, 2001). Troisièmement, les études de Bremner *et al.* (1998); Bremner *et al.* (1996) montrent

que la fixation de l'azote par les plantes peut s'avérer très décevante s'il n'y a pas de fertilisation au phosphore.

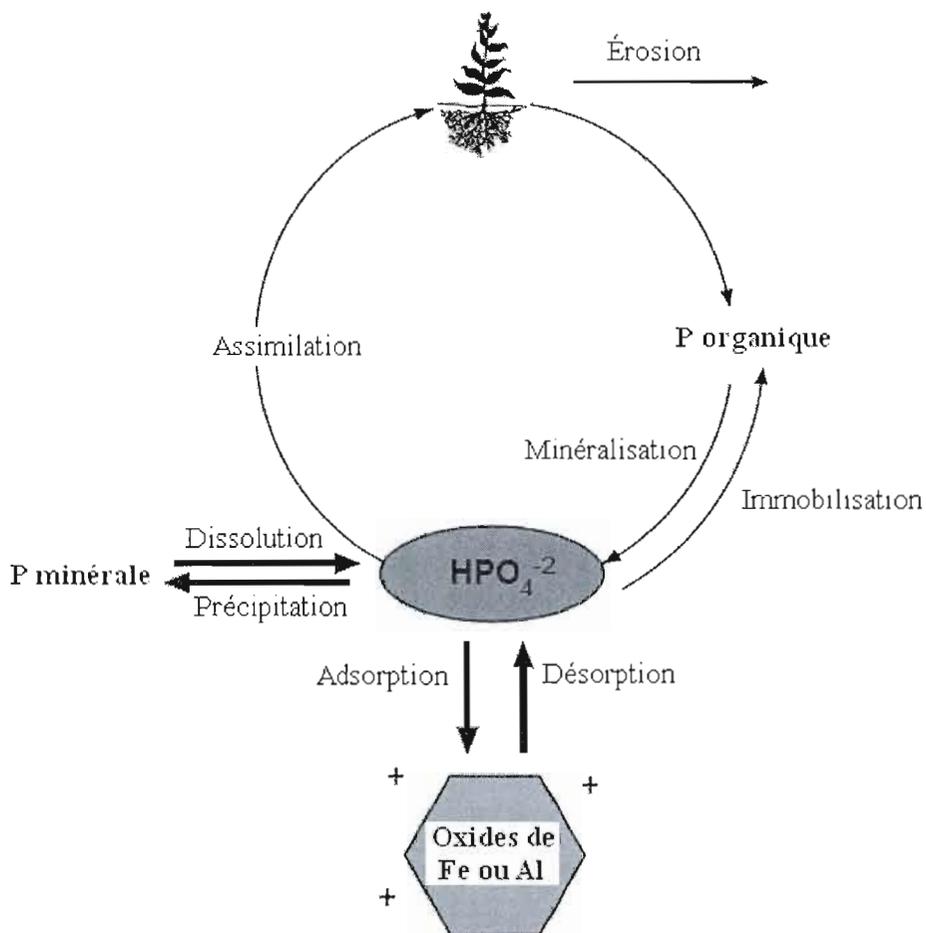
Dans un autre ordre d'idées, nous verrons quelques conclusions sur la fertilisation à l'azote au Mali. Il ne faut pas oublier que la fertilisation est inutile s'il n'y a pas de contrôle de ruissellement Breman *et al.* (1998). Ces auteurs ont effectué de nombreuses études à travers le Mali. Ils en sont venus aux conclusions que la dose optimal de N pour les sols sablo-limoneux est de 45 Kg /ha pour l'isohyète 700 mm. Pour les sols limono-sableux ce serait 35 Kg/ha pour l'isohyète 800. Il faut être très prudent quant aux recommandations de fertilisation parce qu'elles sont faites selon plusieurs facteurs. Les tableaux 1.3 et 1.4 montrent les recommandations pour le mil et le sorgho qui varient selon le type de culture et les conditions hydriques du milieu. Par contre, un complément minéral doit être « bien emballé » dans le compost et appliqué à plusieurs stade du système cultural pour éviter les pertes. C'est indispensable pour toute intensification de l'agriculture, ne serait-ce que pour permettre le développement de légumineuses capables de fixer l'azote de l'air (Roose, 1994). De plus, la rotation et l'association de culture sont des techniques de conservations qui sont moins coûteuses que l'utilisation d'engrais et qui produisent des résultats différents. En effet, la rotation céréales-légumineuses permet une fixation de l'azote par les légumineuses et la solubilisation du P en augmentant ainsi la fertilité des sols. Plusieurs études montrent que la rotation en zone soudanienne de mil et sorgho avec le niébé ou l'arachide a des rendements supérieurs à la culture de mil continue avec un ajout de 45Kg d'N/ha (Breman *et al.* 1998). Kouyaté et Juo (1998) montrent les *Effets des engrais verts sur la productivité des sols au Mali*. Effectivement, les résultats qu'ils ont obtenus permettent d'être optimiste quant à l'utilisation de *S. rostrata* et de *D. lablab* comme engrais verts pour la sécurisation du rendement du sorgho. L'étude de 1995 a permis d'observer que la rotation niébé - sorgho et l'enfouissement de *S. rostrata* et de *D. lablab* entraînent une augmentation de plus de 40 % du rendement grainier du sorgho par rapport au témoin monoculture de sorgho.

1.3.3 Dynamique du phosphore dans les sols tropicaux.

Le phosphore est un facteur de croissance, car il favorise le développement des racines et un facteur de précocité pour la fécondation et la mise à fruit. Les besoins des sols en phosphore dépendent beaucoup de la teneur en azote : plus un sol est riche en azote, plus il a besoin de phosphore. La plupart des sols des pays du CILSS sont fortement carencés en phosphore (Di Vecchia et *al.* 2001). Au Mali, les niveaux actuels de phosphates sont bas (Breman et *al.* 1996).

Voyons le cycle du phosphore (figure 1.7) plus en détail. Les différentes formes de P existantes dans les sols sont les phosphates solubles (formes ionisées de l'acide orthophosphorique : HPO_4^{-2} or $\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$), le phosphore adsorbé, le P organique et le P minéral (Morel, 1989; Jones et Jacobsens, 2001; Duchaufour, 2001). Le phosphore peut être assimilé par les plantes sous une seule forme : les phosphates solubles. Le phosphore adsorbé est, quant à lui, plus ou moins disponible et ses formes auto-diffusibles peuvent rétrograder. En effet, elles s'insolubilisent et se retirent du stock de phosphore assimilable (labile). Le phosphore sous la forme minérale et organique est utilisable à longue échéance. Un se trouvant dans les minéraux (apatites, phosphorites) et l'autre se minéralise dans les humus suffisamment actifs. Pour ce qui est de la forme adsorbante, elle est autodiffusible selon la nature et l'état de l'agent absorbant. La disponibilité du phosphore est faible quand le pouvoir absorbant est élevé. Donc, on oppose les argiles, les acides humiques et le calcaire actif (si le pH ne dépasse pas 7 pour ce dernier) aux hydroxydes de Fe et d'Al qui font des complexes avec le phosphore. Les processus qui régissent le cycle sont : l'adsorption et la désorption, la minéralisation et l'immobilisation, la précipitation ou la rétrogradation, la dissolution, l'érosion et le ruissellement (Jones et Jacobsens, 2001).

Figure 1.7: Le cycle du phosphore (adapté de Jones et Jacobsens, 2001).



Par ailleurs, voyons l'évolution et la dynamique du phosphore par rapport aux sols tropicaux de la zone d'étude. Les sols tropicaux développés sur matériaux fortement altérés sont caractérisés par des teneurs faibles en phosphore total et par des proportions importantes de phosphore associé à des formes ferriques et alumineuses peu solubles (Laurent et Brossard, 1991). La disponibilité du phosphore peut donc s'expliquer par la présence de fer et d'alumine. Il faut alors observer comment le processus de rétrogradation évolue dans un milieu acide et riche en oxyhydroxydes. En effet, une grande partie du phosphore lié à l'alumine précipite de façon irréversible et le phosphore absorbé par le fer peut prendre la forme « incluse » par cristallisation des oxydes amorphes (Duchaufour, 2001). Contrairement à l'azote et les bases qui sont très mobiles, le phosphore est rapidement insolubilisé par le fer et l'alumine libres, abondants dans les sols tropicaux. Par contre, le

potassium est très mobile dans les sols à kaolinite, tandis qu'il est rapidement rétrogradé dans les sols riches en argiles 2/1 comme la montmorillonite (Roose, 1980). En effet, le déficit en N, et P est plus limitatif que le manque de pluie et de la variabilité de celle-ci. (Penning, 1991; cité dans Sissoko K. et *al.* 1998). Il est important de noter que la mobilité du P est limitée par la disponibilité de l'eau et du développement racinaire (Breman et *al.* 1998). En fait, la plante ne peut absorber le P qu'en solution d'où l'importance de la rhizosphère. Certaines associations mycorhiziennes comme la rhizosphère jouent un rôle essentiel dans la mobilisation du phosphore insoluble dans les sols cultivés. En milieu acide, elle sécrète des substances chélatantes de type « sidérophores » pour empêcher l'insolubilisation par les oxyhydroxydes (Duchaufour, 2001). Par contre, il ne faut pas oublier que la concentration de P assimilé par les plantes est différente d'un champs et d'une plante à l'autre (Jones et Jacobsens, 2001). Les espèces cultivées ne sont pas tous bien armées pour absorber le phosphore minéral peu soluble.

Pour ce qui est de l'amendement, il faut rester prudent parce que la quantité totale de P dans le sol n'est pas représentative de la fertilité de celui-ci à cause de sa disponibilité. L'absorption maximale peut comporter des différences à cause des taux de fer des sols (Breman et *al.* 1998). Par ailleurs, la disponibilité de P est optimisée à un pH de 5.5 à 6 (Duchaufour, 2001; Breman et *al.* 1998). Nous avons également vu dans la section précédente que la fixation de l'N peut s'avérer très décevante s'il n'y a pas de fertilisation de P. Par ailleurs, des travaux sur les pratiques culturales ont prouvé l'avantage de bien contrôler les apports de phosphore. Il est démontré que ce sont essentiellement les traitements « mulch » ou les traitements avec compost qui conduisent, après 2 ou 3 années d'essai, à des augmentations sensibles des stocks organiques des sols (C, N) et des teneurs en phosphore (P) et soufre (S) totaux. Peu de différences sont notées entre les traitements « brûlis » et enfouissement des pailles (Feller et *al.* 1983a; cité dans Breman et *al.* 1998). De plus, ces derniers auteurs ont montré que les l'utilisation des techniques de rotation de mil/niébé, de billonnage et d'ajout d'engrais phosphatés ont augmenté les rendements de culture de mil.

La particularité du cycle du phosphore, dans cette étude, se situe du côté de intrants et extrants. D'après Jones et Jacobsens (2001), les gains de phosphore dans un sol cultivé

sont : la fertilisation (engrais minérales, fumiers, compost etc.), la désorption, la minéralisation et la dissolution tandis que les pertes sont : l'assimilation par les plantes, l'adsorption, l'immobilisation, la précipitation et l'érosion. Dans cette étude, l'accent a été mis sur les pertes de phosphore par érosion. Roose (1994) a montré que sous culture extensive couvrant assez mal le sol, les pertes (kg/ha/an) en nutriments par érosion s'élèvent à 98 kg d'azote, 57 kg de chaux, 39 kg de magnésie et 29 kg de phosphore et de potasse. En fait, la migration du phosphore se fit essentiellement sous forme solide (terre de fond et suspension). Alors, l'érosion sélective de l'érosion en nappe qui érode les particules fines et la M.O. du sol a un effet direct sur le phosphore. En effet, les réserves en phosphore labiles (phosphores adsorbés et phosphore de la réserve organique) du sol sont vidés significativement (tab. 1.2).

Bref, l'érosion est un grand facteur de perte en phosphore. De plus, les oxyhydroxydes, l'argile et l'acidité jouent un grand rôle dans la disponibilité du phosphore. C'est la dynamique des sols tropicaux acides que nous aborderons dans la prochaine section.

1.3.4 Dynamique des sols tropicaux acides.

Sous l'appellation de sols tropicaux acides, on peut inclure des formations très diverses. C'est pour cette raison que nous ne nous attarderons qu'aux sols les plus présents dans la zone d'étude. Ils correspondent aux sols ferrugineux tropicaux lessivés (dans la classification française) ayant globalement leur équivalent dans la « Soil Taxonomy » les alfisols tropicaux (Tropudalf - Tropustalf) (Dabin, 1984-85). Ces sols évoluent dans des régions à climat alterné, sous végétation de savane. Ce sont des sols qui ne sont que moyennement à faiblement acides sous végétation naturelle, mais qui peuvent s'acidifier rapidement après défrichage. Dans cette section, nous verrons les causes de l'acidification, son évolution dans la toposéquence et ses conséquences.

Tout d'abord, il faut savoir que l'acidité est liée au déficit de saturation du complexe absorbant des sols par des cations alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et des cations alcalins (Na^+

et K^+). Le Ca^{2+} occupe à lui seul 70 % de la somme des cations échangeables (Dabin, 1984-85). On peut également les appeler ions basiques ou bases échangeables (Duchaufour, 2001) et ont pour effet d'élever le pH du sol. La somme des bases échangeables (S) est la quantité totale de cations actuellement retenue sur le complexe absorbant exprimée en méq/100g de sol. La somme des bases échangeables est donc une caractéristique qui renseigne sur la richesse actuelle d'un sol. Par contre, cet état est très dépendant de l'histoire de chaque parcelle, de la date de mise en culture, des séquences de mises en jachère, de la fumure reçue, etc. (Di Vecchia et *al.* 2001). Ensuite, il y a les causes provenant milieu : la roche mère et le climat, la végétation, la nature du complexe absorbant, le défrichement et les pertes progressives au cours de la culture.

Dans un milieu géophysique, la roche mère et le climat jouent beaucoup sur la nature et la géomorphologie du terrain. Nous savons que les sols tropicaux sont le résultat de l'altération du socle rocheux par le climat (sect. 2.1.2, 2.1.3, 2.4.2 et 3.1.2). Plusieurs scientifiques invoquent la nature de la roche mère comme cause d'acidité. Par exemple, les roches basiques (gabbros, basaltes, diorites, amphibolites) fournissent des sols relativement riche en cations alcalino-terreux tandis que certaines roches quartzeuses acides (grès quartzitiques, granites, leucocrates, schistes quartzeux, etc.) donnent un caractère pédogénique plus acide (Dabin, 1984-85; Duchaufour, 2001; Morel, 1989; Landry et Mercier, 1992). Alors, il apparaît logique que le lessivage dû à la pluie, au drainage et à l'intensité de l'altération sont des causes essentielles de l'acidité dans les zones tropicales. Par ailleurs, la nature des argiles est régie par l'altération de la roche mère. Par exemple, les roches basiques vont former des sols plus argileux que les roches acides (ex. grès) qui formeront des sols sableux fixant moins bien la M.O. Les argiles produites par l'altération des roches forment un complexe absorbant et ont des CEC différentes selon leur nature. La plupart des régions tropicales humides et sub-humides (tropicales sèches) ont des sols avec une dominance évidente d'argile de type kaolinite. Les faiblesses des sols tropicaux ferrugineux sont la dominance de kaolinite pour les types d'argiles et la présence d'oxyhydroxydes de fer et d'Al (Breman et *al.* 1998). Comme nous l'avons vu plus tôt, les argiles 1/1 n'ont pas une CEC forte, alors la capacité de sorption des bases par le complexe d'échange est assez basse : environ 10 méq. pour 100 g ou 0,1 méq. par % d'argile (Dabin, 1984-85). De plus, les

oxyhydroxydes de fer et d'Al et la kaolinite limitent le coefficient d'utilisation de l'engrais puisque la CEC et la capacité d'absorption sont faibles (Breman et al. 1998).

Voyons maintenant l'action de la végétation. Il est observé couramment que, dans la plupart des sols tropicaux, l'horizon supérieur des sols est enrichi en bases par rapport aux autres horizons plus profonds (Roose, 1994, Breman et al. 1996, Breman et al. 1998). Ce phénomène s'explique par l'accumulation en surface de M.O. qui provoque une restitution régulière d'éléments basiques contenus dans les débris végétaux. Les bases sont captées en profondeur par les racines des plantes et quand celles-ci se décomposent à la surface, elles enrichissent l'horizon A1 par ce phénomène nommé la « remontée biologique ». Les termites peuvent aussi enrichir l'horizon de surface, mais il s'agit d'un processus long : bio-agrégation et désagrégation des termitières (Dabin, 1984-85; Eschenbrenner, 1986).

Une autre cause d'acidité des sols tropicaux est le défrichement par brûlis, qui n'est pas accompagné de techniques de conservation. Le pH est augmenté, la première année de culture, et le sol se dégrade très rapidement les années suivantes. Si le sol défriché n'est pas fortement protégé, la perte d'éléments par lixiviation ou ruissellement latéral peut être élevée (Roose, 1983; Dabin, 1984-85; Roose, 1994). De surcroît, il y a les pertes progressives au cours de la culture. Indépendamment de la lixiviation directe des cendres, il se produit un appauvrissement régulier du sol avec la culture (Roose, 1983; Dabin, 1984-85; Roose, 1994). Plusieurs auteurs l'ont montré; la perte en base dans les champs de culture est grande à cause de l'érosion, du ruissellement et du lessivage. Selon Duchaufour (2001), la lixiviation est un entraînement de sels solubles (nitrates, bicarbonates, sulfates, Ca Mg, K). Elle provoque une décarbonatation progressive (en milieu calcaire) et une décalcification (voire acidification) en milieu non calcaire. Par ailleurs, une fertilisation intense du sol provoque une acidification (Roose, 1994). En effet, des études de l'IRAT (Institut de Recherche en Agronomie Tropical) et celles de Pieri (1986, 1989) cités dans Breman et al. (1998) ont montré que dans la zone soudanienne l'utilisation exclusive d'engrais minéraux a des conséquences néfastes à long terme. Elle conduit à une diminution du taux de saturation des bases et une diminution du pH. Par contre, à court terme, elle augmente la production.

Dans un autre ordre d'idées, l'évolution des sols et son acidification, dans la toposéquence, laisse beaucoup de messages quant à la gestion des sols. Selon Dabin (1984-85), dans les régions de savane, l'acidification et la perte de matière organique sont plus importantes dans les sols ferrugineux tropicaux lessivés que dans certains sols situés en aval (sols peu évolués limoneux). Les sols ferrugineux tropicaux lessivés occupent généralement la partie supérieure des versants et ont une texture et des régimes hydriques qui diffèrent. C'est ce qui les différencie dans leur degré d'acidification. En effet, les sols de pente et de bas de pente sont moins argileux et moins humifères à cause d'un début de lessivage latéral. La pénétration en profondeur des acides fulviques libres et de l'aluminium échangeable est maximum dans les sols à drainage vertical dominant. Par contre, dans les sols à drainage latéral, la pénétration en profondeur est plus faible et l'évolution latérale de Al échangeable est parallèle à l'évolution latérale des acides fulviques libres. Du point de vue strict de l'acidification, l'augmentation du drainage entraîne donc une augmentation de Al. Le sol bien drainé de haut de pente nécessite une correction par le chaulage pour les cultures. D'après Buol et Nicholaides cités dans Dabin (1984-85), le besoin en CaO en milliéquivalent correspond environ à deux fois la teneur en Al^{2+} échangeable en milliéquivalents.

Pour faire suite, les conséquences de l'acidification peuvent être très différentes selon la richesse de départ du sol, selon son utilisation et selon le milieu. Dans les sols tropicaux, les conséquences de la perte en bases sont nombreuses. Comme nous l'avons vu précédemment, le pH du sol joue un rôle important dans l'évolution de la matière organique, dans le cycle de l'azote (ammonification, nitrification), dans les formes de fixation du phosphore sur le sol, leur assimilabilité et dans la solubilité de nombreux éléments majeurs ou traces et ce, sachant que le calcium et le magnésium sont les deux cations principaux qui conditionnent la valeur du pH du sol. En effet, il y a une contradiction apparente entre les besoins alimentaires des plantes qui sont peu élevés et la nécessité pour le sol de contenir ces éléments en abondance si l'on veut obtenir des récoltes acceptables. (Dabin, 1984-85). Il faut donc une activité biologique suffisante et une structure favorable à l'enracinement. Dans les sols tropicaux, l'action de l'acidité sur l'activité des micro-organismes est compensée par une température uniformément élevée qui permet d'importants développements microbiens jusqu'à des pH de 4. En ce qui concerne la structure des sols ferallitiques, elle peut être très

bonne en milieu acide grâce à l'action conjuguée du fer et de la matière organique. Il en est de même pour le phosphore lié à l'aluminium qui conserve une bonne labilité à un pH nettement acide. Tandis que le phosphore, lié au fer, devient très insoluble sauf en milieu réducteur (Dabin, 1984-85). Nous avons vu aussi que l'acidification due à la perte de Ca et Mg par lixiviation, par l'érosion et par l'exportation était autant plus grave que la pluviométrie était plus élevée, que les sols étaient profondément altérés, que les réserves en minéraux primaires des couches supérieures avaient disparu. De plus, les argiles étaient constituées principalement de kaolinite et parfois même d'oxyhydroxydes. Selon Dabin (1984-1985), il apparaît que pour le calcium et le magnésium, des valeurs inférieures à 0,2 me p. 100 g peuvent provoquer de véritables carences alimentaires. De plus, il a montré que la technique la plus efficace consiste à enrichir le sol à la fois en matière organique et en bases par des jachères cultivées, principalement de légumineuses (*Qwerariu*) ou des graminées (*Pennisetum*) ou d'autres espèces, ou bien par des fumiers et composts lorsque c'est possible. Cet enrichissement par les plantes de couverture est valable lorsque le sol possède encore quelques réserves accessibles dans les minéraux altérables, les silicates et les oxydes.

Outre les problèmes de carence, l'acidité du sol induit des phénomènes de toxicité ou même de déséquilibre physiologique grave ; en provoquant la libération à l'état échangeable ou soluble d'éléments comme le manganèse ou l'aluminium, parfois même le fer en milieu réducteur (Dabin, 1984-85). La toxicité pour l'aluminium est un phénomène qui est beaucoup plus habituel dans les sols tropicaux. Tous les sols à pH égal ou inférieur à 5, montrent un accroissement important de la teneur en aluminium échangeable. Il devient alors rapidement toxique dans la mesure où les teneurs en calcium deviennent au contraire très faibles. Par ailleurs, la matière organique semble jouer des rôles variables vis-à-vis de l'aluminium échangeable. Lorsque l'humification donne naissance à des acides humiques et de l'humine dans des sols contenant quelques réserves minérales, il peut y avoir un effet de blocage de Al échangeable avec relèvement du pH. En revanche, l'aluminium est corrélé directement à la teneur en acides fulviques libres, donc au taux de matière organique (Dabin, 1984-85). Dans les sols à teneurs élevées en Al échangeable, la nature de la plante intervient prioritairement dans la sensibilité au phénomène de toxicité, la correction ne peut se faire

uniquement par l'apport de matière organique. Si le sol ne contient pas de réserves en bases et s'il est riche en acides fulviques libres, l'amendement calco-magnésien devient alors indispensable. Cependant, la quantité à ajouter doit être évaluée sur la base de deux fois la teneur en Al échangeable. Il est important de ne pas limiter cet amendement uniquement à la couche supérieure, car les racines profondes absorbent beaucoup d'aluminium (Dabin, 1984-85).

En résumé, les pertes en nutriments des sols tropicaux sont élevées. La sensibilité de ces sols à l'érosion, à l'acidité et aux toxicités montre qu'ils ont souvent des bilans nutritifs négatifs. Il faut alors observer ces bilans et opter pour la conservation et la restauration des sols.

1.3.5 Bilans des nutriments et restauration des sols.

Les bilans nutritifs sont souvent négatifs dans la zone soudano-sahélienne du Mali (Breman et *al.* 1998). La subtilité de la dégradation des sols cause beaucoup de problèmes. Une baisse de fertilité des sols est progressive contrairement aux catastrophes naturelles telles que l'attaque des criquets, les sécheresses, les séismes, les inondations etc.) Une baisse de fertilité ne semble pas alarmante.

Au Mali, Van der Pol et Van der Geest (1993) cités dans Breman et *al.* (1998) ont montré que les paysans perdent en moyenne 40% de leurs revenus agricoles à cause de l'exploitation minière des sols. L'exploitation minière étant une expression signifiant que les bilans nutritifs des systèmes de culture sont négatifs et que les intrants sont moindres que les extrants. C'est comme s'ils extrayaient les minéraux du sol (Breman et *al.* 1998). En effet, Roose (1994) a montré que les sols de Basse Côte d'Ivoire sous culture extensive couvrant assez mal le sol ce qui mène à des pertes (kg/ha/an) en nutriments par érosion s'élevant à 98 kg d'azote, 57 kg de chaux, 39 kg de magnésie et 29 kg de phosphore et de potasse. S'il fallait compenser ces pertes par des apports d'engrais, il faudrait 7 tonnes de fumier frais, 470 kg/ha de sulfate d'ammoniaque, 160 kg de superphosphate, 200 kg de dolomie et 60 kg/ha/an

de chlorure de potasse. Une étude de Stocking (1986) cité dans Roose (1994), se basant sur les données d'analyse du sol érodés et des eaux recueillies sur les parcelles par Hudson dans les années 1960 et sur la carte d'occupation des sols actuelle au Zimbabwe, a calculé que le pays perdait chaque année 10.000.000 tonnes d'azote et 5.000.000 tonnes de phosphore à cause de l'érosion. La plupart des sols de la zone soudano-sahélienne sont pauvres en éléments nutritifs, ce qui a pour conséquence une utilisation moindre de l'eau disponible pour la croissance végétale. Les pertes hydriques sont estimées à 85-90% (évaporation, drainage, ruissellement) et s'il n'y avait pas de pénurie en nutriments les pertes seraient moindres = 50 % (Breman *et al.* 1998). Roose (1994), nous fait un portrait des conséquences économiques de l'érosion : pertes d'eau, d'engrais et de pesticides; perte de production immédiate (au niveau régional 2 à 10 %: compensation possible par apport d'intrants; au niveau local 2 à 50 % = catastrophe individuelle = perte de la marge bénéficiaire); perte de surface cultivable (au niveau mondial 7 à 10 millions d'hectares par an; au niveau régional 2 à 5 %; au niveau parcelles 20 à 100%).

La solution qui semble évidente au problème de ces bilans négatifs des éléments nutritifs est la fertilisation minérale. Somme toute, en milieu traditionnel, la fertilisation minérale « vulgarisée » est restée très modeste (moins de 100 kg/ha de NPKCa). Les rendements sont passés de 600 à 1100 kg/ha (céréales, arachide, coton). Par contre, le bilan des matières organiques et des nutriments étant négatif, les sols se sont rapidement dégradés et les rendements également (Roose, 1994). Seul l'apport de fumier ou de compost bien décomposé (C/N < 15) (3 à 10 t/ha/an) et complété d'un appoint minéral pour corriger les carences du sol semble réussir à maintenir la productivité des terres. Il maintient le taux de matières organiques du sol (donc la structure et le stockage de l'eau et des nutriments), évite l'acidification, favorise l'enracinement profond et les activités biologiques (micro et mésofaune) (Roose, 1994). Ce derniers auteurs propose l'enfouissement des résidus et des adventices qui sont une filière courte (1 à 3 mois) de recyclage rapide des nutriments contenus dans la biomasse; le paillage épais (7 à 10 cm, ou 20 à 25 tonnes de paille par hectare) qui s'avère une méthode très efficace pour réduire l'évaporation, la croissance des adventices, maintenir l'humidité du sol en saison sèche et arrêter l'érosion. C'est aussi une filière courte pour restituer la totalité de la biomasse et les nutriments qui la constituent (K,

Ca, Mg, C, d'abord par lessivage, N et P à mesure de la minéralisation et de l'humification à travers la mésofaune et la microfaune).

Par ailleurs, nous avons vu qu'en zone tropicale, il y a de nombreuses fuites dans le système sol : l'érosion, le ruissellement, le drainage et la gazéification etc. C'est pour cette raison que Roose (1994) propose des règles à suivre lorsque l'on fait un amendement pour éviter son entraînement : fractionner les doses d'engrais (1/3 au semis, 1/3 au tallage ou à la montaison, et 1/3 à l'épiaison), apporter les amendements calcaires après la période des fortes averses, calculer les doses en fonction de la capacité du sol et des plantes à les stocker, choisir les nutriments sous forme assimilable pour les plantes, augmenter la capacité de stockage du sol par apport de matière organique ou d'argile à haute capacité de fixation (smectite gonflante), disposer les engrais sur toute la zone couverte par les racines, supporter l'activité d'une certaine couverture d'adventices, peut-être les rabattre en temps opportun pour former une litière (ces herbages vont fixer temporairement les nutriments susceptibles d'être lixiviés) et équilibrer les apports en fonction des besoins des plantes et de la disponibilité du stock du sol. Pour ce faire, voici les recommandations de fertilisation pour différentes conditions :

Tableau 1.3 : Sorgho (*Sorghum bicolor* (L) Moench) (Adapté de Alkaemper, Directeur exécutif du Centre Scientifique pour les tropiques, Justus-Liebig-Universitaet Giessen, Giessen, Allemagne)

| Recommandation de fertilisation en macronutriments pour le sorgho | | | |
|--|--------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Conditions des milieux | Kg/ha | | |
| | N | P₂O₅ | K₂O |
| Milieu sec, culture à faible rendement | 0 - 20 | 0 - 20 | 0 - 20 |
| Milieu hydromorphe, culture à rendement moyen | 20 - 60 | 20 - 40 | 20 - 50 |
| Milieu irrigué, culture à haut rendement | 60 - 100 | 40 - 60 | 50 - 100 |

Tableau 1.4 : Millet à chandelle, millet perle) (*Pennisetum americanum* (L) Leeke, Synonymes: *P. glaucum*, *P. spicatum*, *P. typhoides*) (Adapté de Alkaemper, Directeur exécutif du Centre Scientifique pour les tropiques, Justus-Liebig-Universitaet Giessen, Giessen, Allemagne)

| Recommandation de fertilisation en macronutriments pour le mil | | | |
|---|--------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Conditions des milieux | Kg/ha | | |
| | N | P₂O₅ | K₂O |
| Milieu sec, culture à faible rendement | 0 - 20 | 0 - 20 | 0 - 20 |
| Milieu hydromorphe, culture à rendement moyen | 20 - 60 | 20 - 40 | 20 - 50 |
| Milieu irrigué, culture à haut rendement | 50 - 100 | 40 - 60 | 40 - 100 |

Nous ne pouvons parler de bilan nutritif sans aborder le sujet de restauration des sols. Même si nous avons parlé plus tôt d'exploitation minière des sols, il faut prendre conscience qu'ils ne sont pas tous des « ressources naturelles non renouvelables ». Il est possible de restaurer rapidement la fertilité d'un bon nombre de sols suffisamment profonds. Mais la restauration des sols est dispendieuse et on a tardé à le protéger. Roose (1994), nous propose six règles à respecter pour la restauration des sols des pays tropicaux à la figure 1.8.

Figure 1.8 : Six règles à respecter pour la restauration des sols.

1. Si le sol est décapé: Il faut se rendre maître du ruissellement.
2. Si le sol est compact, il faut réaliser un travail profond.
3. Si la structure est instable, il faut enfouir un stabilisant (M.O. bien décomposée, gypse, chaux) et semer une végétation pour stabiliser les macropores.
4. Si l'horizon superficiel a été appauvri, il faut réintroduire une microflore et une mésofaune (fumier ou compost bien décomposés)
5. Si le sol est acide, il faut augmenter le pH supérieur à 5.
6. Si les sols sont pauvres, il faut corriger progressivement les carences minérales du sol.

À la figure 1.8, les six règles à respecter pour la restauration des sols selon Roose (1994) ont été mises en relation. Même auteur les explique comme suit: 1) si le sol est décapé par l'érosion, il faut avant tout se rendre maître du ruissellement (cordon de pierres, haies vives, etc.); 2) si le sol est compact, il faut réaliser un travail profond pour restaurer la macroporosité de la couverture pédologique; 3) la structure étant généralement instable, il faut en même temps enfouir un stabilisant (de la matière organique bien décomposée, du gypse, de la chaux) et semer une végétation produisant un enracinement profond et une biomasse exubérante capable de stabiliser les macropores du profil (ex. sorgho, Stylosanthes, Pennisetum, maïs, etc.); 4) si l'horizon superficiel a été appauvri ou décapé, il faut réintroduire une microflore et une mésofaune susceptibles de favoriser l'évolution positive de la structure et l'assimilabilité des nutriments minéraux (fumier ou compost bien décomposés); 5) si le sol est acide, il faut amender le sol jusqu'à ce que le pH dépasse 5 et que la toxicité aluminique et manganique soit écartée; 6) enfin, corriger progressivement les carences minérales du sol en alimentant les plantes cultivées à leur rythme et en emballant le complément minéral (N et P) dans la fumure organique pour éviter sa lixiviation par le drainage ou son immobilisation par le fer ou l'alumine libre.

Ces étapes semblent être la formule magique pour régler les problèmes de dégradation des sols. Selon Roose (1994), la mentalité de la lutte contre l'érosion des sols a beaucoup évolué. Cet auteur croit que les GCES représentent une bonne mentalité pour la gestion de projet en Afrique de l'Ouest. Pour ce faire, il faut regarder plusieurs aspects de la problématique. En effet, un problème environnemental peut souvent se régler par une solution sociale ou économique. Nous devons conserver une vision globale en tenant compte du microscope (Rosnay, 1975). Jusqu'à maintenant, nous avons une bonne connaissance de la problématique majeure de l'insécurité alimentaire au Mali, des problématiques spécifiques à la région de Ségou, des conséquences de l'érosion en nappe et la complexité de leurs interactions avec le milieu naturel, celui des sols tropicaux. C'est pour cette raison que nous présenterons dans la section 1.4 de ce chapitre les outils numériques que la communauté scientifique a conçus pour simplifier les interactions entre les processus.

1.4 Modélisation des processus d'érosion en nappe et de la dynamique des nutriments.

Un modèle est une simplification du monde qui possède ses limites, son domaine de validité (DESPA, 2005). En effet, nous nous devons de faire une revue de la littérature des différents modèles disponibles pour trouver le meilleur pour notre domaine d'application. En modélisation, il ne faut pas oublier que le modèle ne représente pas la réalité. En dehors de ses limites, les résultats obtenus ne sont plus réels. Ils ne font que traduire les propriétés du modèle. Dans la recherche d'un bon modèle, nous devons vérifier s'il est prédictif, c'est-à-dire qu'il doit permettre de prévoir dans une certaine mesure le résultat d'une expérience. De plus, l'étude des différents modèles permet de connaître différents points de vue et certains combinés peuvent résoudre des problématiques comblant les manques de l'un et de l'autre.

Dans cette section, nous ferons une revue des modèles existants dans le domaine de l'érosion et de la dynamique des nutriments. Cette revue nous permettra de choisir le modèle approprié. Nous ferons ensuite une brève description de celui-ci. Nous effectuerons une analyse de sensibilité de ce modèle.

1.4.0 Revue des modèles disponibles.

Une bonne revue de modèles disponible a été faite par Nafu (2000). Nous la compléterons avec d'autres que nous jugeons nécessaires de nommer. Nous verrons des modèles d'érosion et de transports de nutriments. Ces modèles ont différentes formes et selon différentes approches. Nous verrons des modèles distribués (D) ou non distribué (L), des modèles à bases physique (P) ou empirique (E), des modèles à l'échelle des bassins fluvial (C) de bassin versant (S) ou de parcelle (F); un modèle pour un événement (V) ou à long terme (T). Les processus modélisés par les modèles seront montrés : Érosion (E), écoulement (R), nutritif (N), pesticides (P), évolution de la végétation (C). Alors voici un tableau synthèse des modèles numérique de la revue faite par Nafu (2000) que nous avons augmentée.

Tableau 1.5 : modèles numériques, augmentés de Nafo (2000)

| Noms des modèles | | Référence | Type | Processus |
|-------------------|---|---|-------|-----------|
| AGNPS | Agricultural Non-point Source pollution model | Young et al., 1987 | DECV | ERNP |
| ANSWERS | Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response System | Beasley & Huggins, 1982 | DPCV | ER |
| CREAMS | Chemical runoff and erosion from agricultural management. | Knisel, 1980 | LPCTV | ERNP |
| DUSLE | Differentiated USLE | Flacke et al., 1990 | DECT | E |
| EGEM | (Ephemeral Gully Erosion Model) | USDA, 1992 | * | * |
| EPIC | Erosion Productivity Impact Calculator | Williams, 1985 | LPFT | ERNP |
| EROSION2D | Erosion 2D | Schmidt, 1991 | DPSV | ER |
| EROSION3D | Erosion 3D | v. Werner, 1995 | DPCTV | ER |
| EUROSEM | EUROpean Soil Erosion Model | Morgan et al., 1992 | DPCV | ER |
| GLEAMS | Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) | Leonard, R. A et al 1987 | * | * |
| ICBMregion | A system for calculations of soil C balances 2003 | Andren, O. et al. 2002 | * | * |
| KINEROS | KINematic EROsion Simulation | Woolhiser et al., 1990 | DPCV | ER |
| PSS | Calcul de l'azote | Breman H. et al. 1996 | * | * |
| LISEM | Limburg Soil Erosion Model | De Roo et al., 1994 | DPCV | ER |
| MEDRUSH | Modelling the recent historical impacts of atmospheric CO2 and climate change on Mediterranean vegetation | Osborne, C.P., P.L. Mitchell, J.E. Sheehy, and F.I. Woodward. 2000. | * | * |
| ModFlow | modularization concepts and the Ground-Water Flow Process | Harbaugh, A.W. et al. 2000 | * | * |
| MUSLE87 | Modified USLE 1987 | Hensel & Bork, 1988 | DECT | E |
| NuMass | Nutrient Management Support System v.2.1 | Osmond, D.L et al.2004 | * | * |
| OPUS | Advanced simulation model for nonpoint source pollution transport | Ferreira & Smith, 1992 | DPFTV | ERNP |
| PEPP | Proze orientiertes Erosions-Prognose Programm | Schramm, 1994 | DPSV | ER |

| | | | | |
|---------------|---|--------------------------------|-------|------|
| RUSLE | Revised USLE | Renard et <i>al.</i> , 1991 | LEFT | E |
| RUSLE2 | Revised USLE version 2 | Foster et <i>al.</i> 2002 | LEFT | E |
| SOILN | Simulation model for nitrogen conditions in soils | Eckersten et <i>al.</i> , 1998 | * | * |
| SWAT | Soil and Water Assessment | Arnold et <i>al.</i> , 1995 | DPCVT | ERNP |
| USLE | Universal Soil Loss Equation | Wischmeier et Smith, 1978 | LEFT | E |
| WEPP | Water Erosion Prediction Project | Lane & Nearing, 1989 | DPSTV | ER |

*non vérifié

À travers ce grand nombre de modèles disponibles, il fallait choisir lequel serait le plus approprié. Dans un premier temps, le choix du modèle a précédé les travaux de terrains. Il fallait choisir avec pertinence un modèle en fonction de son adéquation avec la problématique, de l'échelle de grandeur de l'étude, de la praticabilité, des moyens dont on dispose, etc. (DESPA, 2005).

Étant donné les conditions d'étude au Mali et les ressources disponibles, le modèle ne devait pas nécessiter trop de variables. En effet, l'analyse des sols en laboratoire au Mali requiert un budget élevé et un séjour plus long. Les contraintes imposées par le projet nous ont poussés vers une démarche optimisée des prises de données sur le terrain. De plus, plusieurs données nécessaires aux modèles ne sont pas disponibles dans les pays en développement comme le Mali. Prenons l'exemple des données météorologiques. Dans la région d'étude, les archives sont faites à la main et ne sont pas exhaustives puisque les moyens nécessaires sont manquants. Alors, nous avons dû éliminer tous les modèles nécessitant plusieurs variables que nous n'aurions pu obtenir sur le terrain. Donc, les modèles à base physique n'étaient pas appropriés. Par ailleurs, il fallait que le domaine d'application du modèle à choisir soit congruent aux conditions du milieu. Dans la liste qui figure dans le tableau 1.5, plusieurs modèles ne sont pas calibrés pour des sols tropicaux. Certains modèles servent à suivre le transport des polluants par les pesticides et les engrais. Ce domaine ne représente pas la réalité du Mali, car le problème est la sous production des sols qui causant l'insécurité alimentaire. En effet, les paysans ont d'autres préoccupations que de contrôler les flux potentiellement polluants. De plus, leur utilisation est limitée étant donné le faible pouvoir d'achat des paysans. Donc, les modèles comme AGNPS ou

CREAMS ont été écartés. Par ailleurs, le choix du modèle a aussi été basé sur sa simplicité et son approche de résolution de problèmes (un support d'aide à la décision pour une agriculture durable). Nous sommes alors arrivés à la conclusion d'utiliser le modèle RUSLE2.

1.4.1 Description du modèle RUSLE2

Dans cette section, nous ferons une description du modèle choisi. Nous expliquerons son origine, les caractéristiques de son fonctionnement et de son utilisation pratique.

Les premiers concepteurs du modèle empirique de perte en sol, nommé RUSLE2 (Revised Universal Soil Loss Equation-version 2) sont Wischmeier et Smith (USLE, 1978). Depuis, le modèle a été amélioré, révisé et modifié sous plusieurs versions avec les travaux de plusieurs scientifiques de l'USDA-Agricultural Research Service. En effet, l'équation universelle est passée de USLE, DUSLE, MUSLE, RUSLE pour être aujourd'hui RUSLE2 (Foster et *al.* 2002) la dernière version révisée. Les nombreuses études ont permis d'améliorer énormément les dernières versions et sur tous les aspects du modèle (Zingg's equation (1940), Smith and Whit's equation (1947), AH-282 (1965), "Undisturbed land" (1975), AH-537 (1978), Disturbed forestland (1980), RUSLE1 (1992), AH703 (1997), OSM Manual (mined, reclaimed land, construction sites) (1998), RUSLE2 (2001) (Kuenstler, 2002). En effet, son amélioration s'est faite sur son interface, sa simplification technique, ses unités, ses bases de données, les formules, les manipulations plus diversifiées des variables, etc.

RUSLE2 peut être utilisé comme guide pour la planification de conservation des sols, pour l'inventaire des taux d'érosion sur de grandes surfaces et pour estimer la production de sédiments sur les surfaces de hautes terres ou du bassin versant. Ce sont donc les domaines d'application parfaits pour cette recherche. En effet, RUSLE2 est un outil quantitatif et qualitatif (en partie, pour ce dernier). Il peut montrer la perte en sol selon la quantité et en plus, il donne une indication sur la tolérance de perte en terre d'un sol. Il peut s'utiliser sur

des terres de cultures, de pâturages, de forêts détériorées et sur d'autres terres qui ne s'appliquent pas dans notre cas.

La formule utilisée dans RUSLE2, $A = R.K.S.L.C.P$ (où l'érosivité (R), l'érodibilité (K), l'inclinaison de la pente (S), la longueur de la pente (L), le couvert végétal (C) et les pratiques de conservations (P) sont multipliés) donne la perte de sol journalière. La moyenne annuelle de pertes de sol est alors calculée avec la somme des pertes de sol journalières. L'approche de RUSLE2 suit les étapes pour définir le mode de gestion des terres d'une région ou d'un milieu. Il faut commencer par faire la cueillette des données météorologiques, agronomiques, géomorphologiques et pédologiques. Ensuite, l'analyse des sols doit être faite pour ainsi remplir tous les paramètres du modèle avec les données recueillies. Subséquemment, nous procédons aux simulations. Par essais successifs, on adapte un couvert végétal C en fonction des rotations de cultures locales (ou celles souhaitées) en faisant varier les techniques culturales et les pratiques antiérosives (P). Dans le but ultime d'atteindre une perte en sol sous le seuil de tolérance de 1 à 12 t/ha/an.

Dans cette approche de RUSLE2, il ne faut pas oublier les procédures importantes et nécessaires à suivre pour obtenir de bons résultats. C'est en se référant au manuel de l'utilisateur par Foster et *al.* (2002) que nous pouvons les énumérer. Il ne faut pas changer indépendamment une suite de données sans calibrer le modèle à nouveau. Il faut respecter les limites des applications du modèle. Les situations suivantes doivent être vérifiées : le processus d'érosion (*Interrill and rill erosion; Sediment yield from overland flow slope length; Sediment yield from terrace channels and simple sediment control basins*), l'utilisation de la terre (la meilleure application est la terre de culture), les régions géographiques (où il y a de la pluie régulièrement et où elle est dominante; où la pluviométrie dépasse 20 pouces), les échelles temporelles. Le niveau de confiance dans les variables est établi selon l'échelle suivante : Élevé, modéré, acceptable et non applicable. Pour les processus d'érosions linéaires (*Ephemeral or permanent incised gully erosion; Stream channel erosion; Mass wasting*) le modèle n'est pas applicable. Le niveau de confiance de l'utilisation des terres de culture comme site d'étude est élevé. Par rapport aux types de culture, le modèle a un niveau de confiance élevé pour le maïs, le soya, le blé; modéré pour

Conservation tillage, la rotation avec le foin et acceptable pour le foin et le pâturage. Quoique les nouvelles versions de RUSLE2 sont mieux adaptées aux cultures tropicales. Pour le reste référons nous au tableau suivant :

Tableau 1.6 : Niveau de confiance des paramètres de RUSLE2

| Paramètres | Élevé | Modéré | Acceptable | non applicable |
|---------------------|-----------------|--------------------------|-------------------|-----------------|
| Sol | texture moyenne | texture fine | texture grossière | organique |
| Longueur (pente) | 50-300 pieds | 0-50 et 300-600 pieds | 600-1000 pieds | > 1000 pieds |
| Inclinaison (pente) | 3-20% | 0-3 et 20-35% | 35-100% | > 100% |

Dans un autre ordre d'idées, le modèle a un certain degré d'incertitude par rapport à ses résultats. Quand l'érosion se situe entre 1 et 4 t/ac/an ou entre 30 et 50, les incertitudes sont de $\pm 50\%$, entre 4 et 30 t/ac/an : $\pm 25\%$, supérieur à 50 t/ac/an : $\pm 50\%$ et finalement plus petit que 1 t/ac/an les incertitudes sont de 100%. Puis, il faut noter que les changements dans les résultats du modèle sont significatifs quand la perte en sol est estimée à plus de 10%.

Bref, ce modèle s'utilise très bien dans notre région d'étude. En général, le niveau de confiance est élevé pour la majorité des paramètres. Alors, ce modèle nous donne la perte de sol par l'érosion en nappe par rapport aux systèmes sol, cultural, climatique. Il faudra alors calculer la perte en éléments nutritifs de ce type d'érosion.

1.4.2 Analyses de sensibilité du modèle RUSLE2

L'analyse de sensibilité du modèle RUSLE2 est très utile à la compréhension de son fonctionnement. Elle aide à déterminer les variables clefs de certaines situations et ainsi de trouver plus rapidement les paramètres à changer afin de réduire la perte en sol. Plusieurs variables dans RUSLE2 sont interreliées tel que la manière dont le rendement affecte la perte de sol. Donc, les variables qui ont un plus grand effet sur la perte de sol devraient être étudiées avec soin. De plus, quelques variables ont un effet linéaire comme l'érosivité (R), l'inclinaison de la pente. Par contre, la plupart ne le sont pas. On peut nommer la couverture

au sol, la biomasse dans le sol et la rugosité. Donc, si l'on double les variables linéaires, les effets seront également doublés. Pour les variables non linéaires on ne peut pas savoir si les effets seront moindres ou plus grands que l'augmentation de la variable (Kuenstler, 2002). Voyons des exemples d'analyse de sensibilité de variables du modèle.

La variable de la longueur de la pente aura une sensibilité faible pour une inclinaison de la pente faible (0.5%). En effet, la perte en terre (A) ne varie pas significativement :

$$A = 4.6 \text{ t/a à } L = 150 \text{ ft,}$$

$$A = 5.2 \text{ t/a à } L = 500 \text{ ft,}$$

$$A = 5.5 \text{ t/a à } L = 1000 \text{ ft.}$$

La variable de la longueur de la pente aura une sensibilité moyenne pour une inclinaison de la pente forte (20%). En effet, la perte en terre (A) varie significativement :

$$A = 129 \text{ t/a à } L = 50 \text{ ft,}$$

$$A = 202 \text{ t/a à } L = 100 \text{ ft,}$$

$$A = 317 \text{ t/a à } L = 200 \text{ ft.}$$

Ces deux exemples de sensibilité de la variable de la longueur de la pente face à son inclinaison montrent comment la sensibilité de la variable dépend de la situation.

Dans ce chapitre, nous avons vu les processus de l'érosion en nappe, la dynamique des nutriments des sols tropicaux et la modélisation dans son domaine d'application. Nous pouvons retenir que l'érosion en nappe est un processus complexe qui implique la dynamique des nutriments et l'évolution des sols. Pour faire une gestion durable des sols au Mali, il faut absolument tenir compte de l'érosion en nappe et de ses impacts. De surcroît, la sécurité alimentaire pourrait être augmentée par un aménagement du terroir et son intensification agricole pour ainsi contrer les effets néfastes de l'érosion en nappe.

Dans le prochain chapitre, nous verrons la méthode utilisée pour étudier la zone d'étude, ses caractéristiques et toutes celles des systèmes interagissant dans le but de pouvoir spatialiser les impacts de l'érosion en nappe à Boidié. Ceci dans le but de trouver une méthode de recherche-action qui pourrait être applicable dans plusieurs régions au Mali et ainsi mieux assurer la sécurité alimentaire du pays.

CHAPITRE II

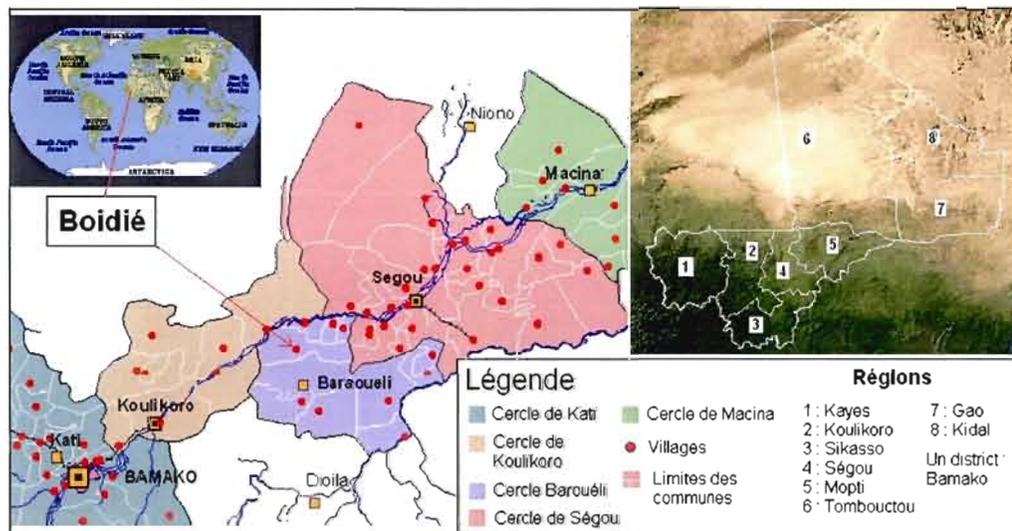
MATÉRIEL ET MÉTHODE

Dans ce chapitre, nous mettrons en contexte le milieu géophysique de l'étude. Nous présenterons la méthode utilisée dans l'étude préliminaire, les analyses, les sols de la zone d'étude, l'analyse systémique, la paramétrisation et la spatialisation. À travers ces sections, nous expliquerons la méthode et le pourquoi du choix de ces différentes approches.

2.1 Contexte physique de l'étude au Mali

2.1.0 Localisation de la zone d'étude

Figure 2.1: Localisation de Boidié; modifié de Technical University of Berlin (2004) et de FAO (2004).



La zone d'étude se trouve au Mali au sud du Sahel. Elle fait partie de la quatrième région, c'est-à-dire la région de Ségou. Le cercle qui héberge la zone d'étude est Barouéli. Celui-ci est situé au sud-ouest de la région de Ségou et est limité à l'ouest par le cercle de Dioïla, au nord par le cercle de Koulikoro et à l'est par celui de Ségou. Il compte onze communes rurales dont la commune de Boidié qui nous concerne. L'étude se fera dans cette commune limitée par un secteur bien précis dont les coordonnées sont : 6°40' à 7° ouest et 13°10' à 13°20' nord.

2.1.1 Contexte climatique

La commune de Boidié fait partie de la zone de transition entre le Sahel et le Soudanien, c'est-à-dire le soudano-sahélien. Par ailleurs, l'emplacement de la zone d'étude est de plus relativement près d'une autre région géophysique : le Delta du Niger. Celui-ci est situé entre les 4° et 6° degrés ouest et entre les 13° et 16° degrés nord. Sachant que les coordonnées du secteur de référence sont 6°40' à 7° ouest et 13°10' à 13°20' nord, nous remarquons que nous sommes un peu plus à l'ouest que le Delta central. Alors, il est possible de voir des régimes hydriques qui tendent vers ceux du Delta comme par exemple des plaines inondables. De plus, à cause des changements climatiques, du phénomène polycyclique de cette zone, la sécheresse et de l'état de la désertification, certains auteurs affirment que la zone est soudanienne-nord, d'autres soudano-sahélienne et les plus alarmistes la déclarent déjà faisant partie du Sahel-sud. Pour ne pas entrer dans la confusion, nous établissons, dans le cadre de cette recherche, que Boidié fait partie d'une région semi-aride et soudano-sahélienne (ou soudanien Nord qui est un synonyme). En se référant au tableau 2.1 (Toure et *al.* 2000) la pluviométrie de cette région est de 550-600 mm à 750-800 mm, dont 5 à 7 mois secs/an et 5 à 7 mois pluvieux/an.

Tableau 2.1 : Zones climatiques (Toure et al. 2000)

| Zones | Sous-zones bioclimatique | Types climatiques | Précipitations moy. Annuelles (1) (Pmm3) | Indce d'aridité climatique (2) | Mois « secs et mois « pluvieux »/ an (2) |
|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|--|--------------------------------|--|
| Saharienne | Saharien | Hyper aride | P<150 | IAC<0,05 | Tous les mois sont « sec » |
| Sahélienne | Sahélien Nord | Aride | 150 à 350 | 0,05< IAC | 9 à 11 mois « sec », 3 à 1 mois « pluvieux » |
| | Sahélien Sud | Aride | 350 à 600/550 | <0,25 | |
| Delta central nigérienne (3) | Soudano-Sahélien | Aride | 100 à 600 | 0,25<IAC <0.50 | |
| Soudanienne | Soudanien Nord | Semi-Aride | 600/550 à 800/750 | 0,25<IAC <0.50 | 7 à 9 mois « sec », 5 à 3 mois « pluvieux » |
| | Soudanien Sud | Sub-humide | 800/750 à 1100 | 0,50<IAC <0.75 | 7 à 5 mois « sec », 7 à 5 mois « pluvieux » |
| Guinéenne | Guinéen Nord | Sub-humide | P>150 | | |

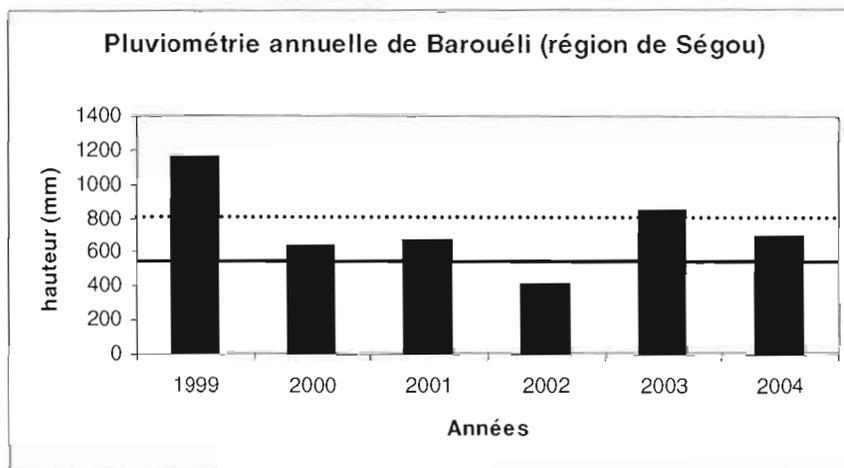
(1) : moyennes pluviométriques (PIRT, 1986)

(2) : données d'après Le Hourérou et Popov

(3) : les auteurs d'après diverses données

Des données agro-météorologiques des campagnes 1999 à 2004 recueillies au SLACAER, selon les pluies utiles de Barouéli, montrent la réalité de ces affirmations pour le cercle de Barouéli. La moyenne pluviométrique annuelle sur 6 ans est de 741 mm/an (voir tableau II). Pour ce qui est de la région entière de Ségou les moyennes compilées par « World Climate » entre 1936 et 1990 sont de 665 mm/an pour la pluviométrie et de 27.8 °C pour la température moyenne.

Figure 2.2 : SLACAER*



2.1.2 Contexte géologique

Le vieux continent africain couvre une trop grande superficie pour étudier son contexte géologique en entier et cela ne nous donnerait pas plus d'indice sur notre milieu. Pour nous donner un aperçu rapide, la carte géostructurale simplifiée de l'Afrique de l'Ouest est montrée à la figure 2.3. Celle-ci nous permet d'identifier l'unité structurale géologique de la zone d'étude : le Bassin de Taoudeni. Celui-ci est le plus vaste bassin de l'Afrique occidentale, puisqu'il mesure 1000 à 1500 km du nord au sud, de la dorsale Reguibate au massif libéro-ivoirien et de 1400 à 1750 km d'est en ouest depuis l'Adrar mauritanien jusqu'à l'Adrar de Iforas (Casenave et Valentin, 1989). Dans ces formations sédimentaires, il existe trois séries allouées au Précambrien A (900-1100 Ma) et au Cambro-Ordovicien : la première au Précambrien supérieur est gréseuse avec des calcaires à stromatolites. La deuxième est discordante sur la première et commence avec des tillites, ensuite des calcaires dolomitiques puis en alternance des pélites et des grès. La troisième, attribuée au Paléozoïque et en majorité à l'Ordovicien est constituée de grès et de quartzites. C'est cette dernière qui peut se

* Données agro-météorologiques des campagnes 1999 à 2004. Les pluies utiles pour la commune de Barouéli. Consultation au SLACAER (Service local appuis, conseils, aménagements, équipement rural à Barouéli). La ligne pointillée représente l'isohyète du secteur de référence de 1922-1980 (PIRT, 1983a). La ligne pleine représente la limite inférieure d'une région soudanienne Nord (TOURE, A. S. et al. 2000).

Selon Girard et *al.* (1998), le Bassin de Sikasso est un bassin subsident intracratonique d'âge Néoprotérozoïque. Il n'a subi aucun plissement. Les strates sont généralement subhorizontales avec une légère inclinaison de 1° à 5° vers le centre du bassin. Seulement quelques failles affectent la séquence. Elles sont le plus souvent orientées N.NE-S.SW et NW-SE. La séquence stratigraphique pour cette partie du Bassin de Taoudéni est présentée à la figure 2.4. Nous décrivons seulement les unités de cette séquence qui affleurent dans la zone d'étude, de la formation la plus vieille à la plus récente, les Fm de Kignan-Sotuba, les schistes de Toune puis les grès de Koutiala. La formation de Sotuba-Kignan est composée de grès très fins de couleur grise à rougeâtre en surface altérée, à ciment argilo-ferrugineux avec des niveaux de pélites rouges, de grès moyens à grossiers avec lentilles d'argile contenant de la glauconie, de grès moyens isogranulaires de couleur rose pâle et des passées conglomératiques (Girard et *al.* 1998). Vers le sommet, elle passe à une alternance rythmique centimétrique à décimétrique de grès de couleur pâle, rose à jaune et de pélites de couleur rougeâtre. Dans la région de Sikasso, la Fm de Sotuba-Kignan atteint les 150 m d'épaisseur.

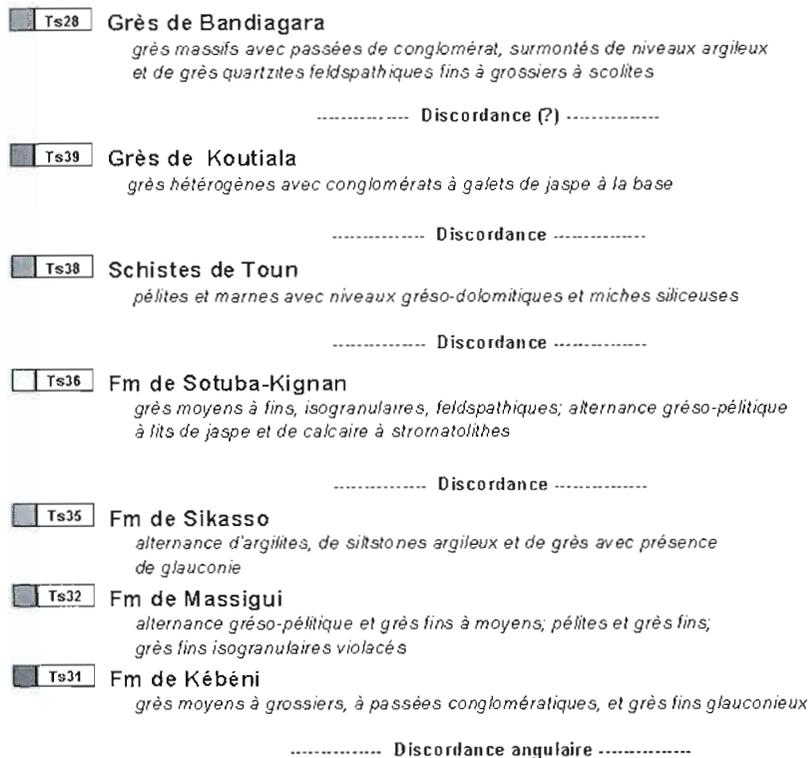
Pour faire suite, les Schistes de Toun sont constitués de pélites rouges et vertes, parfois calcareuses, avec des lits de grès micacés et des shales et/ou argilites très fissiles et des siltstones (Girard et *al.* 1998). Les lits de siltstones (0,5 à 1,0 cm) sont composés essentiellement de quartz. Vers le sommet de la formation, on observe des lits de 5 à 10 cm de grès quartzitiques bien triés à grains arrondis, moyens à grossiers et, localement, des passées calcaro-dolomitiques et des jaspes. La puissance des Schistes de Toun est évaluée à moins de 100 m par Palausi (1952) cité dans Girard et *al.* (1998).

Figure 2.4 : Bassin de Sikasso (Girard et al. 1998).

BASSIN DE TAODÉNI

Bassin de Sikasso

NÉOPROTÉROZOÏQUE



La formation disparaît vers l'ouest dans la région du fleuve Niger et les Grès de Koutiala reposent alors directement sur les grès de la Fm de Sotuba-Kignan. Les Grès de Koutiala sont composés de grès moyens à grossiers, parfois conglomératiques, à stratifications entrecroisées (Girard et al. 1998). Selon les mêmes auteurs, dans la région du plateau de Bandiagara, les grès à la base sont des quartzites bien triés à grains moyens arrondis. L'épaisseur des Grès de Koutiala varie entre 10 et 200 m dans la région de San (Palausi, 1959a) et entre 100 et 300 m dans la région du plateau de Bandiagara (Keita, 1984) cités par Girard et al. (1998).

Tout compte fait, la séquence stratigraphique du bassin de Sikasso montre un faciès dominant de grès. Alors, on peut conclure que les sols de la zone d'étude se développeront sur des grès. Par contre, il est aussi possible que localement les Schistes de Toun affleurent aussi ou que les sols soient sur la cuirasse (au Quaternaire).

Pour faire suite, voyons maintenant sur quels dépôts quaternaires le sol peut s'être développé. Le tableau 2.2 montre les différentes évolutions du milieu. Le Continental Terminal, formé par des dépôts à la fin du tertiaire (25 à 2 Ma), est représenté par des alternances d'argiles, d'argiles sableuses et de sables, intercalés de niveaux constitués par des graviers de quartz et d'horizons latéritiques argileux ou concrétionnés. Son épaisseur varie de 10 à 60 mètres (Condom, 2000). Au début de l'Holocène (10 ka), c'est une période humide: l'Atlanticum. Les fleuves Niger, Baoulé et la Volta Noire reprennent leurs activités et une grande superficie du Sahel est couverte de dépôts fluviatiles et lacustres. Le delta du Niger s'est alors formé. Sous ce climat humide, il y a eu ferruginisation dans les ergs récents. Au subboréal (5 ka à 2 ka BP) ce fut une période sèche. Les dépôts fluviatiles sont couverts par des sables éoliens. Le fleuve Niger s'assèche et la différence des niveaux entre les berges et la plaine argileuse augmente (Penning et *al.* 1982).

Nous avons vu dans les paragraphes précédents la géologie ancienne et récente. Ces informations nous ont permis de connaître sur quels dépôts sédimentaires les sols évoluent. C'est dans la prochaine section que nous aborderons le contexte pédologique et les grands ensembles de sols.

Tableau 2.2 : Périodes géologiques importantes avec leurs processus. La savane étant le soudanien. Adapté de Penning et *al.* 1982.

| Âges géologiques | Climat | Fleuves | Érosion | Types de formations |
|-------------------|--------|--|---------------------------------|---|
| Tertiaire | Humide | Actifs du sud vers le nord | Hydrique S -->N | Dans la savane: latérite |
| Würm | Sec | Néant | Éolienne N -->S | Ergs récents |
| Atlanticum | Humide | Actifs du sud vers le nord et ensuite un blocage par les dunes fait dévier les cours vers le sud | Hydrique S -->N et N -->S | Delta du Niger: Dépôts fluviatiles lacustres |
| Subboréal | Sec | ? | Éolienne N -->S | Couverture éolienne: limon/sable, dunes |

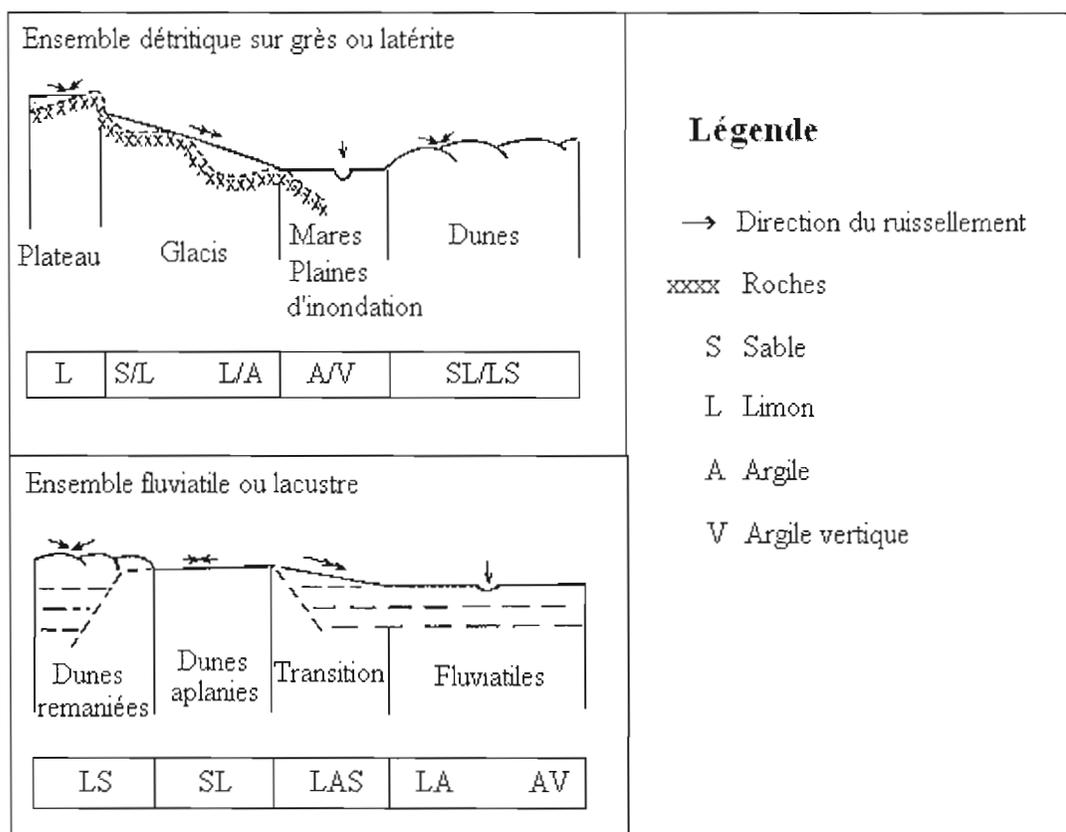
2.1.3 Contexte pédologique

De 2 Ka à aujourd'hui, le climat du soudanien est semi-aride (Penning et *al.* 1991). Puisque cette présente étude se fera dans la zone transitoire entre le Sahel et le Soudanien, alors l'ensemble détritique sur grès ou latérite et l'ensemble fluviatile ou lacustre (fig. 2.5) seront ceux que nous pourrons rencontrer.

Penning et *al.* 1982, ont décrit ces deux ensembles. L'ensemble détritique sur grès ou latérite se trouve dans les savanes de la zone climatique soudano-sahélienne. Celui-ci a développé des sols sur le grès ou la latérite. Ces sols sont rarement profonds. La plupart sont limoneux et peuvent être très hétérogènes et parfois, le ruissellement s'avère assez puissant ce qui provoque l'érosion hydrique. L'hétérogénéité se reflète aussi dans la végétation avec

des fourrés denses et des plages nues. Par ailleurs, des mares temporaires et des plaines d'inondations collectent l'eau qui stagne. Dans ces régions du Sahel (dans le sud) ou du Soudanien, les pentes sont faibles et orientées vers une direction principale. Le bassin versant de cet ensemble va comme suit : en amont, il y a un plateau, sur la pente nommé glacis, l'érosion est à son plus fort et dénude la roche mère. Au pied du glacis se trouve un bas-fond qui peut avoir la forme d'un oued, d'une mare ou d'une plaine d'inondation. En aval se forment des sols argileux et vertiques souvent hydromorphes. Il peut aussi y avoir une connexion avec les autres ensembles.

Figure 2.5 : Géomorphologie des unités principales de paysages au Sahel. Modifié de Penning *et al.* 1991.



Le troisième ensemble est le fluviatile ou lacustre. Ces sols se sont développés sur des sédiments fluviatiles ou lacustres, fossiles ou récents. Souvent, la texture est limono-

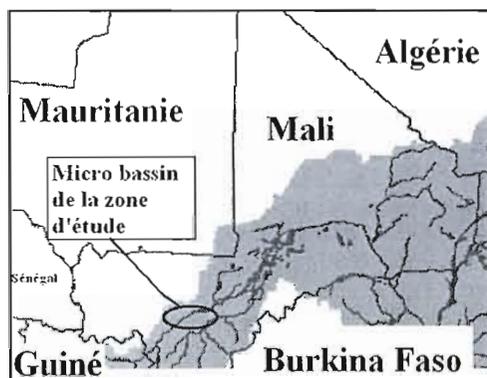
argileuse en profondeur et en surface plutôt limono-sablonneuse d'origine éolienne. En général, le relief est plat sauf pour les dunes qui ont des pentes de 1 à 3 % et des directions différentes. Le Delta central du Niger actuel fait partie de cet ensemble. Les grandes différences entre les sols du Delta actuel et le Delta fossile sont dues à l'hydrographie. C'est sur ces ensembles que la plupart des sols se développeront.

Pour compléter les éléments de théorie de la classification, il faut nommer les sols dominants du Mali : lixisols, arénosols, leptosols, luvisols et gleysols dans la BRM et leur équivalents dans la « Soil taxonomy » sont : alfisols, aridisols, entisols, inceptisols et ultisols. Alors que dans la classification CPCS, il s'agit de sols ferrugineux tropicaux, sols minéraux bruts, sols peu évolués, sols brunifiés et sols hydromorphes (Keita, 2002).

2.1.4 Contexte hydrologique et hydraulique

La région d'étude fait partie du Bassin du Niger (voir figure 0.14), plus précisément, la partie nord du cercle de Barouéli qui est limitée par le fleuve Niger. Les communes qui lui touchent sont : Boidié (zone d'étude), Tamani, Somo et Dougoufie. La partie sud-est du cercle est, quant à elle, limitée par le fleuve Bani qui passe aux frontières des communes de Gouendo, Sanando et N'Gassola. La région d'étude est drainée par le fleuve Niger. Sa situation géographique provoque des inondations partielles du terrain (D-IC SAHEL, 2002).

Figure 2.6 : Carte du Bassin du Niger (Aly, 2003).



En zone de savane sèche, trois variables peuvent expliquer significativement l'infiltration : le pourcentage de couvert végétal, l'activité faunique et la réorganisation de surfaces (Casenave et Valentin, 1989). Il est donc possible que le régime hydrique de ce bassin versant soit modifié par des facteurs de station (Duchaufour, 2001).

2.1.5 Contexte végétatif et faunique.

Pour cette partie, nous décrivons la végétation et la faune du Soudanien, puisque la végétation du Sahel présente est plus localisée. Ensuite, nous parlerons de la législation en matière de gestion des ressources forestières fauniques et halieutiques.

La zone soudanienne est le domaine de la savane. On y retrouve des formations herbeuses et des plantes ligneuses. Le développement du tapis herbacé s'accroît avec le gradient pluviométrique nord/sud et parallèlement les arbres sont de plus en plus grands. Donc, au nord on retrouve une savane arbustive et vers le sud une savane arborée. Le tapis herbacé de la savane est dominé par les graminées annuelles et pérennes (Toure et *al.* 2000). Dans les plaines, on rencontre des savanes arborées à boisées dominées par *Vitallaria paradoxa* (Karité) et *Parkia biglobosa* (nééré), *Andropogon gayanus* (abondantes dans les sols profonds et drainants (Casenave et Valentin, 1989) et *Andropogon pseudapricus*. Dans les fentes ou crevasses de la roche s'installent des espèces ligneuses comme *Euphorbia sudanica*, *Adenium obesum* (le petit baobab de la brousse), *Sarcostema viminalis*, *Cissus quadrangularis*, *Senecio cliffordianus*, etc. Dans les lieux humides et ombragés se développent des espèces hygrophiles et sciaphiles : *Clerodendron capitatum*, *Wissadula amplissima*, *Begonia chevalieri*, *Adiantum lunulatum*, *Selaginella versicolor* (Toure et *al.* 2000).

Plusieurs plantes et arbres sauvages constituent des sources régulières d'alimentation et de médication. Des espèces importantes sont présentes dans la zone. Le Baobab (*Adansonia digitata*), le *Boscia senegalensis*, le karité ou *shii* en Bambara (*Vitallaria paradoxa*), le nééré (*Parkia biglobosa*), le Saba (*Saba senegalensis*), le tamarinier ou *n'tomi* en Bambara (*Tamarindus indica*), le n'pékou (*Lanea microcarpa*), le sébé (*Borassus*

aethiopium), le n'gunnan (*Sclerocarya birrea*, le n'taba coumba (*Detarium microcarpa*, le n'gokou (*Nymphaea sp*), les graminées sauvages comme *Panicum laetum*, *Cenchrus biflorus* ou *noronan*, *Eragrostis pilosa*, *Echinochloa stagnina* ou bourgou, etc.), les rhizomes appelés n'guéni (*Cyperus rotundus*), les feuilles de plusieurs espèces de *Corchorus* (fakouhoï en sonrhaï) (Toure et al. 2000).

Pour ce qui est de la faune soudanienne, grâce à sa végétation et à ses ressources en eau relativement abondante à cause du fleuve Niger, elle est assez diversifiée. Par ailleurs, dans la zone il existe plusieurs insectes nuisibles aux hommes, aux animaux et aux végétaux : simulies (vecteur de l'onchocercose), mouches tsé-tsé (vecteur de la trypanosomiase), les ravageurs de culture : criquet puant (*Zonocerus*), moucheron du sorgho, méloïdés, cétoïnes et papillons (les chenilles phytophages attaquant les arbres fruitiers) et plusieurs hémiptères, ravageurs des malvacées et du cotonnier : *Aphis gossypii*, *Lygus vosseleri*, *Disdercus spp.* (Toure et al. 2000)

La gestion de ces ressources naturelles est extrêmement complexe. Malgré la législation, plusieurs forêts à travers le Mali dont celles situées à proximité de la ville de Ségou subissent une forte pression anthropique causée par la forte densité des populations. De même, certaines forêts du Cercle de Barouéli (cercle de la zone d'étude) commencent à être occupées sur leurs bordures, dans les zones favorables aux cultures (D-IC SAHEL, 2002). Plusieurs forêts sont menacées par la pression agricole très élevée à excessive dans toute la région. Aucune activité d'envergure n'est menée dans ces forêts depuis trop longtemps et leur situation est redevenue préoccupante.

2.1.6 Contexte culturel.

Dans les cultures céréalières du Mali, on distingue par ordre d'importance, le mil (*Pennisetum glaucum L*), le sorgho (*Sorghum bicolor*), le riz (*Oryza sp*), le maïs (*Zea mays*), le blé (*Tricum*), l'orge (*Hordium*) et le fonio (*Digitaria exilis*). Bien sûr, on y fait aussi la culture de l'arachide (*Arachis hypogea*) et du niébé (*Vigna unguiculata*). Pour plus de détails il faut se référer à Toure et al. (2000) ou à l'appendice A. Par ailleurs, la culture vivrière est

également présente surtout dans les fédérations organisées. On y cultive les plantes amylacées (la pomme de terre, la patate douce, l'igname, le manioc, le pois sucré), les plantes à épices (le gingembre, le piment, l'anis, le cumen), les plantes légumières (l'oignon, la tomate, le chou, la salade, le haricot vert, l'aubergine, le gombo, le melon, le concombre, l'amarante (boron, en bamanan), l'échalote, la courge, l'ail, la pastèque, le poivron, la laitue, le basilic, le persil, le poireau, etc.) et les arbres fruitiers comme le manguier, les agrumes, le bananier, l'anacardier, le goyavier, la pomme cannelle, le papayer, l'ananas et le grenadier. De plus, un important facteur économique du Mali concerne les plantes industrielles dont la principale est le cotonnier (*Gossypium malvacearum*). De plus, le dah (*Hibiscus cannabinus*), la canne à sucre (*Saccharum officinarum*), le tabac (*Nicotina sp*), les théiers (*Camelia sinensis*) et certaines plantes tinctoriales peuvent être cultivés localement (Toure et al. 2000).

2.1.7 Contexte agropastoral.

L'agropastoralisme au Mali est très important dans le contexte de gestion des terres. L'élevage et l'agriculture ne vont pas toujours bon train ensemble. Plusieurs problématiques sont causées par l'élevage et celles-ci sont des facteurs de contrôle de l'érosion hydrique : le passage des troupeaux (nombre de têtes excessif pour le territoire disponible et absence d'aménagement territorial), l'élevage extensif (le vagabondage), brisure du cycle des jachères, problèmes territoriaux, compaction et perturbation de la structure du sol et diminution du couvert végétal. De plus, l'utilisation des points d'eau peut être problématique. Par ailleurs, la culture fourragère n'est pas encore très utilisée au Mali. L'élevage extensif est le plus fréquemment employé alors le bétail se déplace de zone en zone pour suivre les pâturages ou pour vagabonder dans la savane ou dans les champs, ce qui cause des problèmes sociaux entre agriculteurs et éleveurs.

2.2 Étude préliminaire.

L'étude préliminaire s'est faite presque entièrement au Mali. Utiliser une bonne méthode dans cette étape peut être cruciale dans la collecte des données et les résultats envisageables. Dans cette section, nous définirons et caractériserons le secteur de référence.

Ensuite, les grands traits de sites visités seront montrés. Puis, la méthode d'échantillonnage et celle de la cartographie seront expliquées.

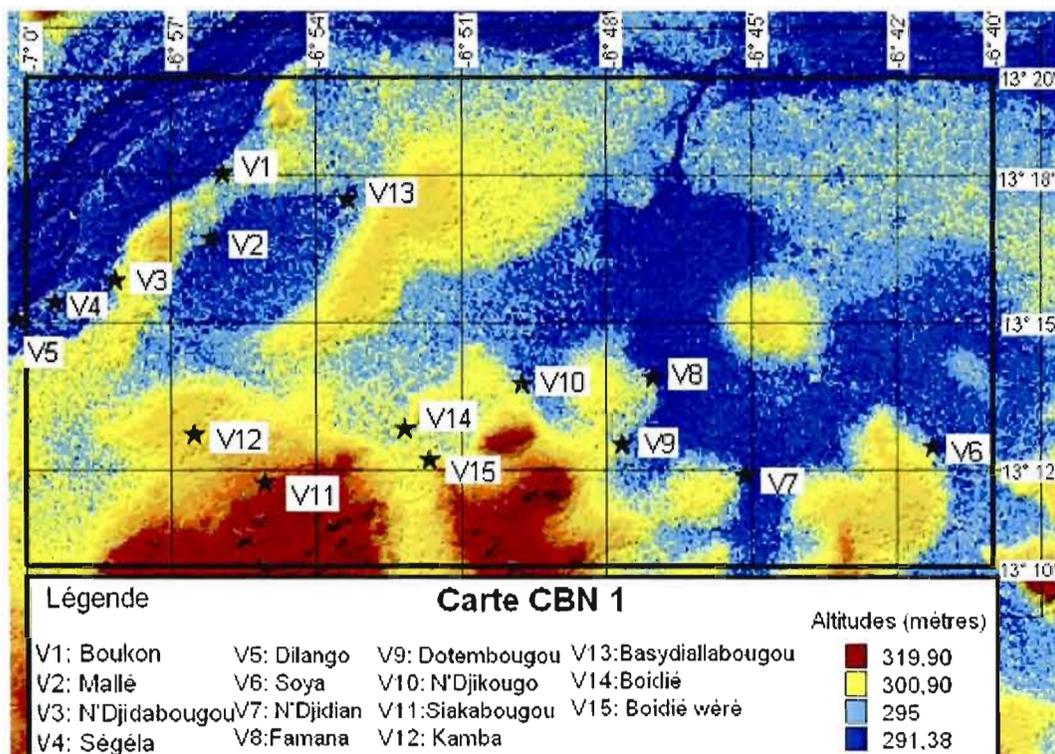
2.2.0 Définition d'un secteur de référence (Unités naturelles de terrain).

Le secteur de référence est un pédopaysage type qui regroupe les différentes unités cartographique de sol qui sont adaptées aux types de paysages intégrant géomorphologie, végétation et sol. Il nous sera très utile de cartographier une surface étendue comme un bassin versant. Le secteur de référence, représentatif de la région étudiée, nous renseigne sur les composantes écologiques du milieu et sur ses processus intrinsèques. Les forestiers le définissent comme « massifs pilotes », les agronomes comme « secteur de référence » et les pédologues comme « unités naturelles de terrain » (Duchaufour, 2001). On peut également s'en servir pour faire des projections et ainsi rapporter ce secteur de référence à d'autres surfaces limitées du bassin versant en vérifiant ses composantes bien sûr.

2.2.1 Localisation et choix du secteur de référence.

Le secteur de référence s'étant très bien superposé à la zone d'étude, nous utiliserons ce titre littéraire pour décrire les deux à la fois. Comme on peut le voir à la figure 2.7 de la carte CBN1, l'étude préliminaire s'est faite dans 15 villages de la commune de Boidié. Pour bien connaître la zone, trois visites de sites par village ont été faites avec la participation des leaders de la fédération paysanne de Dobenkan et plusieurs paysans et/ou agriculteurs intéressés. La zone d'étude (donc, le secteur de référence) a été établie selon la participation des paysans et leur intérêt ce qui met l'accent sur le niveau intégré de la recherche. En effet, nous avons pu remarquer la confiance que les gens nous donnaient, ce qui nous a permis d'avancer plus rapidement et de recueillir plus d'informations. Par ailleurs, le secteur de référence présentait une grande diversification du milieu et une grande représentativité de la région.

Figure 2.7 : Carte CBN1, secteur de référence de l'étude.



Le secteur de référence se situe au Mali, dans la région de Ségou, à l'intérieur du cercle de Barouéli aux environs de la commune de Boidié. Ses coordonnées sont 13° 10' à 13° 20' pour l'axe nord-sud et 7° 0' à 6° 40' pour l'axe est-ouest (fig. 2.7 et app. F, photo 26). Ce qui fait une largeur de 18 km et une longueur de 36 km, pour une superficie totale de 648 km². Sa localisation géographique stratégique est important dans l'approche de cette recherche. Premièrement, le secteur de référence se situe dans le bassin versant du fleuve Niger. Dans une certaine mesure, les sols évoluent et se distribuent semblablement. Si l'on reste dans le même domaine géologique et pédologique cette étude pourrait se reproduire relativement avec succès. Deuxièmement, il est à la limite sud du Sahel. Donc, plusieurs symptômes de fragilité se font ressentir dans cette région : la désertification, la sensibilité aux changements climatiques, la faiblesse économique, les fortes érosions etc. Ces symptômes montrent la grande vulnérabilité que plusieurs pays en développement portent. D'où l'importance de cette recherche à cet endroit précis.

La visite préliminaire de sites nous a permis de souligner et de mettre l'accent sur certains de ces symptômes. Voici la synthèse des visites de sites de 15 villages.

2.2.2 Description des sites d'étude

Les villages qui ont été étudiés ont servi de base pour la campagne d'échantillonnage et ont énormément aidé à la compréhension globale du secteur de référence. Ces villages sont représentés dans la carte CBN1 par la lettre V (pour village) accompagné du chiffre qui indique l'ordre dans lequel les villages ont été explorés. Nous avons divisé les visites du secteur de référence en trois zones. La zone de Mallé (V1 à V5) à l'ouest, la zone de Soya (V6 à V10) à l'est et de la zone de Boidié (V11 à V15).

Les visites de la zone de Mallé ont débuté avec l'étude du village de Boukon (V1). Nous avons remarqué une évidence d'érosion linéaire. Le ravinement se forme inévitablement des talwegs vers les plateaux ou les sommets des petites collines. La Ligne de fond de la vallée, où se dirigent les eaux de pluie est un marigot temporaire, c'est-à-dire un bras mort du fleuve Niger qui se remplit en saison des pluies par débordement de ce dernier. Les ravins peuvent atteindre 1 à 2 mètres de profondeur. Les systèmes de culture sont représentés par des cultures de mil sur les plateaux et sur les pentes tandis que dans les dépressions, on remarque la culture de riz pluvial. Ensuite, nous sommes allés à Mallé (V2). Le village est situé à quelques mètres à l'est du sommet d'une colline. La pente générale se déploie vers le bras mort du fleuve au nord et également vers le village de Boukon. Par conséquent, une mauvaise gestion du ruissellement de la part des paysans de ce village pourrait causer de l'érosion à Boukon et ainsi créer des problèmes sociaux entre les deux villages. Sur la petite colline, il est possible de voir que ce modelé géomorphologique de pente générale vers le nord, entrecoupée de petits vallons et créant une alternance de sommets/bas fond d'ouest en est, se reproduit dans le secteur de référence. La position du village suivant a été prise à la borne de 1935 (13 15 782 N et 6 58 223 W). C'est la borne apposée par les colonisateurs français qui représente la frontière entre la région de Ségou (représenté par le village de N'Djidabougou (V3)) et celle de Koulikoro. Le village se situe dans un bas fond très près de la plaine inondable du fleuve Niger qui est un peu plus au N-O.

L'eau de ruissellement provient de la colline au N-E qui se prolonge vers le S-O. Donc, il y a un ruissellement étendue (la nappe d'eau s'écoule du S-O au N-N-O) qui frappe ce village créant une forte érosion. En effet, nous avons estimé la perte de sol à l'aide de la borne. Donc, en 69 ans, le sol a perdu 37 cm de terre. En descendant plus au sud-ouest, nous sommes arrivés au village de Ségéla (V4). L'érosion dominante est très évidente. L'érosion des berges est une problématique inquiétante pour le village depuis déjà trop longtemps (app. F, photo 3). De nombreuses activités de conservation des berges ont été réalisées, mais sans succès. Les villageois ont estimé le recul de la berge d'un mètre par année. Certaines maisons ont déjà été emportées. Le processus d'érosion évolue selon trois modes. Dans un premier temps, lors des grandes crues en saison des pluies, le niveau du fleuve varie de sept à cinquante centimètres de hauteur (ORS, 2003-04). De plus, en saison des pluies le niveau du fleuve grimpe d'environ un mètre. Alors, il y a un sapement stupéfiant de la berge (Arrignon, 1987 et Roose, 1994). Le sapement est accentué par la localisation selon les courants et par la pression interstitielle de l'eau dans le sol. En effet, le village semble se situer dans la ligne de plus grande vitesse du fleuve (sur la rive concave du Niger) où l'érosion est forte. Deuxièmement, il y a écoulement boueux (mouvement de masse). Dans un troisième temps, l'érosion linéaire qui progresse des berges vers les hauts de la pente favorise l'érosion en bloc et augmente la vitesse d'érosion par les crues. Soit un peu à l'ouest du secteur de référence, nous ne pouvons passer à côté du village de Dilango (V5). Ce village a été choisi pour l'étude détaillée de 81 ha pour représenter la station d'étude du secteur de référence. On a pu noter l'érosion des berges comme à Ségéla, l'érosion en nappe très visible dans les champs en amont du village, des sols d'érosions aux alentours du bras mort du fleuve, une jachère de cinq ans, bref une bonne diversité pour l'étude détaillée de la station.

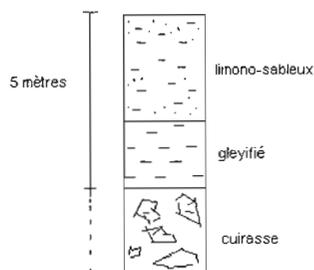
Plus tard, nous sommes allés du côté est du secteur de référence (zone de Soya) pour étudier le village de Soya (V6). L'érosion linéaire avec ensablement a été observée, ce qui nous donnait un indice de changement de type de sol. En effet, nous avons noté une variation de sol très sableux à sablo-graveleux (concrétions ferrugineuses) et sablo-limoneux. Du côté S-S-E, il y a un marigot, le fleuve est du loin vers nord, mais nous fait signe de présence par la prolongation de la plaine inondable un peu plus au nord. Cette plaine inondable se distingue par la présence de sols hydromorphes (argileux, dessiccation présente). La pente

générale est toujours vers le nord et un plateau (cuirasse latéritique) au S-O provoque un ruissellement vers le N-E. Le savoir traditionnel au village sur la fertilisation des sols est très intéressant. Les caractéristiques pédologiques du milieu sont mises à leur avantage. Nous savons que les sols sableux de cette zone subissent une érosion sélective (sect. 1.2.5). Les champs de culture après un certain temps sont caractérisés par un déficit en argile. Ce qui rend l'ajout de fumure presque inutile. Alors, les paysans vont chercher de l'argile dans les dépressions à sols hydromorphes pour l'ajouter à leur champ avec la fumure. Ceci est possible étant donné la proximité des types de sols. Dans le village de N'Djidian (V7) situé plus à l'ouest, deux faits sont à noter. Premièrement, il y a de l'érosion linéaire causant des ravins et la plaine inondable est présente à quelques mètres du village. Les paysans ont pris soin de nous informer qu'il y a eu des barrages de rétention d'eau construits par les colons pour effectuer l'irrigation des terres. Par contre, plusieurs problèmes techniques, économiques, sociologiques et environnementaux ont causé la perte de ces barrages. Par conséquent, ils n'ont pas été entretenus et un ensablement s'est développé. Au village de Famana (V8), les connaissances importantes des paysans sur les sols nous ont permis d'interpréter sans étude approfondie l'unité pédologique présente. Le type de sol établi est le sol ferrugineux lessivé sur cuirasse latéritique. La cuirasse est à 0.5 mètre en haut de la pente et jusqu'à 1,5 mètres de profondeur en bas de pente. L'érosion linéaire y est également visible et le processus de lessivage des sols peut être soupçonné comme fort. Plus loin à l'ouest, le village de Dotembougou (V9) nous intéresse par sa diversification de processus. Nous notons la présence de l'érosion linéaire derrière la parcelle maraîchère du chef de village et aux berges du marigot temporaire. Vers l'est, nous remarquons des sols hydromorphes hors plaine inondables. Par ailleurs, l'érosion en nappe est très forte vers Barouéli. Donc, nous avons deux sols de la toposéquence le sol limono-sableux derrière le champ de pastèques (Bambara : sèrè) du chef de village et le sol hydromorphe. Le passage du village de N'Djikougo (V10) nous a redonné espoir. En effet, sur le chemin entre Famana et N'Djikougo une belle petite forêt ouverte rafraîchit l'air, nous montre plusieurs espèces d'oiseaux et semble contrôler les problèmes d'érosion.

La troisième zone étudiée est celle de Boidié. Les limites du village de Siakabougou (V11) ont été élargies jusqu'aux collines au sud du village pour que l'on se représente bien le

milieu. Nous avons également visité des mines traditionnelles de kaolin qui nous ont permis de reconstituer la stratigraphie géologique de la région. De plus, sur la colline et les pentes de la colline, il y a une forêt arbustive à épineux dominant et de la cuirasse latéritique qui affleure. Malheureusement, à plusieurs endroits sur la colline des trous effondrés gisent sur place et une grande déforestation est conséquente à l'exploitation du kaolin. L'effet de cette exploitation est évident sur érosion linéaire élevée en aval de la colline. Les paysans nous ont rapporté que l'eau prend sa source dans la colline et qu'elle descend vers le village avec force pour créer un ensablement. Par ailleurs, la photo 13 (app. F) montre après une pluie l'effet de l'érosion sélective sur des sols sablo-limoneux. Dans le village de Kamba (V12) quatre sondages représentatifs de sols ont été faits. À l'Arrêt 1 : nous notons que le système agraire est diversifié. Dans les champs de cultures, il y a du sorgho, des pastèques, du fonio et du mil. Suite à des travaux de creusage de puits, les paysans savent l'horizonation du sol (figure 2.8). C'est une horizontalité parfaite d'un sol ferrugineux tropical lessivé sur cuirasse latéritique (sect. 2.4.2). Il y a une petite forêt où l'on ne peut cultiver puisqu'en saisons des pluies, l'eau est trop présente. Par ailleurs, l'horizon B argilique explique le régime d'hydromorphie et la présence de mares temporaires.

Figure 2.8 : Coupe du sol à Kamba.



À l'Arrêt 2, nous visitons une mare temporaire sur un terrain hydromorphe imperméable. La mare peut atteindre trois mètres de profondeur en saison des pluies. L'érosion en nappe est la plus visible à cause du terrain plat. Des essais de puits ont été faits et la nappe est à 20 mètres, donc en saison sèche l'eau n'est pas accessible. À l'Arrêt 3, ce sont des sols ferrugineux à concrétions et des sols graveleux qui dominent. Dans ces sols l'érosion linéaire est visible. À l'Arrêt 4, les sols sableux à sablo-limoneux sont représentés

où il y a souvent du ravinement. En dessous du sol sableux, il y a pour eux aussi une couche argileuse.

Pour ce qui est du village de Basydialabougou (V13), ils nous ont fait déplacer aux coordonnées 13 19 002 N et 6 55 347 W pour voir le surpâturage. Les troupeaux de bétail sont dirigés en ce lieu pour s'abreuver. Les conséquences sont frappantes : déboisement, augmentation de l'érosion en nappe et linéaire (ravins pouvant atteindre un mètre de profondeur), puis pour couronner le tout la dégradation et l'érosion des berges. De plus, les chemins de passages des animaux forment des chemins préférentiels pour l'eau. Les villages qui font abreuver le bétail à ce marigot sont Bokon, Mallé, Basylla, Konewèrè et les types de sols de la région sont les sols graveleux, les sols ferrugineux avec concrétions sur cuirasse latéritique et les sols alluviaux près du bras mort.

Le village de Boidié (V14) nous a amené à comprendre le déplacement spatio-temporel des sédiments de surface en région tropicale. Nous avons pu vérifier la différence de fertilité du sol érodé (sable d'accumulation; photo 14a, app. F) du sol en place. En effet, des dépôts de sables massifs d'érosion étaient superposés à des sables pseudo-indurés montrant un régime d'écoulement par des topsets que l'on peut voir à la photo 14.b (app. F). Ces dépôts reposaient sur des sols hydromorphes. Ailleurs, il y avait des sols sableux et des sols limoneux. Nous avons pu observer l'effet positif d'une jachère de trois ans et malheureusement l'inefficacité d'une haie vive de « chindjaba » mal disposée ne réduisant pas l'érosion linéaire. Finalement, nous sommes allés au village de Boidié Wèrè (V15). Nous y avons remarqué beaucoup d'érosion linéaire et d'ensablement. À la photo 13 (app. F), c'est une démonstration de l'érosion sélective après la pluie. Montrés par les flèches : l'argile, la matière organique et les accumulations de fer représentent la partie plus foncée tandis que le sable est représenté par la couleur la plus pâle.

2.2.3 Échantillonnage et cartographie

Un des objectifs spécifiques de cette recherche est d'améliorer la documentation pédologique disponible au Mali en réalisant des cartes à échelle moyenne de 1/55 000. Ces

échelles sont généralement destinées à dégager les lois fondamentales de la répartition écologique des sols. Bref, elles servent de base à la recherche (Duchaufour, 2001). Dans notre cas, c'est pour dégager les grandes orientations de la mise en valeur de la région face au problème de l'érosion en nappe.

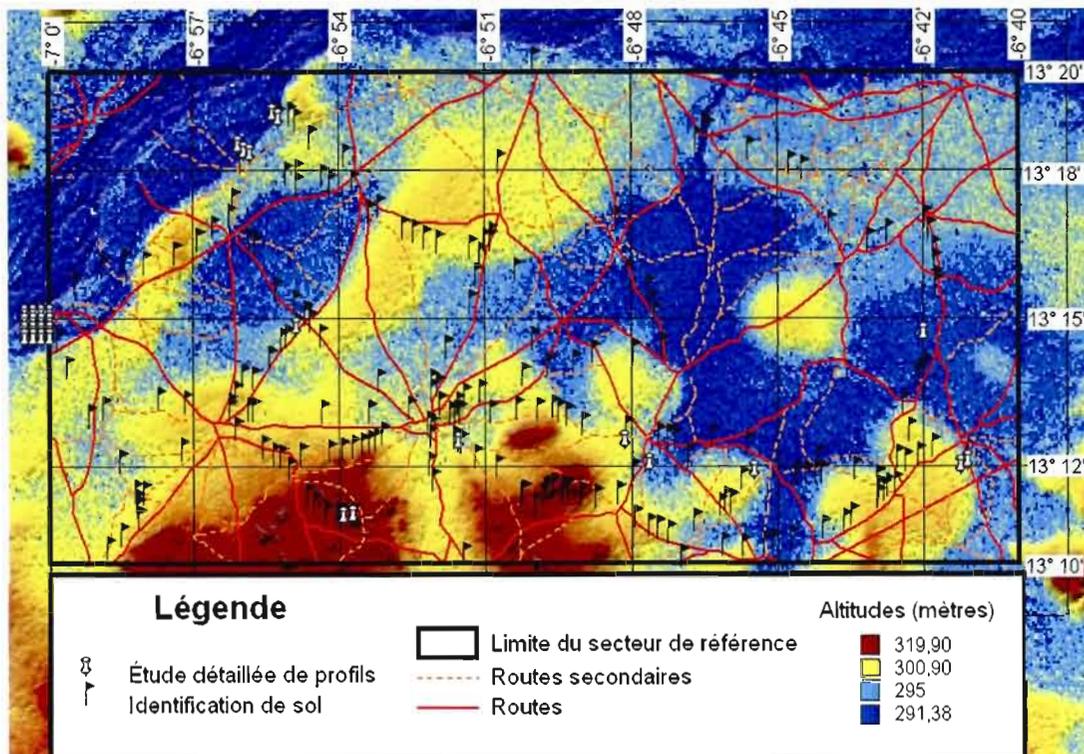
Tout d'abord, il faut caractériser le milieu en faisant un inventaire des unités cartographiques et des pédopaysages en intégrant la géomorphologie, la végétation et le sol (Duchaufour, 2001). C'est ce qui a été fait dans la section visite de sites. Malheureusement, il n'est pas toujours possible de cartographier une grande superficie, car le temps est limité et les moyens sont réduits. Alors, il faut choisir une surface d'étendue plus petite (dans notre cas 81 ha) pour connaître les facteurs de station d'un système d'érosion pour compléter la cartographie de la grande surface par interprétation et connaissance du milieu. Alors la petite surface (indispensable pour comprendre le système d'érosion; sect. 2.5.2 et fig. 2.12) sera l'étude détaillée de Dilango qu'on appellera la station. La grande surface à cartographier sera nommée le secteur de référence. Pour cette dernière, il est nécessaire de faire une bonne description de l'environnement : conditions du climat local, la géologie et la géomorphologie (nature et épaisseur des formations superficielles, en relation avec le relief), les conditions locales de drainage et d'hydrologie. De plus, le mode de mise en valeur du sol doit être pris en compte ainsi que la végétation permanente, les plantes indicatrices, le pH, le type d'humus et l'aération (Duchaufour, 2001).

La prospection sur le terrain nécessite l'établissement d'un réseau plus ou moins dense d'observation. Il faut faire des fosses pédologiques (1m de profondeur par 2 m de largeur). Il est important de se fier à la complexité du paysage et le degré de précisions souhaités pour dicter la densité des observations. Pour l'étude de la station, nous avons utilisé une méthode décrite par LEGROS (1996) (cité dans Duchaufour, 2001) : la grille à mailles régulières. Nous avons donc pris un échantillon par maille (cette méthode sera expliquée plus en détail dans la section système d'érosion). Pour le secteur de référence, nous avons utilisé la méthode de la « cartographie raisonnée » (Duchaufour, 2001) qui est la mise en évidence des corrélations « géomorphologie-sol-végétation ». Pour le secteur de référence, nous avons donc fait 18 profils types (fig. 2.3), soit 18 études de profil détaillées.

En effet, pour chaque horizon, nous avons étudié rigoureusement les points suivants : la texture, la présence de cailloux, la couleur selon le code Munsell (préciser la couleur des taches, formes, dimensions, fréquences et limites), la structure, la consistance, la porosité, l'enracinement (densité, dimension, orientation, racines fines absorbantes), l'effervescences au HCl (nulle, instantanée, progressive, lente), les transitions entre les horizons (brutale, progressive, sinueuse ou rectiligne) et bien d'autres (app. C et D). De plus, nous avons identifié, à l'aide d'un GPS sur le terrain, les sols de 213 arrêts (fig. 2.9) en vérifiant à quelle unité de sol ils appartenaient.

En conclusion, nous pouvons affirmer que la prospection pédologique a été concluante étant donné le grand nombre de vérifications sur le terrain. Par ailleurs, pour les secteurs non identifiés (sur la figure 2.9 ce sont les zones sans drapeau), nous avons estimé qu'il n'y était pas nécessaire d'y accorder une attention soutenue. En effet, le support cartographique dont nous disposions, nous permettait d'interpréter avec justesse le type de sol qui y était présent. Prenons l'exemple de la plaine inondable qui a déjà été cartographiée et délimitée par les colons français. Quelques visites nous ont convaincu de l'homogénéité pédologique de la plaine. Bref, il faut noter que nous avons recueilli une grande quantité de données et un bon nombre d'échantillons qui ont servi aux analyses de laboratoire. Dans la prochaine section, nous verrons la description de ces analyses.

Figure 2.9 : Lieu d'identification de sol et d'échantillonnage dans le secteur de référence.



2.3 Description des analyses

2.3.0 Méthodes d'analyse

Les données recueillies sur le terrain servent à plusieurs analyses. L'analyse météorologique est faite à l'aide de cueillette de données pluviométriques. Celles-ci ont été fournies par le SLACAER pour les pluies utiles de la commune de Barouéli pendant les campagnes de 1999 à 2004. Ce traitement de données sera plus explicite à travers le chapitre III dans la paramétrisation du modèle RUSLE2. L'analyse de la toposéquence et de l'agencement « sol-végétation » a pu être faite grâce aux données géomorphologiques du terrain, des caractéristiques physiques des sols, des régimes hydriques et des études d'indicateurs végétaux (app. C et D).

Dans un autre ordre d'idées, les analyses en laboratoires sont nécessaires à la compréhension de l'évolution des sols tropicaux. Nous avons fait les analyses suivantes : dispersion (ultrasons, destruction de la matière organique, à l'hexamétaphosphate de sodium et traitement des terres riches en sesquioxydes de fer et d'Al), granulométrie, pH, absorption atomique, diffraction aux rayons-X, exoscopie des grains de quartz, carbone total, azote total et phosphore total. Ces analyses seront décrites d'une part en expliquant leur but, d'autre part en développant d'une manière détaillée la méthode utilisée. Tous les résultats seront présentés au chapitre III.

2.3.1 Analyse de dispersion

L'analyse de la dispersion a été faite dans le but de vérifier s'il y avait des oxyhydroxydes. De plus, l'analyse de la dispersion sert à vérifier l'efficacité des prétraitements pour l'analyse granulométrique (Duchaufour, 2001; Mathieu et Pieltain, 1998). Les méthodes de dispersions ont été faites seulement sur cinq échantillons : les fiches 2, 4, 5, 8, 10 (app. C et Chap. III). Tous les tests font références à Mathieu et Pieltain (1998) qui ont été basés sur les normes internationales d'analyses. Le « test 1 » consiste à faire une dissolution dans l'eau distillée et réaliser une dispersion aux ultrasons. Le « test 2 » est une destruction de la M.O. tandis que le « test 3 » est la dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium. Finalement, le « test 4 » est un traitement des terres riches en sesquioxydes de fer et d'Al. Après chaque test nous avons recueilli les liquides surnageants pour ensuite les filtrer sous vide à 0.45 microns. Puis, 100 mL de solution était conservé au réfrigérateur à un pH 2 pour analyser les éléments en solution par l'absorption atomique. Les résultats de ces analyses sont présentés au chapitre III.

Puisque Mathieu et Pieltain (1998), conseillent de faire un prétraitement aux sols riches en sesquioxydes, nous avons vérifié l'efficacité de chacun d'eux. À cette étape, avant de passer à l'analyse granulométrique, nous devons savoir quels prétraitements seraient nécessaires. Nous avons conclu à travers ces analyses que le test 4 combiné au test 1 sont nécessaires pour le prétraitement de l'analyse granulométrique à l'état trempé.

2.3.2 Analyse Granulométrique

Le but de l'analyse granulométrique est de définir le facteur K des sols étudiés. Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, l'érodibilité du sol varie en fonction de la texture. Alors, pour utiliser le modèle RUSLE2 nous devons faire cette analyse. Par ailleurs, l'analyse nous servira à faire des corrélations qui nous aideront dans la compréhension de l'évolution des sols tropicaux.

L'analyse granulométrique de sols tropicaux n'est exacte qu'avec les prétraitements nécessaires (Duchaufour, 2001). Comme nous l'avons vu dans les sections 2.3.1 et 2.3.2 ces prétraitements ont été faits avant l'analyse granulométrique de tous les échantillons. Puis, nous avons fait une analyse trempée avec une série de tamis. Les tailles granulométriques nécessaires sont celles utilisées par l'USDA (tab. 2.3) puisque nous utiliserons ces données avec le modèle RUSLE2.

Tableau 2.3 : Tailles granulométrique utilisées par RUSLE2 et mailles (adapté de Foster et al. 2002)

| Classes texturales | Diamètres (mm) | ASTM | Tyler (mesh) |
|---------------------------|------------------------|-------------|---------------------|
| argile | $x \leq 0.002$ | | |
| limon | $0.002 < x \leq 0.045$ | | |
| sable très fin | $0.045 < x \leq 0.1$ | 325 à 140 | 325 à 150 |
| sable grossier | $0.5 < x \leq 1$ | 35 à 18 | 32 à 16 |
| sable | $0.045 < x \leq 2$ | 325 à 10 | 325 à 9 |
| gravier | 2 à 70 | 10 ... | 9 ... |
| cailloux | 70 et + | | |

Nous avons ensuite séparé les limons et les argiles avec la technique de sédimentation de 7 heures (Mathieu et Pieltain, 1998). Les résultats seront ensuite compilés pour élaborer des « profils types ». Ceux-ci pouvant se différencier pour certains par les différences texturales. C'est ce que nous verrons à travers les résultats de l'analyse statistique.

2.3.3 Analyse du pH

Le test de pH est très important dans la dynamique des nutriments des sols tropicaux (voir sections 1.2.4 et 1.3.4). De plus, les sols tropicaux ont souvent des problèmes d'acidité. Une gestion durable des sols tropicaux n'est possible qu'avec un contrôle de l'acidité (Roose, 1994).

La méthode que nous avons choisie pour l'analyse du pH est celle conseillée pour les sols agraires tirée de Henderson et *al.* (1993). Dans cette procédure, le ratio sol/solution ne modifie pas le pH. De plus, la méthode ne montre aucune différence de pH détecté entre le sol mouillé et le sol séché. La prise de la mesure a été faite avec le pH mètre: « pH meter 430 Corning » (Corning, 2005).

2.3.4 L'absorption atomique

L'analyse par absorption atomique a été faite dans le but de montrer la concentration en bases échangeables dans la solution des sols après dispersion. En effet, la combinaison de l'analyse de dispersion et de l'absorption permet d'estimer le lessivage possible des sols et de sa dynamique.

L'absorption atomique permet le dosage des métaux et sels en solution. Nous avons utilisé la procédure d'absorption atomique à la flamme pour des gammes de concentration de l'ordre du mg/l, ppm. Sur l'appareil de modèle 906AA de marque GBC, il comprend les options suivantes pour l'atomisation à la flamme: brûleur air - acétylène et brûleur protoxyde d'azote - acétylène. Les solutions de sols ont été préparées selon la description méthodologique dans chacun des tests de dispersion. Le processus de filtration sous vide pour nos types de sols étant long, nous avons dû faire un nombre restreint d'analyse. En effet, nous nous sommes attardés aux sols « types » (Fiche 2 = T14; fiche 4= PL10; fiche 5=TH3; fiche 8=DA5 et fiche 10=TC4). Ces sols représentent également un intérêt pour l'évolution des sols dans leur position topographique. Ainsi, les résultats de ces sols seront extrapolés relativement à chacun des sols de leur unité et selon l'évolution de la toposéquence. Nous avons donc fait les analyses de l'aluminium (Al), du fer (Fe), du

magnésium (Mg), potassium (K), calcium (Ca) et manganèse (Mn). La lecture des concentrations étant en ug/mL elle doit être convertie en ppm. Un exemple est fourni dans l'appendice A, calcul 1.

2.3.5 Radiocristallographie (diffraction-X)

L'analyse au diffractomètre permet d'acquérir beaucoup de connaissances sur l'évolution et les caractéristiques intrinsèques d'un sol. En effet, elle est l'une des méthodes les plus utilisées pour identifier les minéraux. Elle est surtout utilisée pour l'identification des minéraux argileux, en raison de leur taille se situant en dessous 0,1 micron. La méthode est basée sur la loi de Bragg utilisant les distances interatomiques de chaque minéral analysé. Le diffractomètre en est la représentation graphique. Le diffractomètre est un appareil de la compagnie SIEMENS, modèle D5000 et le détecteur est de type PSD (Position Sensitive Detector) avec une fenêtre de Be.

L'analyse a été faite pour les argiles des sols « types » (fiches 2, 4, 5, 8 et 10) et pour les roches des fiches R1, R2, R3, R4, R5, R6, R9 et R11-12-Hc. L'analyse du socle rocheux comparé aux résultats de l'analyse des argiles nous permettra de voir le type d'altération et les relations diverses entre géomorphologie et sols.

2.3.6 Exoscopie des grains de quartz

Cette analyse sert à définir les paléo-régimes de transports et de dépôts des sables. Elle est basée sur les travaux de Le Ribault (1977). Elle est faite à la loupe binoculaire pour les sols qui posaient des problèmes de classification. En d'autres mots, nous avons étudié plus en détail les fiches 4, 7, 8, 14, 15 HA et HB, 16.1, 16.2, 24 et 32 pour connaître leur genèse. Nous avons utilisé les grains de sols prétraités, pour avoir une meilleure visibilité. Par ailleurs, les classes granulométriques qui ont servi à l'étude ont 500 et 1180 μm et nous avons utilisé des grossissements de 35 à 60 fois.

L'exoscopie nous aide à déterminer l'origine de déposition des sables et leur évolution. Ainsi, nous pourrions classer nos sols de terrain.

2.3.7 Carbone total, azote total

Cette analyse est faite pour définir la fertilité chimique des sols. La lecture se fait sur un analyseur élémentaire de type *Carlo Erba NC2500*. La méthode analytique s'articule en deux phases : une phase de préparation des échantillons (quantification de l'échantillon et pesée de précision dans la capsule d'étain) et une phase d'analyse, dans laquelle l'instrumentation tient le rôle principal. Les résultats servent à calculer les pertes en nutriments à partir des taux d'érosion des sols.

2.3.8 Phosphore total

Cette analyse faite dans le but de définir la fertilité chimique des sols. L'analyse se fait par la colorimétrie automatisée (*TRAACS-800 AutoAnalyser*) de *Industrial Method # 812-86T*; *BRAN+LUEBBE Analyzing Technologies Inc.* Les résultats nous servent à calculer la perte en nutriments par érosion des sols.

2.3.9 Analyse statistique

Une analyse discriminante est utilisée pour déterminer quelles variables chimiques permettent de discriminer les types de sol. Les variables chimiques sont le carbone, l'azote, le phosphore, le rapport carbone azote et le pH du sol. Les types de sols sont DA5, PL10, PL11 et TH3. Comme analyse préliminaire, pour chaque variable chimique nous avons effectué une analyse de variance (ANOVA) selon les 4 types de sol. Nous avons ensuite utilisé le Tukey's Studentized Range (HSD) pour les comparaisons deux à deux. Les résultats de ces analyses sont montrés au chapitre III.

Pour conclure, ces analyses nous permettront de mieux comprendre la dynamique de ces sols. Par conséquent, nous devons maintenant les classer, les identifier et les décrire.

2.4 Les sols de la zone d'étude

Le développement technologique de certains pays peut être ralenti par plusieurs facteurs. Sur le plan économique, les références scientifiques de pays comme le Mali sont moins disponibles et même inexistantes. La disponibilité des études pédologiques est faible. En effet, un nombre limité d'institutions est en charge de la recherche sur les sols à l'intérieur du pays (IER). Par contre, certaines institutions internationales (ORSTOM, CILSS, CIRAD etc.) se sont pratiquement données comme mandat de faire leurs recherches dans des pays qui comme le Mali, ne s'autosuffisent pas. Ce problème technologique a créé deux complications majeures : la systématique des sols et le manque de références. Dans un premier temps, il sera abordé dans cette section la difficulté engendrée par les différentes classifications de sol et leur utilisation au Mali. Dans un deuxième temps, nous verrons les références pédologiques qui étaient disponibles pour notre étude et les modifications que nous y avons apportées. Finalement, nous ferons une description des sols du secteur de référence et les grandes caractéristiques qui leurs sont attribuées.

2.4.0 La classification des sols au Mali

Comme dans la science de la pédologie elle-même, la classification internationale des sols au Mali n'est pas encore bien définie. Les nombreuses implications scientifiques au pays ont produit un mélange engouffrant de la classification des sols (tab. 2.4). Au Mali, la colonisation par les Français a engendré l'utilisation plus généralisée de la CPCS (1967). Par contre, deux autres classifications peuvent être utilisées : la « Soil Taxonomy » américaine (USDA, 2003) et la légende d'une carte des sols du monde au 1/5 000 000 de la FAO (1990). Pour empêcher la mauvaise interprétation et éviter de chercher des équivalences taxonomiques, une tentative de rassembler sous un même système ces différentes nomenclatures a été faite. Le système de classification BRM ou WRB (Keita, 2002) semble être une bonne solution pour certains.

En 2000, SOTER a adopté la BMR comme système de classification de référence pour les profils de sols (FAO, 2000). Malgré ces avancements, nous avons quand même

choisi la classification française (CPCS, 1967), puisque les références qui nous étaient le plus utiles se référaient à celle-ci.

Tableau 2.4: Soil taxonomy et équivalents approximatifs dans les classifications CPCS et FAO (tiré de Keita, 2002).

| US SOIL TAXONOMY | CLASSIFICATION CPCS | | | | | | | | FAO /Unesco | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|---------------------|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-----------|-----------|----------|--------------------|-----------|----------------------|---------------------|-----------|----------|
| | I Sols minéraux bruts | II Sols peu évolués | III Vertisols | V Sols calcimanganiques | VI Sols isohumiques | VII Sols Brunifiés | IX Sols à Sesquioxydes de Fe et de Mn | X Sols ferrallitiques | XI Sols hydromorphes | XII Sols sodiques | Aridisols | Arenosols | Lixisols | Acrisols ferriques | Leptosols | Nitrosols dystriques | Nitrosols eutriques | Fluvisols | Gleysols |
| ALFISOLS AQUALFS USTALFS | | • | | | | • | • | | • | | | | • | | | | • | | |
| ARIDISOLS ARGIDS ORTHIDS | | • | | • | | • | | | | | • | | | | | | | | |
| ENTISOLS ORTHENTS PSAMMENTS AQUEENTS | • | • | | | • | | | • | | | | • | | • | | | | • | • |
| INCEPTISOLS TROPEPTS OCHREPTS AQUEPTS | | • | • | | | • | • | | | | | | | | | | | | • |
| MOLLISOLS | | | | | • | • | | | | | | | | | | | | | |
| ULTISOLS UDULTS USTULTS | | | | | | | • | • | | | | | | | • | | | | |
| VERTISOLS USTERTS | | | • | | | | | | | | | | | | | | | | |

2.4.1 Les cartes pédologiques de la zone d'étude

Toutes les cartes des sols récentes du Mali ont été réalisées selon les travaux du PIRT au Mali en 1983 (Di Vecchia et *al.* 2001). Pour avoir un aperçu réel des sols de la zone d'étude, nous nous sommes référés à ces travaux dans l'étude préliminaire du secteur de référence. Ces cartes donnent un bon aperçu des unités pédologiques que nous pouvons retrouver sur le terrain. Elle le fait avec un degré de précision assez bas à cause de la petite échelle (1 : 500 000) et aussi à cause de la cartographie sectorielle (à l'aide de pourcentage et non en les cartographiant directement sur la carte).

En pratique, les travaux du PIRT nous ont aidé à identifier les unités suivantes : TC4, TC3, TC5, PL10, PL11, DA5, PS3, TH3, T14 et X6. L'unité PL3 n'a pas été identifiée sur le terrain. La carte des sols du PIRT a aujourd'hui une représentativité moyenne de la réalité du terrain. La cartographie du couvert végétal et des espèces forestières liées aux types de sols est complètement désuète. Le défrichage et les besoins en bois modifient considérablement ces deux facteurs et la rapidité des phénomènes est remarquable. Une approche utilisant la télédétection comme le fait le projet CILSS (Di Vecchia *et al.* 2001) ou SOTER (FAO, 1995) semble beaucoup plus appropriée pour le facteur couvert végétal. Par ailleurs, des erreurs évidentes semblent s'être glissées à l'intérieur de la cartographie du PIRT dans notre secteur de référence. En effet, la présence des sols hydromorphes est sous estimée par rapport à la réalité. De plus, l'utilisation du sol brun-rouge sub-aride PS3 semble être plutôt une variation texturale de sols ferrugineux tropicaux lessivés. De plus, selon Keita (2002) ces sols sont des sols ferrugineux tropicaux présents sur des modelés de dunes. Par conséquent, nous verrons au chapitre III que l'analyse à la loupe binoculaire (l'exoscopie des grains de quartz) et les descriptions géomorphologiques de terrain nous permettent d'enlever cette unité de notre classification. Par ailleurs, il faut savoir que dans le milieu soudano-sahélien les héritages pédologiques dominent les grands traits de l'organisation du paysage pédologique. La répartition spatiale du sol et les propriétés physico-chimiques des sols sont le résultat des caractéristiques des conditions climatiques passées, variées sinon opposées à celles d'aujourd'hui (Keita, 2002). Étant donné l'âge élevé des sols au Mali, on comprend facilement leur complexité et la difficulté à les classer.

Dans la prochaine section, nous ferons la description des sols du secteur de référence et développerons les grandes caractéristiques qui les distinguent selon leur classification.

2.4.2 Description des sols et leur classification

Pour identifier les unités de sol sur le terrain, nous nous sommes référés aux travaux du projet PIRT (1983a) et à ceux de Keita (2002). Le défi premier est de trouver les équivalences entre les nomenclatures, faire les associations et ainsi pouvoir décrire les unités de sol le plus précisément possible. Les différentes classifications montrent chacune leur

insuffisance face à la classification des sols au Mali. En ordonnant ces classifications, nous pouvons regrouper les propriétés intrinsèques aux unités de sols. Notre classification sera faite selon la CPCS. Elle comporte cinq ordres pour la CPCS et quatre ordres pour l'équivalent de la « Soil Taxonomy » (USDA, 2003). Selon Keita (2002), les sols peu évolués régosoliques (CPCS) et sols minéraux brut lithosoliques (CPCS) sont représentés par les entisols dans la Soil Taxonomy; les sols ferrugineux tropicaux lessivés (CPCS) dont son équivalent est ultisol (Soil taxonomy); les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés (CPCS) ou alfisol (Soil taxonomy) et les sols hydromorphes (CPCS) ou inceptisols (Soil Taxonomy). Pour faire suite, il est nécessaire de décrire les différentes unités de sols. Dans les paragraphes qui suivent, nous verrons la description des sols présents dans la région d'étude.

Dans un premier temps, il y a les Sols minéraux bruts, lithosols (Entisol pour Soil taxonomy). Nous les représentons par le symbole TC5. Ces sols se situent sur les sommets des collines. En général cette unité est de la cuirasse latéritique qui affleure (app. F, photo 15). À l'occasion, il peut développer un horizon Ah limono-sableux organique très mince.

Dans un deuxième temps, viennent les sols peu évolués, régosols (Entisol pour Soil taxonomy). Selon PIRT, ils se présentent sous deux formes TC4 et TC3. Nous avons abandonné la forme TC4 qui comporte approximativement les mêmes caractéristiques que les TC3 à ce qui a trait aux données utilisées pour ce travail. Alors, nous ne décrivons que les TC3 (app. F, photo 16-17). Ceux-ci se situent sur les versants gravillonnaires des collines et se développent sur la cuirasse ou sur le schiste à certains endroits. Puisque ce sont des sols peu évolués, l'horizonation qui est développée est A/C (app. F, photo 16). Ils couvrent les interfluves et passent le plus souvent en continuité au bas glacis. Les sols se répartissent en toposéquences où varient simultanément l'épaisseur du sol meuble et la qualité du drainage interne.

Les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés (Alfisol pour Soil taxonomy) que l'on nomme DA5 (app. F, photo 18-19) (Keita, 2002) se localisent en particulier dans la plaine du Seno, mais également dans le Hodh, le Delta central et le Delta mort du fleuve Niger. Ils sont présents sous une pluviométrie annuelle de 600 à 800 mm. Comme nous l'avons vu dans la

section 2.1.1, la zone d'étude est près du Delta central. Ces sols sont donc des vestiges du Delta mort (baisse du niveau des eaux et dépôts de sable ou dunes fluviales) dans le secteur de référence. Ils se développent sur des dunes aplanies ou dunes éoliennes souvent remaniées (sect. 2.3.6 et 3.1.3). Celles-ci peuvent être litées, massives (app. F, photo 19), sans translocation de l'argile en un horizon B ou une faible horizonation. Ce sont des sols profonds, sableux, bien drainés (tab. 3.9 et app. C) et caractérisés par une couleur brun vif en profondeur. La texture sablo-limoneuse en surface passe généralement à du limon sableux en profondeur (Keita, 2002). Ces sols sont acides (tab. 3.9) dans tout le profil mais plus acides en surface (Keita, 2002). Ils sont généralement utilisés pour la culture de mil. Dans le secteur de référence ils sont aussi favorables au sorgho, à la pastèque et au gouanzou. Ces sols ont une faible fertilité chimique et leur volume hydrique est très bas. Le relatif tassement de l'horizon A1 et l'encroûtement superficiel favorisent le ruissellement en nappe (Keita, 2002). Ces sols se situent dans la toposéquence aux alentours des sommets en aval des sols graveleux TC3 et en amont des PL11.

Ensuite, il y a les sols ferrugineux tropicaux lessivés symbolisés par PL10 et PL11 (Ultisol, Soil taxonomy). Dans le secteur de référence, leur formation n'est pas uniforme. Ils peuvent être soit lessivés avec ou sans taches et concrétions (app. F, photo 20), soit lessivés à pseudogley (app. F, photo 21). Les PL10 se situent dans les plaines limono-sableuses et peuvent avoir des matériaux limoneux fins. Ces derniers se retrouvent souvent dans la plaine à pente faible où les sols sont profonds et imparfaitement drainés. De plus, ils peuvent être en liaison avec la présence de plinthite et d'éléments hydromorphes dans les horizons inférieurs. Cette unité montre un horizon éluvial (lessivé couleur pâle) et un horizon illuvial où l'argile s'est accumulé sans concrétions à pseudogley (app. F, photo 21). L'unité sert à une large gamme de cultures (sorgho, coton, arachide, maïs, etc.). Le pâturage y est moins important. Les contraintes à la mise en valeur des terres sont liées à l'hydromorphie interne, l'érosion en nappe et l'érosion linéaire. Les PL11 sont caractérisés par la présence de concrétions de fer (plintites; app. F, photo 22). Se situent dans les plaines limono-sableuses en amont des PL10 à pseudogleys, mais souvent à cheval avec les autres PL10. Ils se développent souvent à partir de PL 10 érodés. Nous avons noté que les sols où il y a des ravinelements dans l'unité PL10 vont devenir du PL 11 (app. F, photo 23). Ces sols sont

profonds, leur texture est légèrement fine et la couleur du profil jaune-rouge à brun-grisâtre à la surface et brun vif ou brun-rougeâtre en profondeur. Le drainage semble bien dans les 75 premiers centimètres, mais les portions inférieures du profil sont souvent imparfaitement drainées. La translocation de l'argile de l'horizon A vers l'horizon B peut être forte. Une augmentation de la teneur en argile et la présence de graviers sont manifestes aux niveaux inférieurs du profil. Les mesures de pH donnent des réactions typiques fortement à moyennement acides (tab. 3.9). Cette unité se trouve normalement cultivée de façon permanente ou avec une jachère de brève durée. Elle sert à toute une série de cultures, mais surtout le sorgho, le mil et l'arachide (Keita, 2002).

Les sols hydromorphes T14 et TH3 (Inceptisols, Soil Taxonomy) se présentent dans les vastes plaines d'inondation du fleuve Niger et sont associés aux sols des défluent et bas-fonds. Les sols hydromorphes évoluent sous l'influence d'un excès d'eau temporaire (TH3 : app. F, photo 25) ou permanent (T14 : app. F, photo 24), affectant l'ensemble ou seulement une partie du profil. L'imperméabilité du matériau associée à un drainage externe faible peut suffire à provoquer l'hydromorphie (sect. 1.2.7). Le T14 se situe dans le bassin du fleuve Niger et les défluent. C'est un sol jeune d'apport alluvial. Il y a sédimentation après chaque crue en saison des pluies. Il est souvent argileux et ou avec alluvions. Le TH3 se situe dans les vallées, les dépressions des vallons (bas-fond) et les plaines inondables. Sa texture est argileuse souvent tachetée (orangé ou foncé selon le régime anaérobique ou aérobique). Le T14 et TH3 sont profonds et le drainage y est mauvais. Les mesures de pH sont généralement fortement acides à la surface. Par contre, Keita (2002) croit qu'à la surface l'acidité peut varier vers une acidité neutre et qu'en profondeur elle peut passer de moyennement acides à légèrement alcalines.

Tout bien considéré, la complexité de la classification des sols dans la région d'étude dépend beaucoup du milieu. C'est pour cette raison que nous développons dans la prochaine section l'analyse systémique pour avoir une vision globale du problème.

2.5 Analyse systémique

Dans un premier temps, nous ferons l'analyse des systèmes en interaction avec la station d'étude. Nous verrons la notion de capacité de support du milieu et la systémique des sols. Dans un deuxième temps, nous étudierons la station d'étude en détails. La méthode consiste à regarder à la loupe la station. Ainsi, nous obtenons tous les facteurs de cette station qui font varier l'évolution du milieu. Ces facteurs sont ensuite projetés dans plusieurs systèmes du secteur de référence qui ne peuvent fonctionner l'un sans l'autre.

Puisque notre étude s'applique au processus de l'érosion en nappe, il faut voir comment ses impacts perturbent la fonctionnalité des systèmes. Prenons la métaphore qu'utilise Rosnay (1975) pour nous représenter notre milieu. « Voyons les systèmes environnementaux, économiques et sociaux comme de grandes roues d'engrenages liées les unes aux autres et qui tournent régulièrement ». Leur rotation peut être ralentie ou augmentée par des poussées mécaniques internes à chaque roue d'engrenage. Dans notre cas, le système agricole cause l'érosion en nappe qui provoque des effets néfastes sur l'environnement. C'est une évolution régressive du système sol qui tend vers une rupture du système. Ceci résulte en une poussée mécanique qui ralentit le système environnemental et les autres systèmes. En d'autres mots, si la fonctionnalité des systèmes à l'échelle de la station n'est pas perturbée, la capacité du milieu à supporter les activités agricoles sera meilleure. Ainsi, il faut étudier les systèmes qui jouent un rôle significatif à la station. Dans les paragraphes qui suivent, nous décrirons la capacité de support, la systémique des sols, la station d'étude, le système agricole, le système d'érosion et les toposéquences.

2.5.0 Capacité de support

La notion de capacité de support est intimement liée au concept de développement durable. En effet, cette notion amène le développement à tenir compte de la capacité d'un milieu à se développer sans menacer de briser les systèmes environnementaux, sociaux et économiques qui sont les impératifs du développement durable. Cette notion marque une évolution dans l'essence même de la systémique : la relativité du milieu pour son développement régional. De cette façon, l'équilibre entre la consommation et la qualité de

l'environnement est plus facile à saisir. « Les facteurs d'équilibre qui pourront être considérés sont : la pression démographique en lien avec la croissance des populations locales et l'apport de nouveaux arrivants, les ressources présentes dans le milieu (fertilité des sols, disponibilité de l'énergie, ressources piscicoles, etc.), la valeur du milieu en lien par exemple avec la présence d'un endémisme très élevé, les données climatiques régionales, les savoirs locaux traditionnels, le niveau de connaissances et de sensibilité (conscience) des populations impliquées dans le développement » (Davidson, 2004). Pour évaluer la capacité de support, il faut mettre en commun un grand nombre de facteurs du système de production du milieu en plus de considérer le système environnemental de celui-ci (dans ce cas-ci le Mali) et interpréter cette information sur une échelle régionale (Fearnside, 1997). La définition de capacité de support (*carrying capacity*) de ce même auteur est : le nombre de personnes qui peut supporter sur une période indéfinie la technologie de production, le niveau de population et le modèle de consommation. Par ailleurs, la capacité de support n'est pas fixe, elle peut diminuer face à une dégradation de l'environnement et augmenter selon la distribution des ressources.

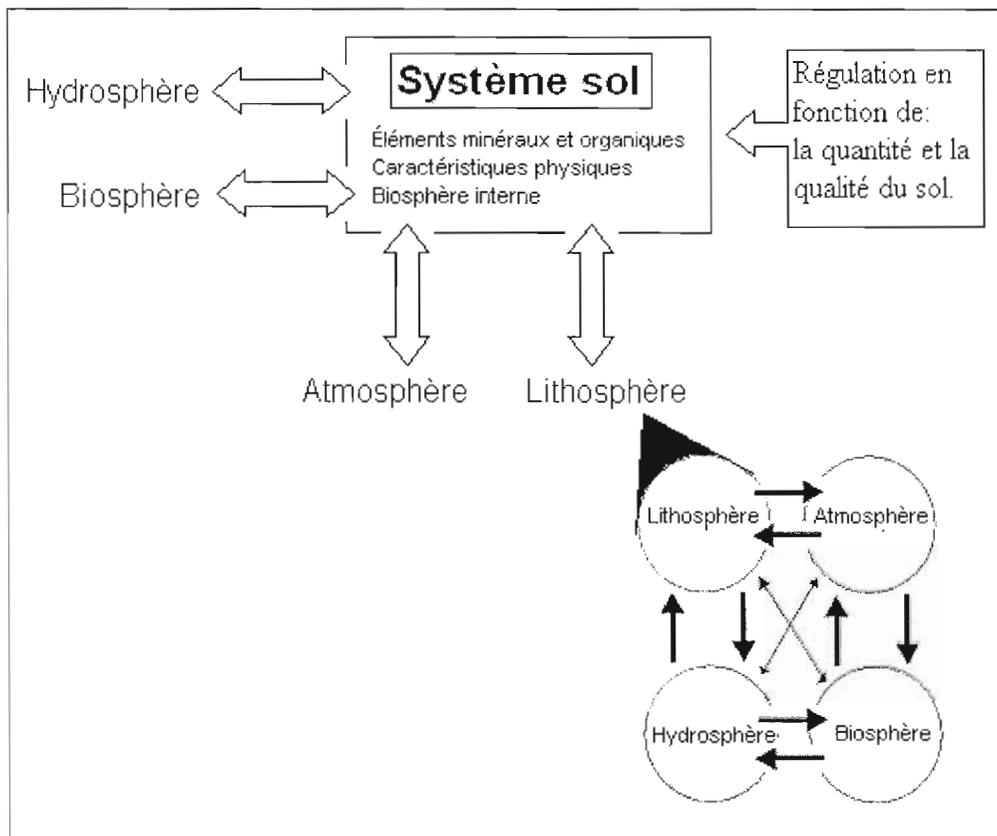
Par ailleurs, la capacité de support tient compte de l'historique de la région et les cycles présents. Ce peut être l'expérience à l'échelle humaine (par exemple, ce qui s'est passé quand il y a eu déforestation dans cette région 100 ans plus tôt) ou à l'échelle géologique en regardant les cycles comme l'âge de vie de forêt. Pour donner des exemples, Fearnside souligne les cycles de feux naturels dans les forêts en période de sécheresse. Une région qui est souvent en période de sécheresse et qui a un risque élevé de feux, ne sera pas gérée de la même façon. Selon la capacité de support, cette région est fragile. Bref, la probabilité d'échec est plus grande dans des régions à catastrophes naturelles fréquentes.

Dans cette étude, il faut se demander si le milieu (système sol) est capable de supporter une production (culture) face aux conséquences de l'érosion hydrique. Il faudra également se demander comment on peut augmenter la capacité du système à supporter la production. Par conséquent, il faut utiliser l'approche systémique pour développer cette notion.

2.5.1 La systématique des sols

Pour répondre à la question si le milieu (système sol) est capable de supporter une production (culture) face aux conséquences de l'érosion hydrique dans la zone d'étude, nous commencerons par définir le système sol. Selon Rosnay (1975), l'écosystème est une alternance et un couplage entre les cycles atmosphérique, géologique et biologique. De plus, il définit le système sol (figure 2.10) comme un réservoir d'éléments chimiques et organiques qui procède à une circulation de ces éléments entre les autres réservoirs (hydrosphère, atmosphère, biosphère, lithosphère). Les éléments minéraux ou organiques qui passent d'un réservoir à l'autre agissent comme des activateurs ou des inhibiteurs sur le fonctionnement du système sol à produire ou à consommer.

Figure 2.10 : L'écosystème et le système sol



Pour faire suite, il faut connaître le climax (évolution ultime du système sol à l'équilibre) pour comprendre la régulation des sols. Un climax est un système fonctionnel intégrant le sol, la végétation et le milieu (climat et géologie) ayant atteint un équilibre (Duchaufour, 2001). Dans l'évolution d'un sol, le matériau minéral déposé suite à la météorisation vient à se coloniser progressivement par la végétation. Celle-ci évolue en commençant par les plantes herbacées vers les arbustes jusqu'à la population forestière. En même temps, un profil de sol se développe. Un horizon humifère se dessine, puis l'horizon minéral de lessivage et ainsi de suite. Ces deux processus d'évolution progressent ensemble et tendent vers un état d'équilibre. Cet équilibre est atteint au bout d'un temps déterminé et caractérise le milieu aussi bien par une végétation et un sol stable. Le climax est en quelque sorte l'état optimal qu'un sol et sa végétation (appelée végétation primitive ou forêt primaire) peuvent atteindre malgré le milieu et ses facteurs externes.

Le système sol peut être lui aussi en évolution. L'évolution du système tant par le milieu, le sol et la végétation peut être dans une phase progressive ou régressive. L'évolution progressive est celle qui va vers le système en équilibre (climax). Il y a développement de nouveaux horizons c'est-à-dire le passage de AC à A(B)C et ou, subdivision de l'horizon A0, A1, A2 et même la pédoturbation qui provoque une homogénéisation du profil (Duchaufour, 2001), effacement des horizons et approfondissement du profil. On peut prendre l'exemple d'incorporation d'humus de plus en plus profond. De plus, il y a une augmentation de la biomasse et une optimisation du milieu. En opposition, l'évolution régressive s'éloigne de plus en plus du climax. Elle tend vers l'état initial. La disparition d'horizons par érosion (origine naturelle ou anthropique) est le principal facteur (Duchaufour, 2001). La régression peut même aller jusqu'à la dénudation de la roche mère.

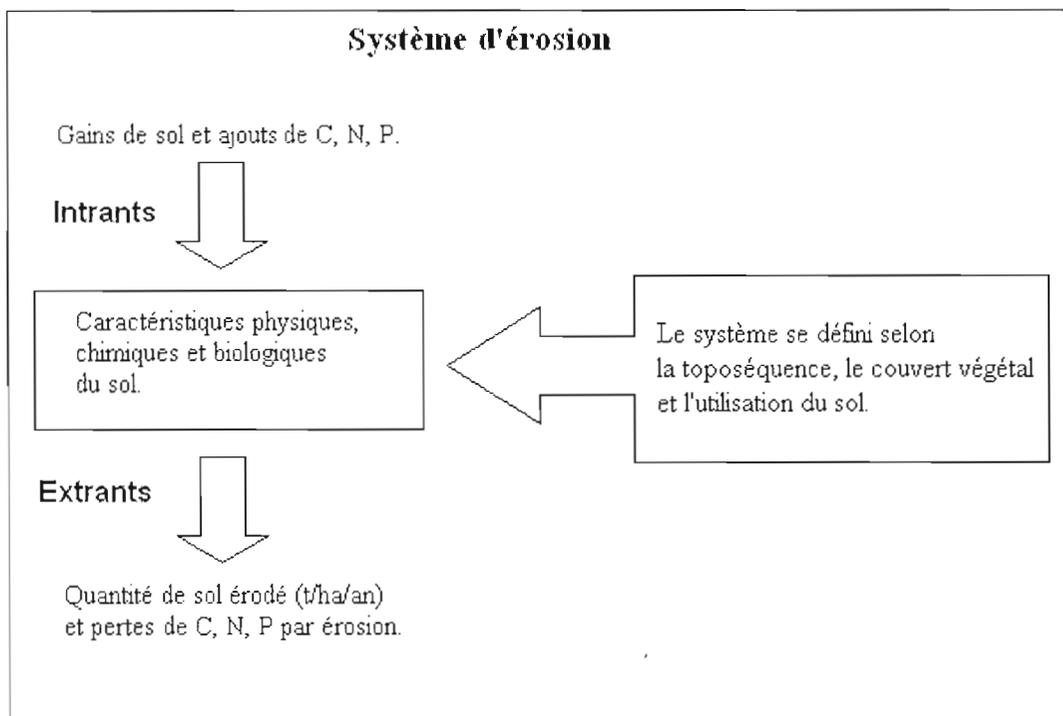
Par ailleurs, le système sol peut être en rupture. C'est-à-dire qu'il est à l'état ni progressif ou régressif, ni climax. Il subit un changement de régime d'évolution de la végétation du sol et du milieu. Par exemple, la mise en culture d'une forêt primaire cause un changement du milieu (plus fragile aux intempéries), de la végétation (le nouveau couvert végétal qui a été semé, végétation secondaire) et un changement au niveau du sol (la végétation secondaire forme un nouveau type d'humus et fait aussi changer la pédogenèse).

D'autre part, nous développons dans ce travail une nouvelle approche du système sol, le système d'érosion (fig. 2.11). Celui-ci est un maillon de la grande chaîne du système sol. Il est une surface limitée d'un bassin versant où il est possible de déterminer les lois qui président la répartition des sols, qui montrent les réactions directes de l'érosion et de son évolution. Il est caractérisé par la toposéquence qui est une représentation bidimensionnelle du type de sol en fonction de la topographie (sect. 2.5.4), le couvert végétal et l'utilisation du sol. Ces facteurs sont variables à l'extérieur du système, mais invariables à l'intérieur de celui-ci et à un temps (t). Le système d'érosion est généralement à une échelle plus grande qu'un bassin versant. On peut l'appeler le processus d'érosion d'un « bassin versant élémentaire ». Les intrants et extrants du système sont la quantité de sol déposé ou érodé (intrants ou extrants), la qualité (caractéristiques physiques du sol) et la fertilité chimique du sol (quantité de C, N, P produite ou érodée).

Par ailleurs, il faudra également se demander comment on peut augmenter la capacité du système sol à supporter la production. C'est en contrôlant le mieux possible la régulation du système sol, en évitant les ruptures du système, en favorisant une évolution progressive du système et en ayant un bilan positif dans notre système d'érosion.

Bref, le système d'érosion nous permet de vérifier la capacité de support d'un milieu. Dans la section 2.5.2, nous ferons la description de la station d'étude et de ses facteurs, dans le but de définir les facteurs de régulation du système d'érosion élémentaire du secteur de référence.

Figure 2.11 : Le système d'érosion



2.5.2 Description de la station

La station d'étude se situe à quelques mètres au sud-ouest du village de Dilango (V5, fig. 2.9). Elle couvre une surface de 81 ha, c'est-à-dire 900m de largeur et 900 m de longueur (fig. 2.13 et 2.17). La méthode d'échantillonnage qui a été utilisée est celle de la grille à mailles régulières (Duchaufour, 2001). En effet, un échantillonnage systématique a été fait. Un échantillon à chaque maille de 300 mètres a été recueilli pour un total de 16 échantillons (fiches 19 à 34, app. C). Les facteurs de station y ont été étudiés pour comprendre les interactions des différents systèmes. La cartographie a été réalisée identifiant les sols des 16 emplacements d'échantillonnage en plus de porter attention à toute rupture dans l'unité de sol présent. Par conséquent, nous verrons dans la prochaine section comment se constitue le système agricole. C'est-à-dire que nous étudierons le facteur C du système d'érosion élémentaire.

2.5.3 Système agraire et distribution

Le système agraire de la station d'étude est celui défini par Ferault (2003) sous le nom de «Spatialisation agriculture-élevage de 1960 à 1995 » (fig. 2.12). Il faut noter qu'il y a encore les cultures de cases (cultures près du village pour la consommation première). Ce sont celles-ci qui provoquent le plus souvent des dégradations intenses à cause de leur caractère continu. Alors, il s'en suit une infertilité absolue du sol et le besoin de défricher ailleurs. Donc, la dégradation du milieu s'étend et peut causer des migrations de villages. Comme Breman et *al.* (1998) et plusieurs scientifiques le pensent, une intensification agricole est nécessaire. Par contre, il faut la réaliser selon les principes de développement durable. Pour ce faire, voyons les caractéristiques du système agraire de notre station d'étude.

Dans le système agraire, les principales espèces cultivées sont principalement le mil (*Pennisetum glaucum L*) et le sorgho (*Sorghum bicolor*). On peut également trouver des cultures marginales de Calebasses et d'arachides. La méthode culturale est assez traditionnelle (fig. 2.12). Par ailleurs, les opérations techniques nécessaires aux cultures sont présentées au tableau 2.5.

Figure 2.12 : Spatialisation agriculture-élevage de 1960 à 1995 (modifié de Ferault, 2003).

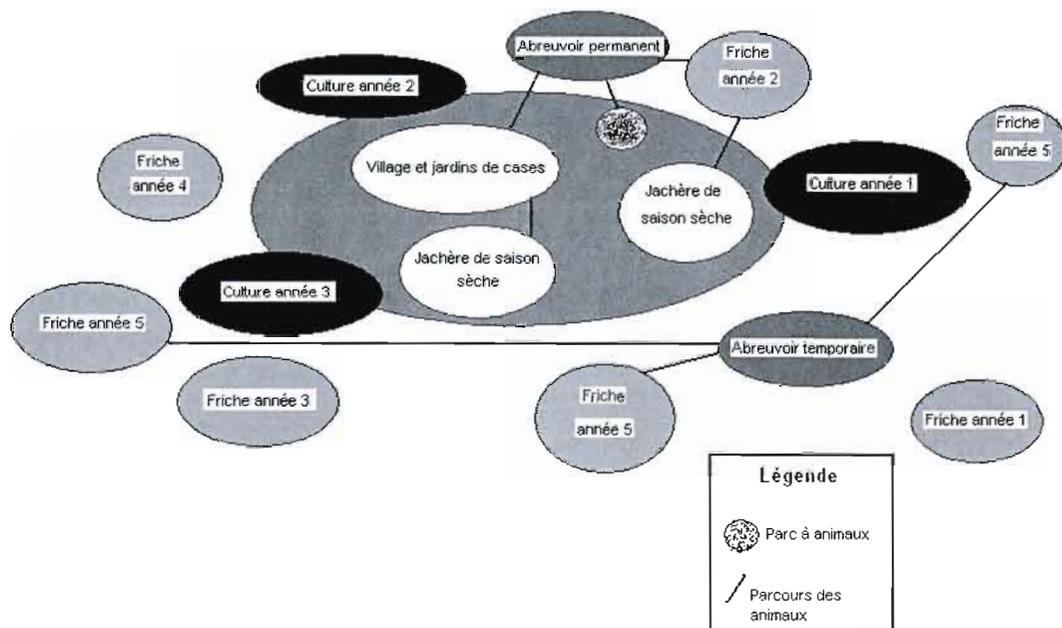


Tableau 2.5 : Les grandes étapes des itinéraires techniques du système agraire (adapté de Ferault, 2003)

| Mois | Opérations techniques |
|---------------|---|
| Février | Réparation des poulaillers et des greniers (vides et en mauvais état) |
| Mars et Avril | Révision du matériel chez le forgeron |
| Mai | Préparation des parcelles mises en culture: défrichage, nettoyage, grattage |
| Juin | Préparation des parcelles mises en culture: houage, labour |
| | Semis: sorgho et mil |
| Juillet | Semis: arachide |
| | Entretien des cultures: |
| | 1 ^{er} sarclage mil et sorgho |
| Août | Entretien des cultures: |
| | 1 ^{er} sarclage arachide |
| | éventuellement, 2 ^e sarclage et buttage mil et sorgho |
| Septembre | Entretien des cultures: |
| | 2 ^e sarclage arachide |
| | Récolte: arachide précoce |
| Octobre | Récolte: mil et sorgho |
| Novembre | Récolte: arachide tardive |
| Décembre | Battage et vannage: mil et sorgho |
| | Mise en sac et Stockage |
| Janvier | Battage et vannage: mil et sorgho |
| | Mise en sac et Stockage |

La méthode de préparation du sol est généralement la culture en billon faite à la houe. Les billons sont quelques fois perpendiculaires à la pente, mais la plupart sont construits indépendamment du facteur topographique. Ce qui conduit à une accélération de l'érosion en nappe additionnée de l'érosion mécanique sèche.

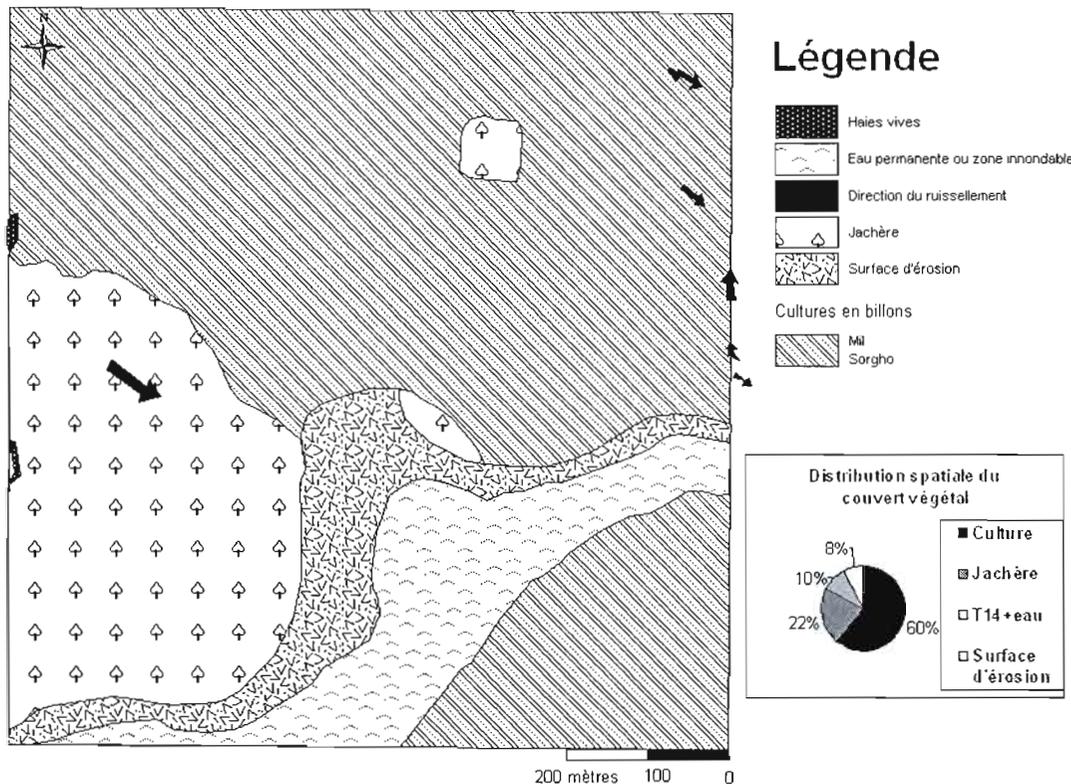
On peut voir à la figure 2.13 la distribution du couvert végétal et de l'utilisation des sols. Il est important de noter que 60% de la surface est dédié à la culture, 22% est un sol inexploitable à cause des crues (défluent du fleuve Niger), 10% des jachères de 5 ans et 8% sont des sols d'érosion que l'on peut définir d'irrécupérables selon les moyens des paysans. Des pratiques de conservation des sols sont présentes, mais ne sont que très peu efficaces. À l'est du terrain on remarque deux haies vives. Leur efficacité est limitée parce qu'elles ne protègent les sols de l'érosion que localement et sont trop petites. On remarque trois zones de jachère qui sont âgées de cinq années. Aucune évolution progressive n'est observable au niveau des sols de ces zones. Elles ont été implantées sur des surfaces de sols épuisés. Par contre on remarque qu'une zone a été efficace contre le recul de l'érosion aux berges du bras mort du Niger (zone de jachère au milieu de la fig. 2.13). En général, aucun engrais chimique n'est ajouté aux sols et la fumure apportée est le résultat des quelques animaux déambulant par-ci et par-là pour brouter en saison sèche. Rares sont les paysans qui utilisent des fertilisants. Les différents types retrouvés dans ce système agraire sont l'urée, le NPK et le complexe fertilisant pour céréales. Par ailleurs, selon Breman et *al.* (1998), les bénéfices par homme-jour sont très bas pour les agriculteurs au Mali (300 FCFA jusqu'à des bilans négatifs). Donc, il est difficile pour les paysans d'acheter des engrais et de réaliser des pratiques culturales efficaces pour conserver et restaurer la fertilité des sols. Nous avons pu le confirmer sur le terrain.

Le système agraire de la station que nous venons de voir peut être défini à grande échelle. Par contre, à l'échelle de système d'érosion et de bassin versant, il faut tenir compte de variables en général. Nous admettons donc que pour le secteur de référence les grandes étapes des techniques de cultures seront les mêmes. De plus, les types de cultures sont en général le mil et le sorgho.

Par ailleurs, pour faire une bonne analyse des systèmes, il faut également observer la géomorphologie. En observant la distribution des sols de la station en corrélation avec leurs caractéristiques intrinsèques et la topographie, nous pouvons établir l'évolution des sols selon leur toposéquence (Boulet et *al.* 1982). Ainsi, nous pourrions faire la projection de la

dynamique des systèmes de la station sur toute la surface du secteur de référence en connaissant le système d'érosion et la toposéquence.

Figure 2.13 : Carte de l'utilisation des sols à Dilango



2.5.4 Les toposéquences

À l'échelle des versants, les variations de la couverture pédologique s'ordonnent selon la pente de la séquence topographique (Casenave et Valentin, 1989). En effet, la position dans la toposéquence est quelquefois plus importante que l'inclinaison des pentes pour l'érosion et le ruissellement (Roose, 1994). L'étude des toposéquences permet d'analyser l'organisation bidimensionnelle (verticale et latérale) des sols. Elle doit mettre en relation toutes les couvertures meubles depuis la ligne de partage des eaux jusqu'au thalweg adjacent (fig. 2.14). Le but est de pouvoir relier latéralement les observations faites suivant ces verticales successives, en réduisant au maximum la part d'incertitude due aux interpolations d'une verticale à l'autre. Les études réalisées suivant ces principes ont apporté

des informations inattendues et essentielles sur l'évolution et la dynamique des couvertures pédologiques (Boulet et *al.* 1982). Dans cette partie nous verrons les principes de bases pour la compréhension des toposéquences en Afrique de l'Ouest en relation avec les observations faites dans la zone d'étude. Par la suite, nous décrirons la toposéquence unitaire de la station du secteur de référence.

Dans un premier temps, il faut reconnaître les processus qui régissent l'évolution du sol dans le milieu. Ces processus sont principalement l'altération, la ferrugination, le lessivage, l'hydromorphie et l'érosion (fig. 2.15). L'étude au rayons-x (sect. 2.3.5 et 3.1.3) nous a servit à montrer que le plasma argileux des sols du secteur de référence est directement issu de l'altération des minéraux primaires de la roche mère avec une faible redistribution dans le profil (tab. 3.5-3.6). Nous parlerons alors de couverture pédologique d'altération. Boulet et *al.* (1982) montrent à travers des études réalisées au Tchad et en Haute-Volta que le glacis se divise en deux pour ces processus. L'amont est occupé par un domaine sableux à caractères morphologiques et géochimiques lessivés. L'aval au contraire est constitué par un domaine argileux à caractères morphologiques et géochimiques illuviaux (fig. 2.15 et 2.16). Ils expliquent également que dans un milieu typiquement lessivé domine un squelette laissant ouverts des vides communicants de taille largement supérieure à ceux des particules transportées et que traverse un flux liquide susceptible d'entraîner ces particules. Ceci est dû à des phénomènes de drainage oblique très intenses par saturation de l'horizon A jusqu'au niveau d'altération de la roche (la cuirasse latéritique) ou l'horizon argilique. Sur les fortes pentes qui coïncident avec les sommets des collines (pentes concaves), les pluies s'infiltrant directement jusqu'au niveau imperméable, puis drainent rapidement jusqu'en bas des versants (faibles pentes), où elles ressurgissent (fig. 2.14 à 2.16). C'est de ce lieu topographique que démarrent les ravines qui remontent les collines par érosion régressive. Des fonctionnements semblables ont été décrits et étudiés sous les savanes soudaniennes du Centre-Ouest de Côte-d'Ivoire par une équipe multidisciplinaire de l'ORSTOM (Valentin et *al.* 1987 cités dans Roose, 1994). Sur les versants ferrugineux tropicaux naissent des petites ravines discontinues et dans les bas-fonds sableux hydromorphes naissent de plus grosses ravines qui progressent de façon remontante dans le paysage. Par ailleurs, les sols hydromorphes et les sols à horizon argileux en profondeur

causent des conditions favorables à l'hydromorphie. Celle-ci étant un facteur important dans la différenciation ferrugineuse (fig. 2.14 à 2.16). De telle sorte qu'une différenciation toposéquentielle s'établit entre le passage de sol ferrugineux lessivé à un sol ferrugineux lessivé à concrétion et même à la formation de cuirasses ferrugineuses.

Dans le même ordre d'idées, observons les conclusions d'une étude de Chauvel (1977) auteur dans Boulet et *al.* (1982). Cette étude montre les relations entre les sols rouge ferrallitiques et les sols beiges ferrugineux de Casamance en Afrique de l'Ouest. Nous avons remarqué à travers ce travail plusieurs similitudes avec le développement selon la toposéquence de notre secteur de référence. D'ailleurs, il a noté que l'alternance de fortes dessiccations et humectations, dues aux conditions climatiques, provoque alors la formation de sol beige à partir du centre de l'interfluve où les possibilités de drainage externe sont les plus réduites et où se développe une hydromorphie sur des surfaces légèrement déprimées. L'évacuation de l'eau libre s'effectue dès lors latéralement selon des discontinuités correspondant à des failles et crée de petits thalwegs à écoulement sporadique (vallées latérales).

C'est approximativement la même évolution dans le secteur de référence (fig. 2.14) et ce autant pour la toposéquence élémentaire de la station que pour les toposéquences du bassin versant (voir fig 2.26). C'est-à-dire qu'une suite de petits vallons et talwegs se développe perpendiculairement à la pente générale du bassin versant du fleuve Niger (fig. 2.20). Chauvel (1977) auteur dans Boulet et *al.* (1982) explique géologiquement ces observations par « un abaissement du niveau de la mer qui provoque le creusement des vallées principales qui transforme l'interfluve en plateau dont les versants voient se développer des sols beiges de pente, en accord avec les conditions arides du moment ». Parallèlement, les cuirasses de bordure se démantèlent partiellement. Cette théorie est appuyée par Penning et *al.* (1982) selon le paléoenvironnement du sahel. La figure 2.14 (coupes A, B, C, D) résulte à la fois de l'autodéveloppement des sols ferrugineux qui continuent à se propager aux dépens des cuirasses ou des sols gravillonnaires (fig. 2.15), du creusement des vallées latérales mieux alimentées en eau qui tend à se colmater et de la remontée du niveau marin (à l'échelle géologie).

Figure 2.14: Étapes successives supposées de l'évolution d'un plateau moyen du bassin versant du fleuve Niger dans notre secteur de référence (adapté de Boulet et al. 1982).

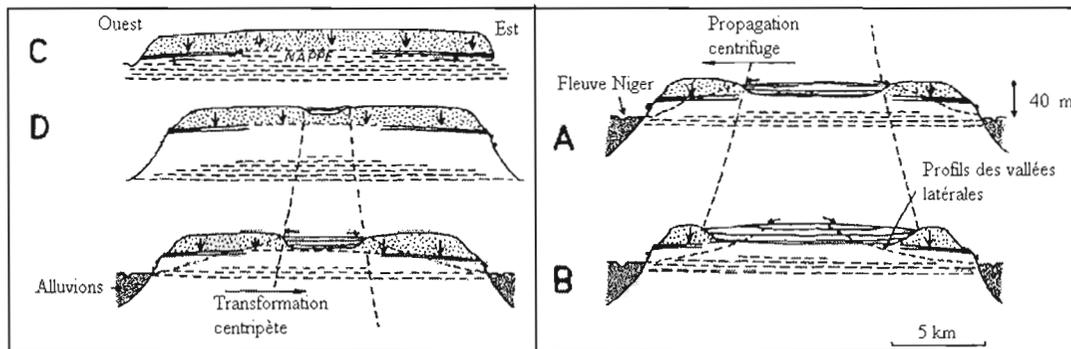


Figure 2.15 : Mécanismes de transformations des cuirasses ou sols gravillonnaires en sols tropicaux ferrugineux (adapté de Boulet et al. 1982).

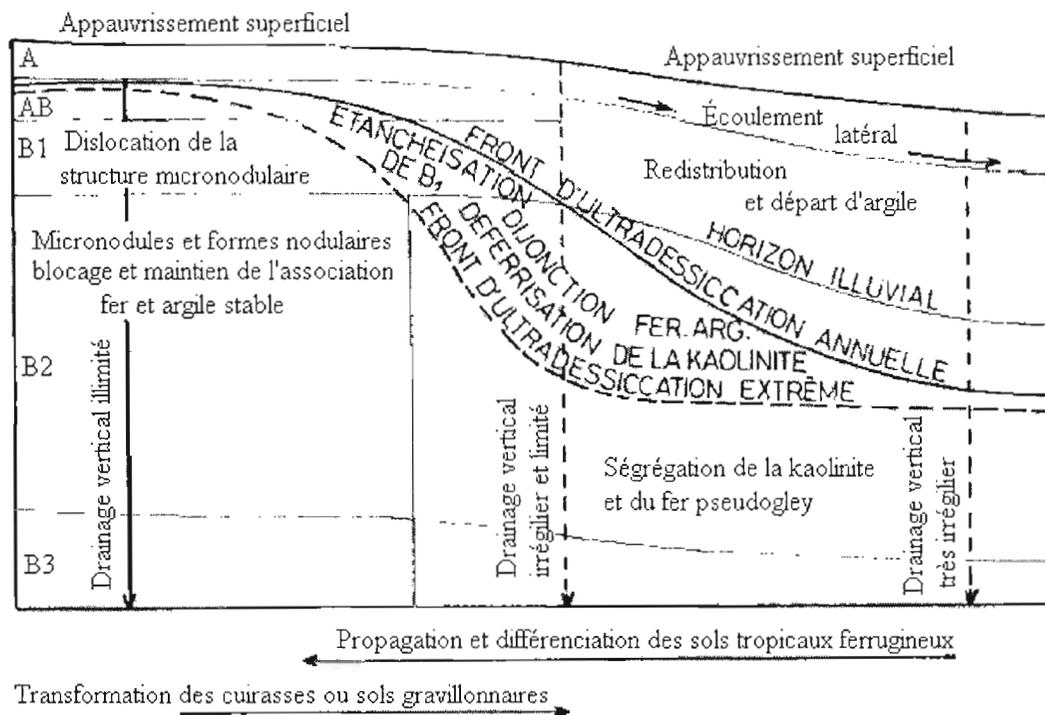
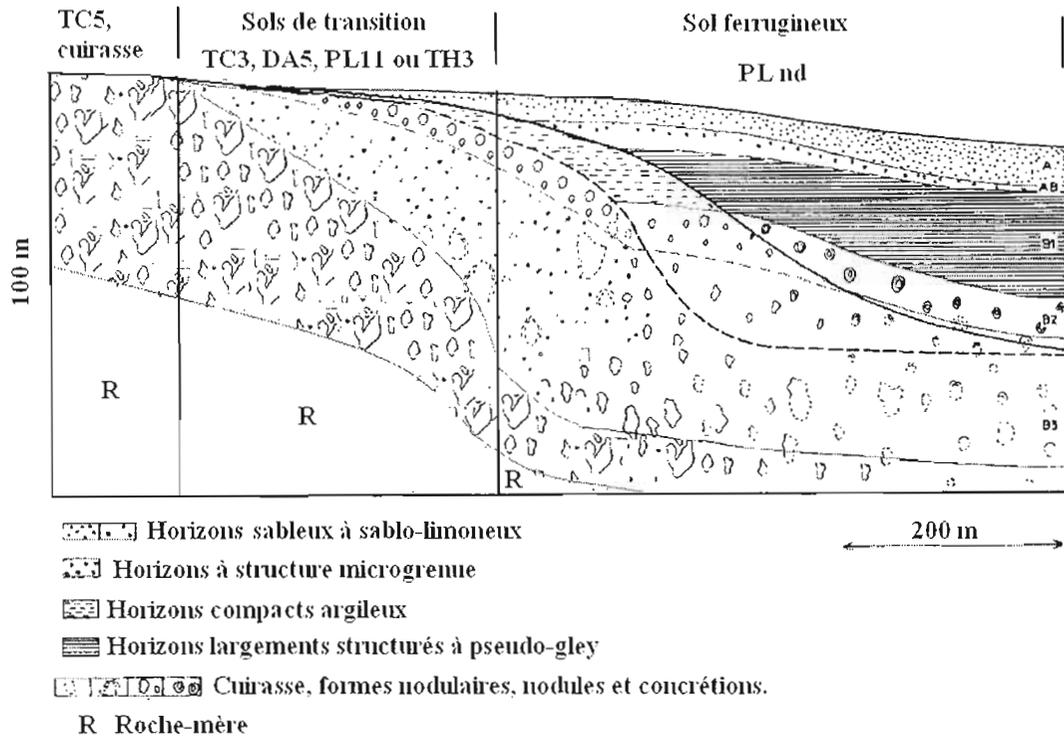


Figure 2.16 : Relation entre les sols dans la toposéquence du secteur de référence (adapté de Boulet et al. 1982).



Tout compte fait, on s'aperçoit qu'en utilisant la toposéquence comme unité de cartographie, la différenciation peut être grande même si les toposéquences sont rapprochées de quelques dizaines de mètres. Elles montrent souvent des analogies de fond mais aussi des différences suffisantes pour que l'on soit confronté rapidement à une complexité impossible à maîtriser dans le cadre de la cartographie systématique. C'est pour cette raison que nous devons étudier la toposéquence élémentaire de la station en lien avec celles du secteur de référence en entier. Pour ce faire, nous démontrerons la méthode de caractérisation de systèmes d'érosion.

2.5.5 Caractérisation d'un système d'érosion

Dans cette section, il faut s'attarder aux liens entre toposéquences. Regarder en quoi consiste la toposéquence élémentaire de la station et la projeter au secteur de référence pour trouver les limites de cette dernière. Par ailleurs, ce sera la toposéquence élémentaire projeté qui servira à définir les différents systèmes d'érosion. Dans une région complète, on définit ces derniers en repérant un nombre limité de toposéquence, le long desquelles la succession latérale des volumes pédologiques (horizons) reste toujours la même.

Voyons la méthode complète que nous avons utilisée pour définir un système d'érosion. À la figure 2.17, nous pouvons observer l'étude détaillée du système d'érosion. Pour arriver à ce résultat, nous avons commencé par faire une cartographie des sols (fiches 19 à 34, app. C). Les sols de la station se distribuent selon les pourcentages suivants: PL10=74%, PL11=11%, T14=10%, DA5=3% et TH3=2%. Ensuite, nous avons pris des mesures de pentes et analysé l'écoulement hydrique. On peut observer que les pentes sont généralement très faibles (entre 0 et 1.5 degré) à l'exception des hauts de pentes et des bordures du défluent représenté par le sol T14.

Cette surface d'eau de la partie sud de la carte est un bras mort du fleuve Niger. En période de crue le fleuve déborde de l'est et vient remplir le bras où l'eau stagnera en saison sèche. Le fleuve Niger, se situe au N-N-O de la station. C'est également vers où la nappe d'eau de surface se draine dans la partie septentrionale de la station. Ailleurs, le drainage se fait vers l'est dans la partie est et vers le S-E pour le reste de la zone. Ce régime hydrique de surface est causé par la forme vallonnée du terrain (fig. 2.14) avec la combinaison de la pente générale du bassin versant du fleuve Niger vers le N-N-E. Cet écoulement de surface régit la dynamique de l'érosion en nappe, du drainage profond et du lessivage oblique. Les conditions d'hydromorphie combinées au lessivage conduisent à une ferrugination du PL10 en PL11 (où l'on retrouve des concrétions en grande concentration).

De surcroît, la texture des sols est différente par rapport à leur position dans la toposéquence. Les sols de bas-fond (TH3) et de défluent (T14) sont très argileux (tab. 3.9).

La difficulté pour différencier les sols PL10 c'est qu'ils ont parfois des concrétions, parfois une texture très sableuse (qui tend vers de DA5) et d'autre fois sont à pseudogley. À cet égard, l'évolution du sol et sa différenciation autant ferrugineuse que texturale sont visibles à travers l'étude de la toposéquence élémentaire. Pour ce faire, trois segments ont été tracés sur la figure 2.17. Le premier segment indique la coupe topographique A représentée par le segment A—A'. Le deuxième est la coupe topographique B représentée par le segment B—B' et même chose pour la coupe C. La coupe A (fig. 2.18), nous permet de se représenter une grande partie de la toposéquence élémentaire. Quant à la coupe B (fig. 2.19), elle montre les discontinuités et les nuances de ces sols très complexes à travers la toposéquence. Finalement, la coupe C (fig. 2.20) représente la toposéquence typique de cette région, c'est-à-dire la toposéquence élémentaire.

Figure 2.17 : Étude du système d'érosion de la station.

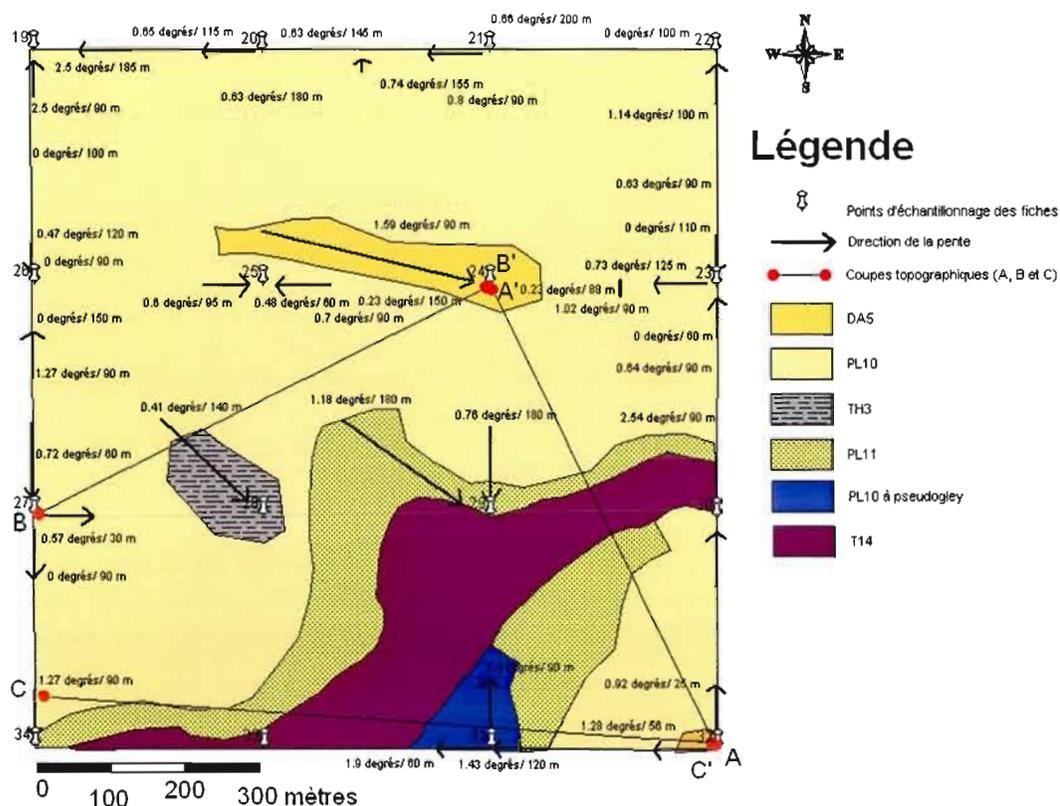
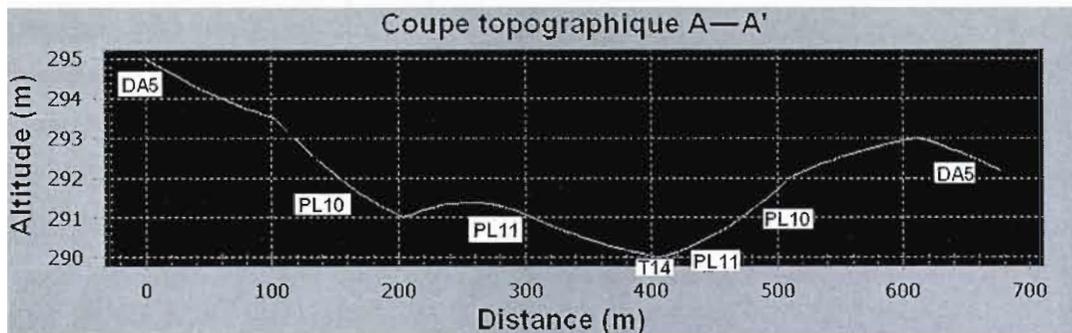
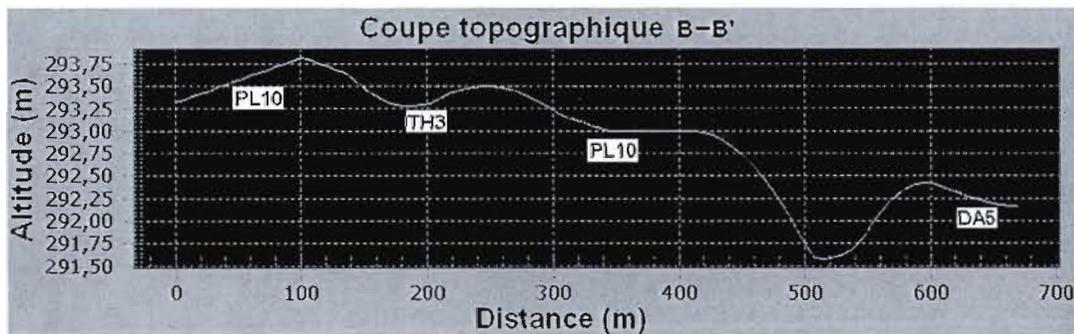


Figure 2.18 : Toposéquence coupe A (Exagération verticale)



La toposéquence de la coupe A débute avec un sol sableux (DA5) de chaque extrémité de la coupe. Il laisse ensuite la place au PL10 un sol limoneux de bas de pente. Le PL11 est présent en aval des PL10 puisqu'il résulte de la ferrugination de ce dernier. Le T14 est le sol de bas-fond. Il est généralement à la limite la plus basse de la toposéquence.

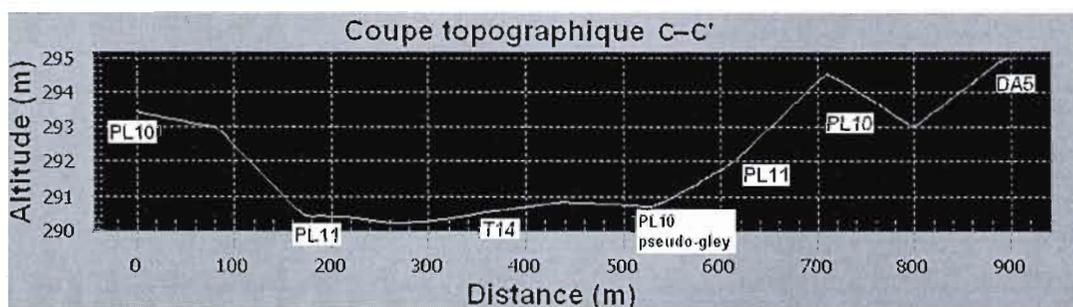
Figure 2.19 : Représentation des nuances de la toposéquence élémentaire: coupe B (Exagération verticale)



Dans la coupe B, on remarque que le DA5 n'est pas toujours en amont des PL10. En effet, puisque nous sommes dans l'ancienne plaine inondable du fleuve Niger, des reliques d'anciennes dunes alluviales sont encore présentes. Ces sols ferrugineux peu lessivés se sont développés sur des dunes aplanies et remaniés. Les nuances à faire avec ce type de sol sont : qu'il est souvent en amont et qu'il est souvent juxtaposé aux collines où il y a les brisures de pentes des anciennes plaines alluviales (app. F, photo 26). Ces endroits bien précis favorisaient la formation de dunes. Par ailleurs, on note que le PL11 n'est pas présent. En se

référant à la figure 2.17, on voit que la coupe B passe à quelques mètres de la prolongation du sol PL11. Certes, entre les distances de 500 et 540 mètres à la coupe B, le sol est en évolution régressive vers un sol lessivé à concrétions, c'est-à-dire le PL11. Pour ce qui est de la coupe C, un type de sol se rajoute le PL10 à pseudogley. Son horzontation favorisant l'hydromorphie, il est souvent en aval de sol comme les PL11. De plus, comme l'ont souligné Boulet et *al.* (1982), le fort lessivage oblique des sols de haut de pente, transporte les argiles vers les bas de pente. Ce qui provoque le développement de sols ferrugineux lessivés à pseudo-gley généralement en aval des PL10 et PL11. Par ailleurs, l'unité TH3 peut se retrouver dans l'unité PL10 quand il y a une petite dépression.

Figure 2.20 : Toposéquence élémentaire : coupe C (Exagération verticale)

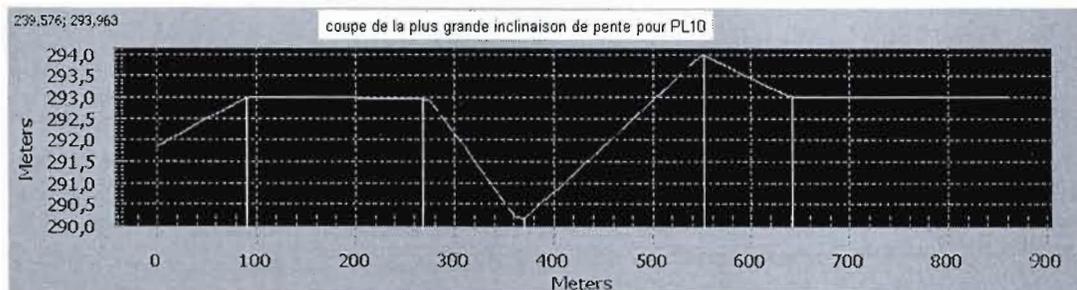


En étudiant ces coupes topographiques de la station on peut remarquer que l'agencement de la topographie et des sols restera approximativement avec la même séquence. Tout compte fait, la toposéquence élémentaire est représentée par la coupe contenant tous les scénarios de séquences topographiques, c'est-à-dire la coupe C. Par contre, il faut noter qu'il peut y avoir d'inséré dans le PL10 un TH3 de dépression (représenté souvent sur le terrain par des marres temporaires).

La séquence déterminée, il faut définir le système d'érosion. Pour y arriver, nous devons établir tous les facteurs d'érosion présents que nous utilisons dans cette méthode. Ces facteurs sont ceux de RUSLE2 (R, K, S, L et C). Dans le cercle de Barouéli, le facteur érosivité (R) ne change pas. Il restera une constante autant pour la station que pour le secteur de référence (sect. 2.6.1). Ensuite, nous trouvons le facteur de l'érodibilité (K) qui varie en fonction du type de sol : les « profils types » (tab. 3.9). Pour chaque type de sol selon

un certain couvert végétal (C), nous recueillons les données S et L selon l'analyse thématique de la carte des pentes (du DEM de la NASA, 2005) faite à l'aide de vertical mapper dans MapInfo et les données de terrains (app. A, calculs 4-5). Cette méthode consiste à comparer les valeurs observées sur le terrain et celles obtenues de la carte numérique. On trouve alors une corrélation linéaire. Celle-ci nous permet de mettre un facteur de correction sur les valeurs apparentes du DEM aux valeurs réelles et observables sur le terrain. Alors, on trouve la pente réelle moyenne, c'est-à-dire le facteur (S). Le facteur L pour un type de sol est quant à lui la longueur médiane des pentes du système d'érosion d'une unité de sol. On le trouve en faisant une coupe topographique orientée selon la plus grande pente sur toute la surface d'une unité de sol du système d'érosion (fig. 2.21). Puis on trouve la longueur minimum et maximum pour ensuite calculer la médiane (app. A, calcul 4).

Figure 2.21 : Coupe de la plus grande pente pour trouver le facteur L

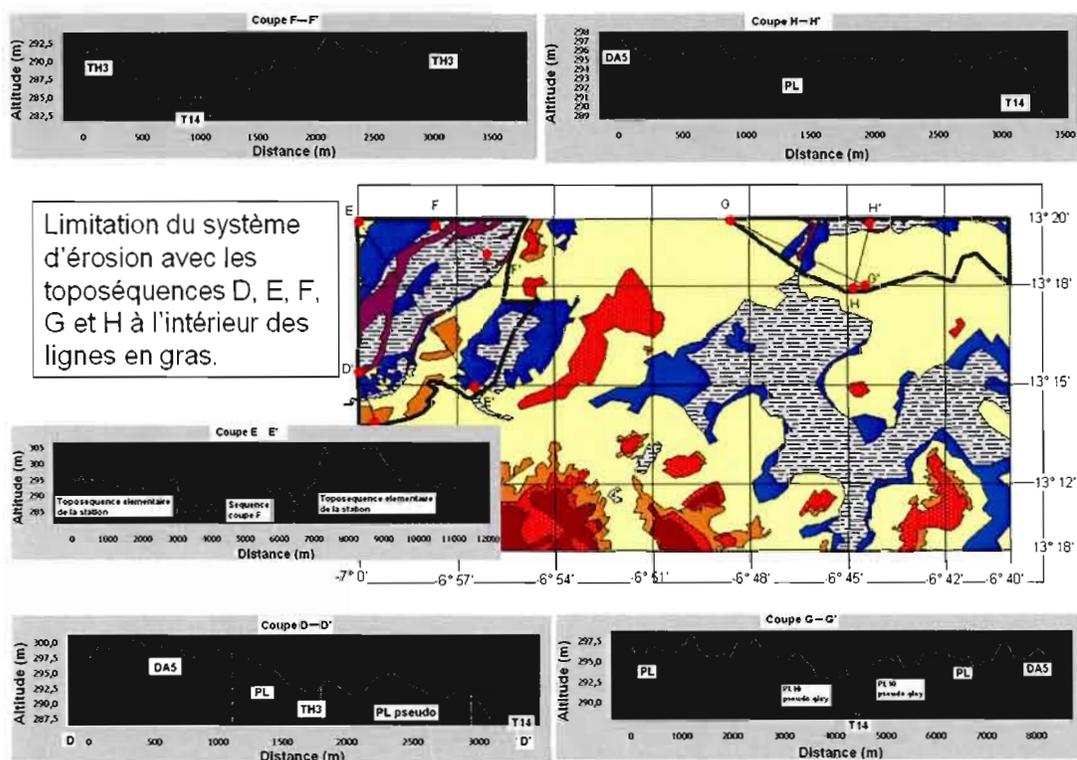


On comptabilise ensuite tous ces résultats (tab. 39) pour obtenir le fonctionnement du système d'érosion. Bref, ce système d'érosion s'appliquera à ce type de toposéquence.

Ensuite, nous avons projeté cette toposéquence sur la plus grande surface possible dans le secteur de référence. Cette méthode consiste à faire plusieurs coupes topographiques. Nous les réunissons en coupes interreliées (qui ne sont pas coupées par d'autres séquences que celles de la coupe C) pour délimiter une surface qui fonctionnera selon notre système d'érosion (fig. 2.22). Donc, nous trouvons un système d'érosion par toposéquence unitaire qui est projeté sur une grande surface dans le secteur de référence. Par contre, nous avons plusieurs systèmes d'érosion dans notre secteur de référence. En effet, d'autres unités de sols

sont présentes ailleurs dans le secteur de référence et la séquence de ces sols, selon la topographie, change aussi.

Figure 2.22 : Limitation du système d'érosion à l'aide de toposéquences : coupes D, E, F, G et H.



Dans la figure 2.22, nous voyons que la coupe D représente exactement la toposéquence élémentaire. La coupe E est quant à elle coupée en trois. Les deux extrémités font partie de ce même système d'érosion, tandis que le milieu est différent. En effet, le fleuve Niger y passe et forme un autre système d'érosion représenté par la coupe F. Puis, les coupes G et H représentent bien le système d'érosion de la toposéquence élémentaire.

Compte tenu que le secteur de référence possède d'autres séquences sol/topographie, nous pouvons affirmer qu'il y a plusieurs systèmes d'érosion. En effet, d'autres unités de sols sont présentes ailleurs dans le secteur de référence et la séquence de ces sols, selon la topographie, change aussi. La méthode de spatialisation a été démontrée à l'aide de la

toposéquence élémentaire de la station que nous symboliserons comme suit : système d'érosion II (SE-II). C'est le même procédé que nous avons utilisé pour trouver les neuf autres systèmes d'érosion (SE-I pour la coupe F) que nous verrons dans le chapitre III.

Nous avons vu que l'agencement topographie/sol peut avoir différentes séquences, et donc peut évoluer différemment. Nous avons également abordé le sujet de couplage de modèle en déterminant le système d'érosion avec les facteurs de RUSLE2. Alors, c'est ce que nous verrons dans les prochains paragraphes.

2.6 Paramétrer RUSLE2 : simulation et spatialisation

La paramétrisation du modèle est nécessaire à ce que les simulations soient le plus représentatives de la réalité. RUSLE2 doit être paramétré selon les systèmes d'érosion du milieu. C'est ainsi qu'avec les mesures et les observations de terrain combinées aux informations numérisées, nous pouvons entrer tous les paramètres que le modèle nécessite.

2.6.0 Paramétrer RUSLE2

Tout d'abord, il faut paramétrer le modèle RUSLE2 selon le milieu. La version de 12 juillet 2001 de RUSLE2 est celle utilisée. Dans un premier temps, il faut calibrer le facteur R. Les champs à remplir pour utiliser le logiciel sont les suivants : le R, le E_{130} , puis la température et la pluviométrie mensuelles. En se fiant à l'esquisse de Wischmeier on trouve un $R=350$ dans la région de Ségou. Par contre, pour être plus rigoureux, nous avons pris les données météorologiques du cercle de Barouéli consultées au SLACAER et nous avons calculé le facteur selon la formule que Breman et *al.* (1996) utilisent : $R = (AR * 0,5)$. Où AR est la valeur des précipitations annuelles en mm. C'est la même équation de ROOSE (1977) établie pour Afrique de l'Ouest concernant l'érosivité des pluies intenses. Alors, en faisant le calcul pour la moyenne des années 1999 à 2004 du SLACAER on trouve une valeur de $R = 370,5 = (741 * 0,5)$. Ensuite, le E_{130} a été calculé pour la date du 10/08/1999 des données du SLACAER. Le tableau 2.6 montre les calculs utilisés pour arriver à un E_{130} égal à 23.83 que l'on arrondit à 24. Les paramètres de la température et de la pluviométrie sont

entrés mensuellement selon les données du SLACAER et insérés dans le logiciel de RUSLE2 comme on peut l'observer à la figure 2.23.

Tableau 2.6 : Calcul de l'érosivité EL30 pour une averse individuelle (adapté de Foster et al. 2002).

| Heure (h:min) | Durée des intervalles (minutes) | Hauteur cumulée (mm) | Pluie des intervalles (mm) | Intensité (mm/h) | Unité d'énergie (MJ/ha*mm) | EL30 (MJ/ha) |
|---------------|---------------------------------|----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------------|--------------|
| 16:00 | | 0,00 | | | | |
| 16:30 | 30 | 50,00 | 50,00 | 100,00 | 0,29 | 14,4971 |
| 17:00 | 30 | 82,30 | 32,30 | 64,60 | 0,29 | 9,3332 |
| Total | 60 | | 82,30 | | | 23,83 |

Figure 2.23 : Paramètres nécessaires à l'utilisation du logiciel RUSLE2 dans la section « climate »

The screenshot shows the 'Monthly Climate' section of the RUSLE2 software. On the left, there are input fields for 'R Factor, US' (371), '10 year EI, US' (24), 'Standard EI distribution' (Barouéli), 'In Req area?' (No), 'Annual precip, mm' (741), and 'Vary soil Erod. with climate?' (Yes). On the right, a table displays monthly climate data:

| Month | Avg. temp., deg C | Month precip., mm |
|-------|-------------------|-------------------|
| Jan | 24 | 0 |
| Feb | 27 | 0 |
| Mar | 30 | 0 |
| Apr | 32 | 7.7 |
| May | 32 | 29 |
| Jun | 30 | 111 |
| Jul | 28 | 193 |
| Aug | 26 | 243 |
| Sep | 27 | 126 |
| Oct | 28 | 32 |
| Nov | 27 | 0.45 |
| Dec | 24 | 0 |

Pour ce qui est du facteur K, le nomographe de RUSLE2 fait tout le travail. Pour se faire, il faut remplir les champs du nomographe dans RUSLE2 d'une part avec le pourcentage de M.O., le type de structure, la perméabilité et le pourcentage de fragment, d'autre part avec des pourcentages d'argile, de sable et de limon. Ce sont toutes des données que l'on retrouve avec les « profils types » (tab. 3.9). En dernier lieu, il faut remplir les champs des types de drainage (sect. 1.2.1 et tab. 3.9). De plus, il faut confirmer que les calculs du modèle sont faits à partir des valeurs de précipitations du secteur de référence.

Pour faire suite, il faut insérer les paramètres du facteur C dans le modèle. Par conséquent, les informations du système agraire (sect. 2.5.3 et fig. 3.8) serviront à remplir les champs des étapes des itinéraires techniques des pratiques culturales et des opérations. Cependant, les cultures et les résidus dans cette version de RUSLE2 ne sont pas calibrés pour les régions tropicales. C'est pour cette raison que nous avons dû utiliser des nouvelles données mises à jour sur le site Internet de RUSLE2. Nous pouvons alors calibrer le modèle avec notre milieu d'étude. Les types de couvertures sont : forêt, fourré dense, savanes, cultures (mil, sorgho), sols nus lisses ou rugueux (tab. 1.1).

Le modèle RUSLE2 est utilisé pour la gestion de l'érosion. À la sortie du modèle les pertes en terres par érosion en t/ha/an sont connues. Par contre, la perte en éléments chimiques des sols par érosion n'est pas calculée par RUSLE2. C'est pour cette raison que nous utilisons des modèles mathématiques de calculs de pertes chimiques.

L'estimation de l'érosion du sol à l'aide de RUSLE2 nous renseigne sur la quantité de sol perdu et non sur la qualité du sol qui reste. Pour que les résultats du modèle soient qualitatifs par rapport à la fertilité chimique, il faut tenir compte des pertes d'éléments nutritifs dues à l'érosion en multipliant la perte de sol et la concentration de nutriments dans le sol (Breman et *al.* 1996). Les calculs de perte en carbone, azote et phosphore ont été faits pour chacune des surfaces combinatoires et des systèmes d'érosion (tab. 3.10; fig. 3.8 et 3.8). Ces calculs sont démontrés à l'appendice A et les résultats sont exposés au chapitre III. Par ailleurs, il est important de noter que les pertes de P augmentent avec un facteur d'enrichissement de 1,25, tenant compte du fait que les teneurs en nutriments sont généralement plus élevées dans le sédiment de la couche supérieure que dans le reste du sol, dû à la présence d'une proportion plus élevée de matière organique et de particules fines (Breman et *al.* 1996). Par contre, ce facteur d'enrichissement n'est pas appliqué à l'azote parce qu'on a est déjà tenu compte de l'érosion dans la teneur cible corrigée de matière organique (Breman et *al.* 1996). Voici un exemple de modèle mathématique de calcul des gains et des pertes d'azote dans un système agro-cultural de sorgho (tab.2.7).

Tableau 2.7 : Exemple de procédure utilisée pour calculer les besoins azotés des activités culturales (adapté de Breman et al. 1996)

| Calculs les besoins azotés des activités culturales | | | | |
|---|---|---|---------------|-----------------------|
| Étape 1. | Absorption de N cible du sorgho : données de Breman et al. (1996) | | | |
| | | Biomasse | Taux minimaux | Facteurs de |
| | | (kg ha-1) | de N (g kg-1) | de correction |
| | Graines | 1049 | 10,9 | 1,2 |
| | Infructescences | 565 | 2,5 | 1,2 |
| | Feuille | 847 | 5,5 | 1,3 |
| | Tige | 1573 | 2 | 1,3 |
| | Racine | 1008 | 2,5 | 1,3 |
| | Total | 5042 | = | 29 kg N/ha |
| Étape 2. | Perte d'azote de matière organique par érosion (données de SE-IIc, S26 du tab. 3.11). | | | |
| | Érosion moyenne du système d'érosion (a) | | | 144 |
| | | | | t / ha |
| | Matière organique cible (b) (%) | | | 0,45 |
| | Rapport C/N (c) | | | 7,62 |
| | Fraction de C dans la matière organique (d) | | | 0,58 |
| | Perte totale = (a * 1000 * b/100 * d/c) = | | | 49,3 kg N / ha |
| Étape 3. | Données de Breman et al. (1996) et données de SE-IIc, S26 du tab. 3.11 | | | Pertes |
| a. | par érosion (fraction de la couche supérieure) | 144 t/ha / (1400 kg/m ³ * 0,25 m * 10) = | | 0,0029 |
| | pertes azote inorganique : | | | |
| | b1. volatilisation et dénitrification (fraction) | | | 0,3 |
| | b2. lessivage : | | | |
| | [b2] infiltration (mm) | | | 840 |
| | b. | | | 124 |
| | [b2] fraction percolée | 124/840 = | | 0,15 |
| | [b2] fraction de N dans l'eau percolée | | | 0,7 |

| | | | | | | |
|--|--|-------------|----------------------------|--------------|------------------------|--------|
| | [b2] fraction de N perdue par lessivage | | $0,7 * 0,15$ = | | 0,1 | |
| | perte (= b1+b2) | | $0,3 + 0,1$ = | | 0,4 | |
| | correction pour niveau d'intensité | | | 0,75 | | |
| | fraction pertes N d'origine inorganique | | $1 - ((1 - 0,4) * 0,75) =$ | | 0,56 | |
| | Pertes totales (fraction) | | | | 0,56 | |
| Étape 4. | Apports naturels | kg N/ha | pertes | efficacité N | disponibilité | |
| | | | 3 a+b | org./ inorg. | d'azote | |
| a. | Pluie (=877 mm*0,0065 kg N mm-1) | 5,7 | 0,56 | 1 | $5,7*(1-0,56)*1$ | |
| b. | Fix. par bact. associés (=4034 kg ha-1*0,0002 kg N kg -1) | 0,8 | 0,56 | 0,6 | $0,8*(1-0,56)*0,6$ | |
| c. | Fix. par bact. libres (=5230 kg ha-1*0,00025 kg N kg-1) | 1,3 | 0,56 | 0,6 | $1,3*(1-0,56)*0,6$ | |
| d. | Mat. org. recyc. (=1008 kg ha-1*0,0025 kg N kg-1*1,3) | 3,3 | 0,56 | 0,6 | $3,3*(1-0,56)*0,6$ | |
| | Apports totaux | 11,1 | | | 4,0 kg N/ha | |
| Étape 5. | Besoins en azote | | | | | |
| | Absorption cible (kg N ha-1)- Voir étape 1 | | | | | 29 |
| | Perte de N dans la matière organique par érosion (kg N ha -1) - Voir étape 2 | | | | | + 59,3 |
| | | | | | | = 34,8 |
| | Apports naturels (kg N ha-1) - Voir étape 4 | | | | | - 4 |
| | N-manquant (kg N ha-1) | | | | | = 84,3 |
| | Fraction perte d'azote de l'engrais - Voir étape 3a +b | | | | | 0,56 |
| N apporté par l'engrais (84,3 / (1 - 0,56)) | | | | | = 191,6 kg N/ha | |

La sous-zone 37 est celle utilisée par Breman et *al.* (1996). C'est une zone plus productive que celle de la zone d'étude. Par contre, ce modèle donne une très bonne idée de grandeur des gains et des pertes en azote. Nous pouvons remarquer que la plante est une grande cause d'extraction d'azote du sol avec 29 Kg N/ha. Les plus grandes pertes sont causées par érosion de l'azote organique avec 49,3 Kg N/ha. Elles sont plus grandes que les apports naturels en azote. Alors, dans un système cultural de sorgho comme celui-ci avec les données du système d'érosion SE-IIc (S26), le manque d'azote pour combler la demande par la plante et l'érosion est de 84,3 Kg N/ha. Ce qui nécessite un apport d'engrais de 191,6 Kg N/ha en tenant compte du pourcentage d'azote utilisé pour une quantité d'engrais. Selon cet exemple on peut facilement croire que la culture continue cause une grande dégradation chimique des sols dans la zone d'étude.

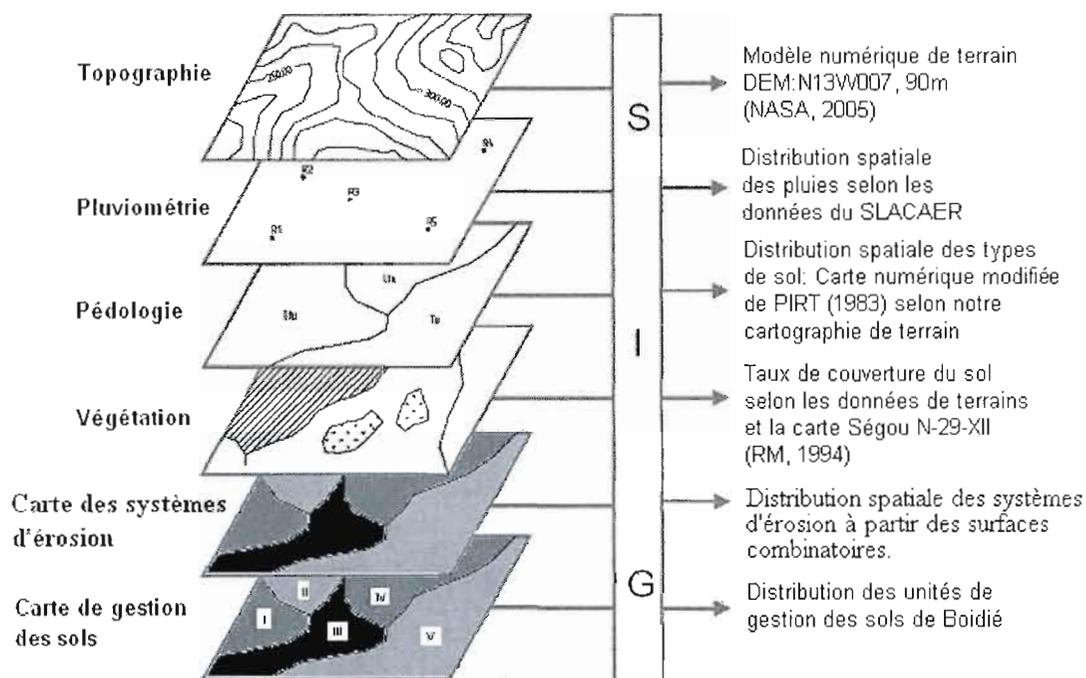
Bref, les modèles mathématiques de calculs de pertes de nutriments combinés au modèle de pertes en terres (RUSLE2), nous permettent de voir l'impact quantitatif (perte en terre) et qualitatif (pertes en nutriments) de l'érosion en nappe. En d'autres mots, nous connaissons les extrants du système d'érosion (fig.2.12). Ceci nous permettra de trouver les intrants nécessaires au système d'érosion pour obtenir un bilan positif dans la nutrition des sols. Ces résultats serviront à la régulation du système d'érosion du sol en contrôlant ses bilans en intrants et extrants tant au niveau quantitatif que qualitatif. Ces résultats doivent alors être spatialisés d'une part selon les impacts de l'érosion en nappe sans les simulations des modèles et d'autre part avec les simulations pour diminuer les impacts de l'érosion. Ceux-ci peuvent être spatialisés à l'aide des SIG. À cet égard, nous verrons dans la prochaine section la méthode de spatialisation.

2.6.1 Spatialisation

La spatialisation ne peut se faire sans l'utilisation des SIG. Le logiciel utilisé est MapInfo et Vertical Mapper. De toute évidence ce logiciel doit être accompagné de support numérique contenant plusieurs informations. La spatialisation se réalise en superposant plusieurs couches (fig. 2.24). La topographie, la pluviométrie, la pédologie et la végétation sont des couches d'informations numériques que l'on utilise pour atteindre l'objectif de ce

mémoire qui consiste à spatialiser les facteurs de l'érosion en nappe et ainsi produire une carte de gestion des sols qui mène à une gestion durable des terres au Mali.

Figure 2.24 : Utilisation des SIG (adapté de Nafo, 2000)



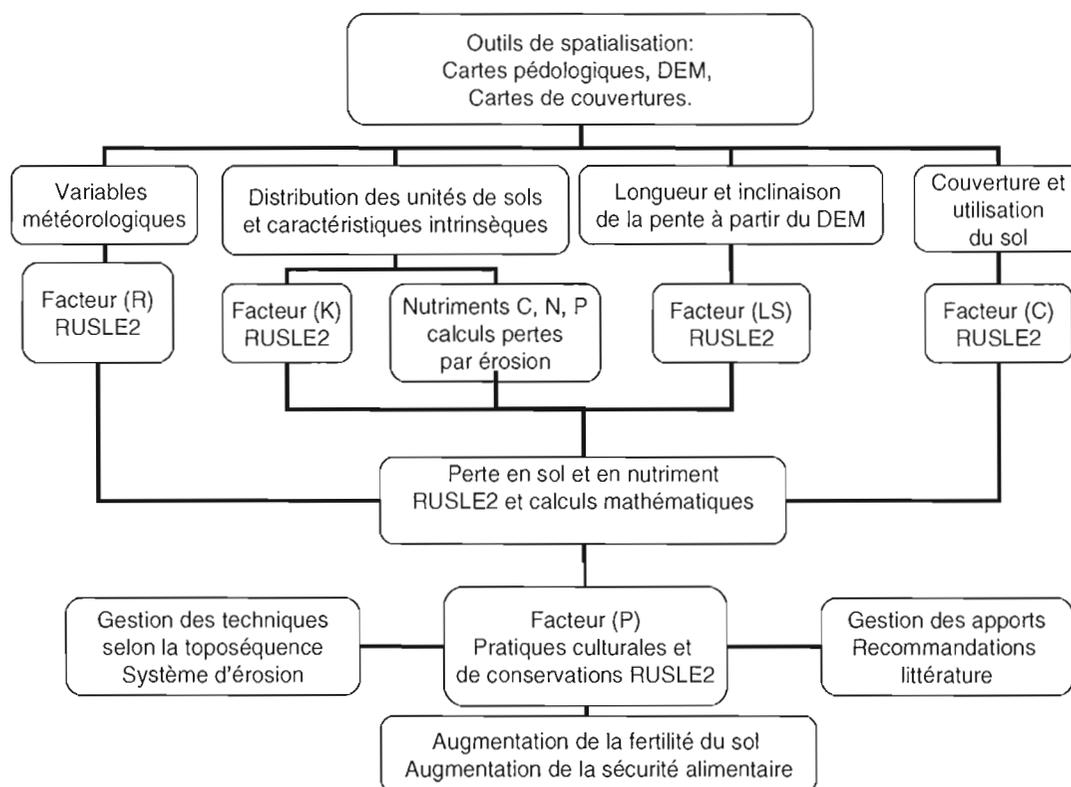
Par ailleurs, la figure 2.25 montre le modèle conceptuel de la spatialisation utilisé. Celui-ci indique tout le parcours des données. Elles sont d'abord recueillies à l'aide des SIG envoyés dans le modèle numérique RUSLE2, puis donnant des résultats quantitatifs et qualitatifs sur l'impact de l'érosion en nappe, des techniques de gestions de terres sont proposées afin d'obtenir une gestion durable des terres qui augmentera la sécurité alimentaire.

Dans la suite logique du modèle conceptuel, la spatialisation se fera à partir des résultats des calculs de la perte en sol et en nutriments d'un système d'érosion précis. C'est ce que nous verrons dans la section 3.3. Cette nouvelle analyse de résultats donnera, une fois spatialisée, une carte des impacts de l'érosion en nappe du secteur de référence. Cette carte

comportera neuf systèmes d'érosion où l'on pourra observer dans chacun les valeurs moyennes de pertes en terre et en nutriments (tab. 3.11 à 3.14).

Finalement, l'utilisation de ces résultats pour faire des simulations avec le modèle RUSLE2 nous permettra de faire voir l'effet de la diminution de l'érosion sous le seuil de tolérance (de 2 à 11 t/ha/an; tab. 3.9 à 3.12) et à optimiser les activités agricoles relativement à chaque système d'érosion. Ceux-ci seront spatialisés en unité de gestion des sols. De plus, pour chaque unité, des méthodes de gestion des sols seront proposées. Bref, nous formerons des unités de gestion qui serviront à donner des pratiques culturales et de conservation qui optimiseront la productivité des terres à n'importe quel emplacement dans le secteur de référence.

Figure 2.25 : Modèle conceptuel de la spatialisation des impacts de l'érosion en nappe.



CHAPITRE III

RÉSULTATS

Dans ce chapitre, nous verrons les résultats de nos travaux. On y retrouve les résultats de toutes les analyses de laboratoire et des calculs d'érosion (pertes en sol et pertes en nutriments). Par ailleurs, on retrouve les résultats des analyses de toposéquences, de système d'érosion et de profils types.

3.1 Caractérisation des « profils types »

Cette section caractérise les « profils types » à l'aide des analyses de laboratoire selon les principes les plus importants. Ceux-ci serviront de référence pour tous les calculs d'érosion et de gestion de nutriments dans cette étude. L'objectif des « profils types » est de représenter le mieux possible et dans la grande majorité des cas les sols en tout point dans le secteur de référence.

3.1.0 Complexe d'oxyhydroxydes, lessivages des bases et toxicité aluminique

Dans un premier temps, voyons les résultats des quatre tests de dispersion. Leur interprétation s'effectue avec la lecture de l'absorption atomique. Le tableau 3.1 nous montre les résultats de la dispersion combinés à l'absorption atomique.

En raison des grandes quantités d'Al et de Fer observé lors du test 4, nous savons que les sols échantillonnés sont des sols à oxyhydroxyde de fer et d'aluminium. Les analyses de l'absorption (tab. 3.1 et fig. 3.1-3.3) et de diffraction-x (tab. 3.6) montrent qu'il peut avoir différentes formes dans les types de sols étudiés. On peut nommer les formes suivantes : oxyhydroxydes de fer sous formes amorphes solubles (FeOH_2^+ et $\text{Fe}(\text{OH})_3$), oxyhydroxydes

de fer sous formes cristallines (goethite FeO.OH et l'hématite Fe_2O_3), oxyhydroxydes d'Al sous formes solubles Al^{3+} et non échangeable $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ et $\text{Al}(\text{OH})_2^+$.

Tableau 3.1 : Résultats des tests de dispersion avec la lecture de l'absorption atomique où Aba : absorption atomique et T : test avec le numéro.

| Nombre de ppm des éléments dans chacun des sols pour chaque test. | | | | | | | |
|--|--------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Sols | Éléments | | | | | | |
| | No de tests | Al | Fe | Mg | K | Mn | Ca |
| TH3 F2 | AbaT1 | 14 | 0 | 1 | 2 | 0 | 3 |
| | AbaT2 | 21 | 1 | 2 | 4 | 2 | 6 |
| | AbaT3 | 17 | 6 | 28 | 16 | 5 | 193 |
| | AbaT4 | 16379 | 5509 | 50 | 52 | 22 | 373 |
| PL10 F4 | AbaT1 | 4 | 0 | 1 | 3 | 0 | 3 |
| | AbaT2 | 14 | 0 | 1 | 4 | 1 | 2 |
| | AbaT3 | 55 | 14 | 7 | 12 | 7 | 52 |
| | AbaT4 | 10816 | 1677 | 7 | 67 | 11 | 100 |
| TH3 F5 | AbaT1 | 8 | 0 | 2 | 3 | 0 | 8 |
| | AbaT2 | 3 | 4 | 7 | 8 | 1 | 18 |
| | AbaT3 | 99 | 45 | 36 | 16 | 2 | 307 |
| | AbaT4 | 16435 | 3712 | 25 | 66 | 4 | 605 |
| DA5 F8 | AbaT1 | 17 | 5 | 2 | 4 | 0 | 7 |
| | AbaT2 | 4 | 0 | 2 | 5 | 1 | 4 |
| | AbaT3 | 35 | 7 | 3 | 12 | 0 | 29 |
| | AbaT4 | 10521 | 1815 | 13 | 50 | 6 | 81 |
| TC3 F10 | AbaT1 | 4 | 0 | 3 | 5 | 1 | 2 |
| | AbaT2 | 80 | 2 | 0 | 5 | 0 | 0 |
| | AbaT3 | 17 | 47 | 2 | 16 | 0 | 13 |
| | AbaT4 | 324 | 184 | 5 | 25 | 1 | 24 |

Par ailleurs, les sols ne sont pas assez riches en M.O. (tab. 3.9) pour faire le prétraitement avant l'analyse granulométrique. À la figure 3.1, il est présenté le graphique de comparaison de la concentration en aluminium (ppm) évoluant en fonction des quatre tests de dispersion selon les sols TH3 (F2), PL10, TH3 (F5), DA5 et TC3. À la figure 3.2, c'est le même type de graphique, mais pour le fer.

Figure 3.1 : Concentrations d'aluminium dans les eaux de filtration des sols pour chaque test de dispersion.

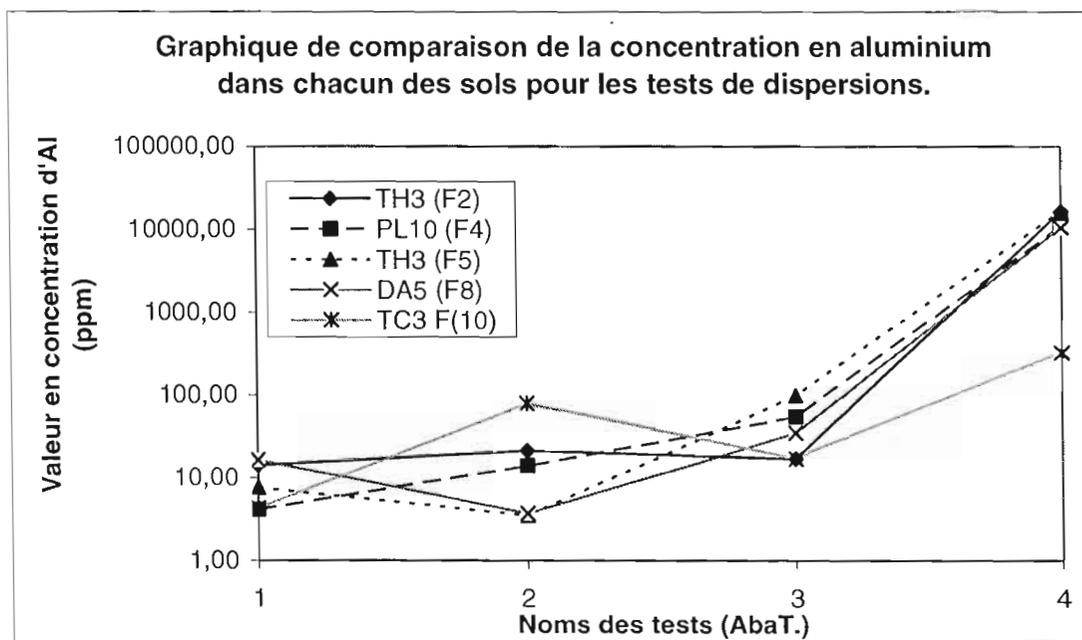
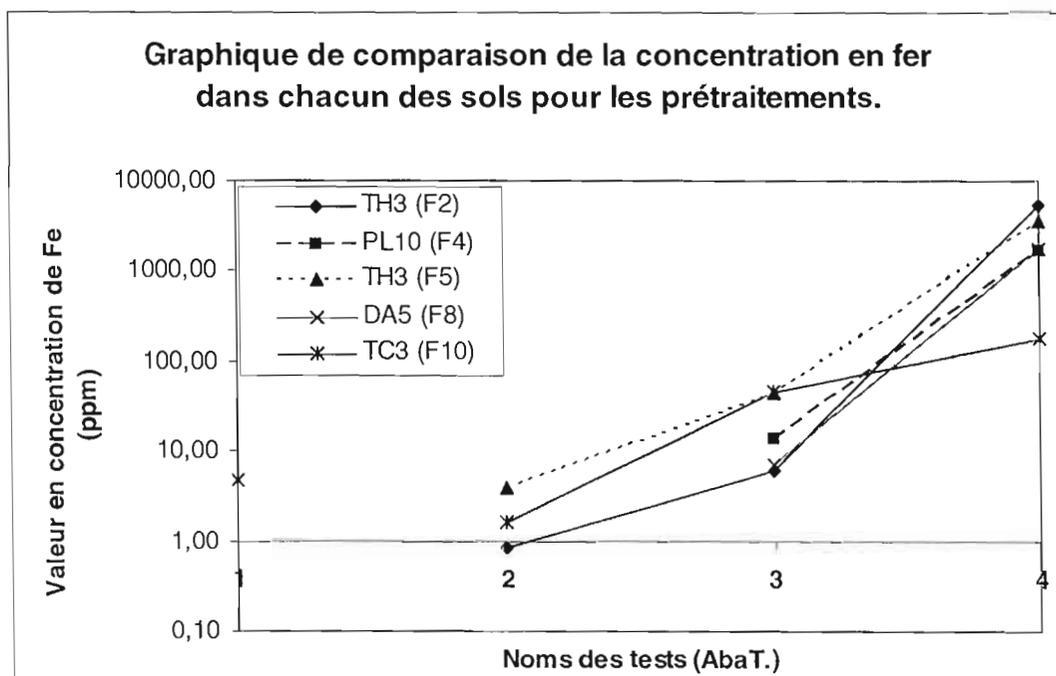


Figure 3.2 : Concentrations de fer dans les eaux de filtration des sols pour chaque test de dispersion.



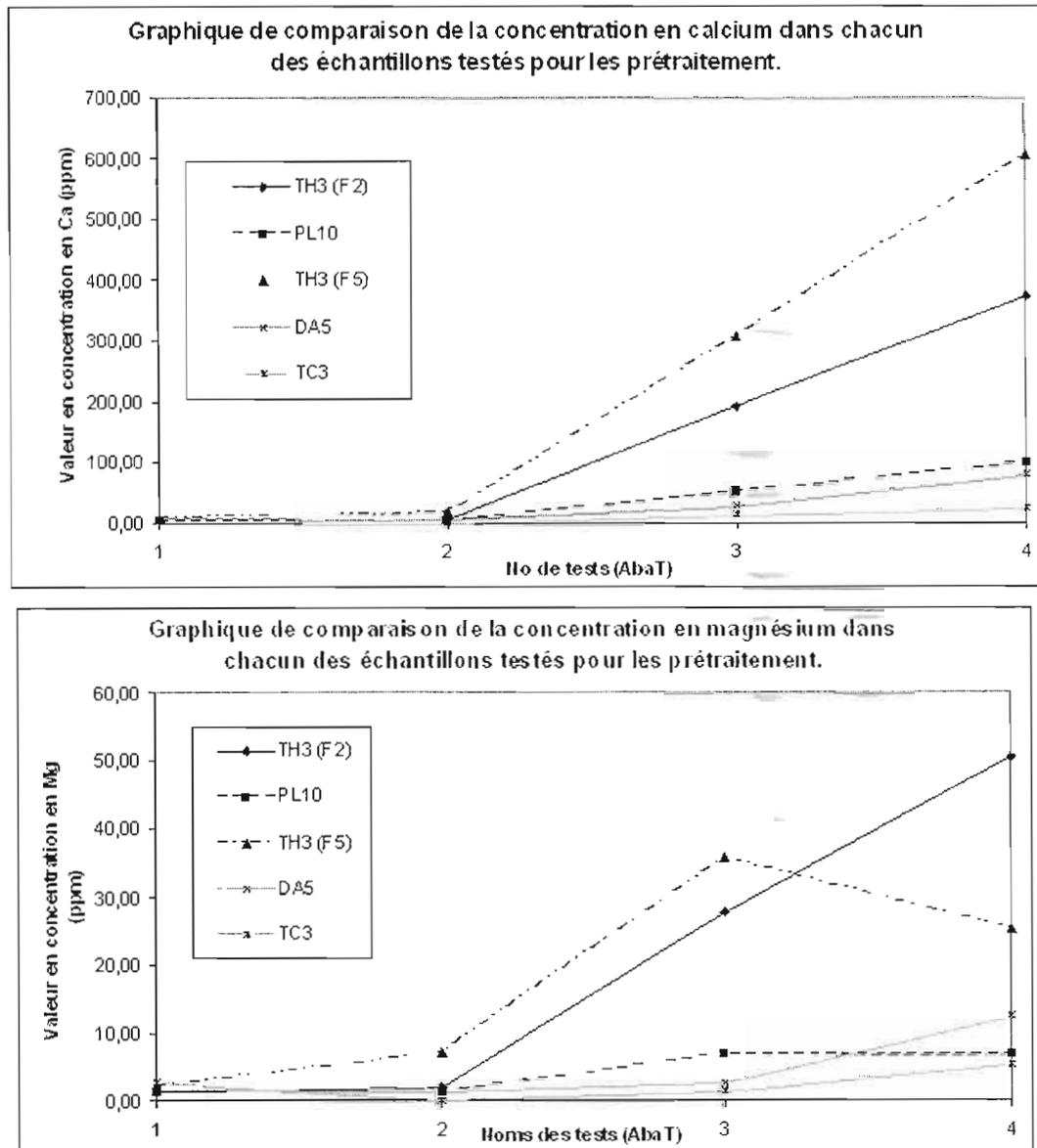
À l'aide de ces deux graphiques, nous pouvons remarquer que les oxyhydroxydes sont mis en solution en faible quantité au test 1, 2, 3 et en grande partie au test 4. L'axe des ordonnées est en fonction logarithmique pour représenter l'échelle de grandeur de la dispersion des tests. Si l'on observe le graphique de l'Al, le test 1 montre une petite dispersion de l'Al. Il varie en unité pour les sols PL10, TH3 (F5), TC3 et à la dizaine pour les sols TH3 (F2) et DA5. Le test 2 est concluant que pour le sol TC3. Le test 3 montre une dispersion de l'Al avec des valeurs à l'échelle de la dizaine pour tous les sols. Les valeurs de dispersion du test 4 sont à une autre échelle. L'aluminium est dispersé selon des concentrations à l'échelle de centaine de ppm pour le sol TC3 et de dizaine de milliers pour les autres. Ce sont approximativement les mêmes échelles d'efficacités pour le graphique du fer. Donc, nous pouvons conclure que le test 4 qui est un prétraitement à l'analyse granulométrique est nécessaire puisqu'il produit une bonne dispersion des oxyhydroxydes de fer. Par ailleurs, nous pouvons affirmer que ces sols ont des complexes entre argile, fer et l'aluminium. Nous pouvons conclure que les sols de la zone d'étude sont des sols ferrugineux et à oxyhydroxydes.

Par ailleurs, l'analyse montre également que les bases (Ca, Mg, K, Mn) ont des valeurs beaucoup plus faibles (tab. 3.1). La figure 3.3, montre les graphiques de concentrations en ppm de magnésium et de calcium. On remarque encore des concentrations plus faibles, mais il faut aussi noter que la dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium (test 3) a une efficacité significative pour les sols TH3.

Le tableau 3.1 et la figure 3.3 indiquent que ces sols sont sensibles au lessivage des bases. De plus, les faibles quantités de bases dispersées des sols PL10, DA5 et TC3 même avec l'utilisation des quatre tests montrent des carences en bases.

La dispersion des éléments Al et Fe montre une saturation du milieu en ces éléments. En effet, la teneur en Al des lixiviats va jusqu'à 16 435 ppm et pour le Fe jusqu'à 5 509 ppm. De toute évidence, les sols TH3, PL10 et DA5 montrent des toxicités aluminiques. De plus, la forte teneur en oxyhydroxydes associée à de faibles teneurs en bases confirment que ces sols sont lessivés en bases et par le fait même sont acides.

Figure 3.3 : Concentrations de Ca et Mg dans les eaux de filtration des sols pour chaque test de dispersion.



Compte tenu de ce qui précède, nous pouvons remarquer des différences entre les fiches. C'est pour cette raison que nous ferons une analyse statistique de tous les résultats des 34 échantillons. Le but est de caractériser des « profils types » en faisant une distinction des éléments chimiques selon les unités de sol.

3.1.1 Caractérisation selon la texture et les éléments chimiques

L'analyse statistique est utilisée pour faire des corrélations entre les trente-quatre échantillons et leurs caractéristiques intrinsèques dans le but de former des « profils types » de sol. Par exemple, un profil type de l'unité de sol PL10 aura x % d'argile, x % de limon et x % de sable dans la plupart des cas dans le secteur de référence. Pour se faire, l'analyse statistique utilise les résultats des analyses granulométrique et chimiques (C, N, P, M.O., pH).

Tout d'abord, voici le tableau de résultats des ANOVA selon le type de sol discriminé d'après les facteurs chimiques (C, N, C/N, P et pH).

Tableau 3.2 : Résultats des ANOVA selon le type de sol

| | F(3,24) | p-valeur | R ² | Résultats du HSD |
|---------------|---------|----------|----------------|--------------------------|
| Carbone | 9.62 | 0.0002 | 0.55 | TH3 > PL10 PL11 DA5 |
| Azote | 4.37 | 0.0137 | 0.35 | TH3 > DA5 |
| Carbone/Azote | 9.60 | 0.0002 | 0.55 | TH3 > PL10 DA5 PL11 |
| Phosphore | 4.34 | 0.0141 | 0.35 | PL11 > PL10 |
| pH | 0.31 | 0.8160 | 0.04 | <i>aucune différence</i> |

*p<0.05

À partir du tableau 3.2, on peut dire que la variable pH ne varie pas de façon significative selon le type de sol. De plus, le petit nombre d'échantillons pour chaque sol nous a obligés de l'exclure de l'analyse discriminante. Le pH n'a donc pas été corrélé à certains types de sols. En réalité, le pH des sols tropicaux cultivés dépend presque entièrement des facteurs externes. Effectivement, nos échantillons sont en majorité modifiés par les actions de l'homme. Ces actions sont très diversifiées sur un territoire ayant des caractéristiques hétérogènes. Toutefois, l'analyse du pH des sols étudiés montre un résultat concluant. Le pH des sols se situe entre 3,66 et 6,45 avec un pH moyen de 4,69. Somme toute, les sols de la zone d'étude sont acides.

Tableau 3.3 : Corrélations des deux fonctions discriminantes selon les variables

| Prédicteur | Corrélations | |
|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | 1 ^{re} fct discriminante | 2 ^e fct discriminante |
| Carbone | 0.83 | 0.45 |
| Azote | 0.45 | 0.47 |
| Carbone/Azote | 0.88 | 0.10 |
| Phosphore | -0.33 | 0.71 |
| <i>Corrélation canonique</i> | <i>0.78</i> | <i>0.62</i> |
| <i>Valeur propre</i> | <i>1.52</i> | <i>0.62</i> |

Le tableau 3.3 contient les corrélations entre les deux fonctions discriminantes significatives et les variables chimiques. Nous utilisons une valeur seuil de 0.50 pour déterminer la composition de la fonction discriminante.

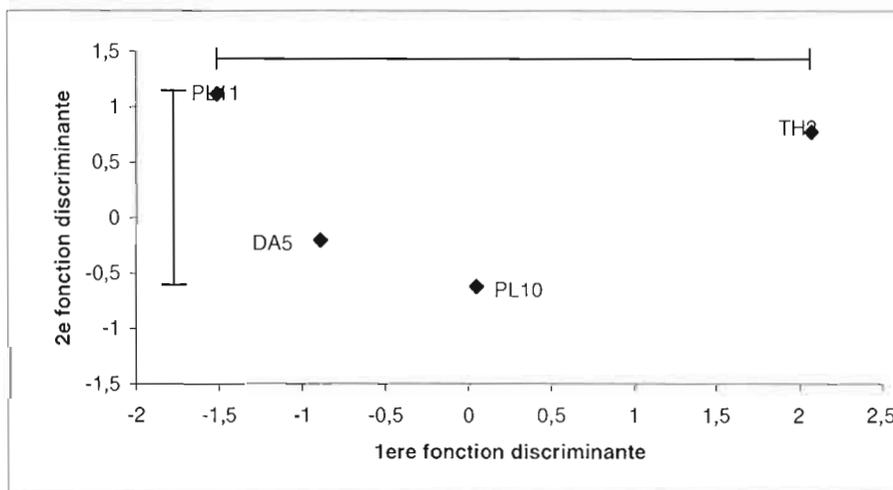
La première fonction discriminante est liée à la mesure de carbone et du rapport carbone azote. La deuxième fonction discriminante est liée au phosphore. Les corrélations canoniques sont les corrélations multiples entre les variables chimiques et la fonction discriminante. À la figure 3.4, la première fonction discriminante montre une séparation entre TH3 et les trois autres types de sols tandis que la deuxième fonction discriminante indique une séparation entre PL11 et PL10. En d'autres termes, le TH3 a un écart significatif des valeurs de C et de C/N par rapport aux PL10, PL11 et DA5. En effet, les observations de terrain montrent que les sols de bas-fonds (TH3) contiennent plus de M.O. Ceci est dû à la difficulté de cultiver ces sols. Ce sont des sols lourds et durs à travailler à la houe. Ils sont pratiquement tous inondés en saison des pluies ce qui limite la variété culturale d'exploitation de la terre. Par conséquent, les sols sont laissés en jachère ou tout simplement à leur état naturel, ce qui favorise des valeurs de carbone plus élevées.

La deuxième fonction met en évidence la distinction de la teneur en phosphore du PL11 par rapport au PL10. De surcroît, nous avons vu que les pertes en phosphore sont principalement sous forme solide (sect. 1.2.5 et 1.3). Nous pouvons voir ces distinctions au graphique 3.4 et dans le tableau 3.3. Par contre, si l'on regarde la différence des moyennes

(tab. 3.9) entre la teneur en P des PL11 et des PL10, elle est égale à 0.01 g/Kg de sédiment. C'est ce qui nous permet de conclure que la différenciation est minime et négligeable. En effet, le niveau de confiance de la représentativité des analyses de P est supérieur à la différence de 0.01.

Bref, les différenciations statistiques des variables chimiques selon les types de sols ne sont pas toutes possibles. Celles qui sont les plus probables sont le carbone et l'azote (tab. 3.4). Tandis que pour le phosphore, la faible quantité de nos échantillons et la faible corrélation entre les sols ne nous permettent pas de les distinguer statistiquement.

Figure 3.4 : Graphique des valeurs moyennes des types de sols selon la première et la deuxième fonction discriminante.



Nous avons fait l'analyse de variance de la texture du sol (argile, limon et sable) selon les 6 types de sol (DA5, PL10, PL10G, PL11, TC4 et TH3). Nous avons ensuite appliqué le Tukey's Studentized Range (HSD) pour les comparaisons deux à deux. Il est important de noter que l'utilisation de la transformation arc sinus nous donne les mêmes résultats.

Tableau 3.4 : Corrélations agrégées des variables chimiques.

| | Azote | Carbone/Azote | Phosphore |
|---------------|-------|---------------|-----------|
| Carbone | 0.82* | 0.64* | -0.14 |
| Azote | | 0.12 | -0.28 |
| Carbone/Azote | | | 0.05 |

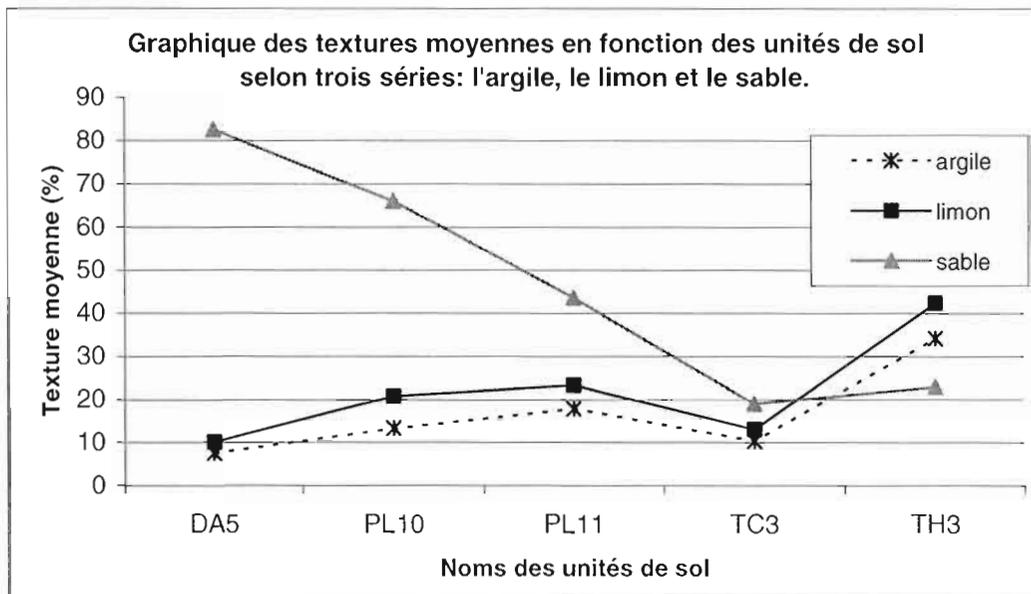
*p<0.05

Ces analyses montrent que l'on peut différencier statistiquement les types de sols selon leur texture. En effet, le TH3 et le PL10G se distinguent par leurs pourcentages plus élevés en argile. Le DA5 quant à lui se différencie par son haut pourcentage de sable. Par ailleurs, certains sols n'ont pas été intégrés dans les analyses statistiques puisque leur distinction est facilement observable par leur facteur de station. Le TC5 est une cuirasse latéritique qui affleure aux sommets du secteur de référence. De telle sorte qu'elle est très facile à identifier. Le T14 est un sol d'affluent ou de défluent où l'eau y est installée de façon permanente.

Tableau 3.5 : Résultats des ANOVA selon le type de sol

| | F(5,27) | p-valeur | R ² | Résultats du HSD |
|--------|---------|----------|----------------|--|
| Argile | 9.88 | <0.0001 | 0.65 | TH3 > PL11 PL10 TC3 DA5 PL10G > PL10 TC3 DA5 |
| Limon | 3.92 | 0.0084 | 0.42 | TH3 > TC3 DA5 |
| Sable | 15.69 | <0.0001 | 0.74 | DA5 > PL11 PL10G TH3 TC3 PL10 > PL10G TH3 TC3 |

Figure 3.5 : Graphique de différenciation des types de sols selon la texture.



Dans le même ordre d'idées, les observations de terrain nous permettent également de faire la distinction des unités de sol du point de vue granulométrique. Le TC3 se distingue par sa forte teneur en gravier (fig. 3.5 et app. C) et est souvent en haut de pente. Avec un seul coup de pioche il est très facile de les distinguer. Il se distingue des PL11 qui ont eux aussi des concrétions.

Bref, nous avons vu à travers cette analyse que les sols sont acides et que l'on peut distinguer les types de sols selon certaines variables. Celles-ci ont été identifiées comme la texture (% de gravier, % d'argile et % de sable), les éléments chimiques C, N, puis finalement selon leurs localisations dans la topographie (bas-fond, cuirasse et haut de pente). Par conséquent, il faut vérifier les relations que nous pouvons faire entre les minéraux des sols et des matériaux d'origines. La caractérisation des argiles sera faite pour comprendre les complexes argilo-humiques, argilo-oxyhydroxydes et les propriétés d'échange cationique. Pour ce qui à trait aux matériaux d'origines, leur caractérisation nous donnera de l'information sur le type d'argile produit par altération des roches et l'acidité du sol résultant.

3.1.2 Caractérisation des argiles et matériaux d'origine des « profils types »

Avec l'analyse de diffraction-x, nous pouvons tirer des conclusions importantes sur les argiles et les matériaux d'origines. Ces résultats nous aideront à comprendre l'évolution des sols et certaines distinctions selon les matériaux d'origines.

Dans un premier temps, il est évident que le minéral dominant dans les argiles est la kaolinite de type 1/1 (tab. 3.6) avec des pourcentages de 75, 75, 61 et 24 % respectivement pour les sols TH3 (F2), PL10 (F4), TH3 (F5), DA5(F8), TC3 (F10). Les sols de bas-fond (TH3) ont les plus grands pourcentages de kaolinites et les sols de sommets les plus petits (TC3 et DA5). Des tests avec l'éthylène glycol ont prouvé qu'il y avait très peu de smectite. Contrairement à cette dernière la kaolinite est une argile peu gonflante avec une faible capacité d'échange cationique. Par contre, elle a une forte adsorption avec les métaux lourds et plus particulièrement l'Al et le Fe. C'est ce qui favorise les toxicités aluminiques et ferriques.

Par ailleurs, les autres minéraux les plus importants dans les argiles sont le quartz et la muscovite de 28.5 à 43 % (tab. 3.6). En effet, la géologie de la zone d'étude montre une géochimie acide (sect. 2.3.3). Cela confirme que les sols du secteur de référence sont des sols tropicaux acides (sect.1.3.4) d'altération chimique. Les analyses du pH ont également montré que les sols peuvent tous être caractérisés comme acides.

Outre l'acidité et les types d'argiles, l'analyse aux rayons-x montre un pourcentage de forme amorphe assez fort. La présence d'oxyhydroxydes n'a pas été identifiée dans l'analyse. Ceux-ci devraient faire partie de la zone amorphe et appuient l'analyse de l'absorption atomique que les sols sont à oxyhydroxydes.

Dans un deuxième temps, les matériaux d'origines ont été étudiés à partir des échantillons R1 à R9 et R11-12. Les résultats de l'analyse à la diffraction-x sont exposés au tableau 3.7. Les analyses présentent deux types de cuirasse, le R9 une cuirasse de minéraux bruts et le R11-12 une cuirasse de démantèlement. On peut le voir facilement avec la présence

d'hématite non altérée dans R9 et d'éléments en traces comme le feldspath, l'albite et la gibbsite qui évoquent une altération moindre.

Tableau 3.6 : Analyse des argiles à la diffraction-x

| Tableau des analyses au R-X des argiles des sols: TH3 (F2), PL10 (F4), TH3 (F5), DA5 (F8) et TC3 (F10) | | | | | |
|---|---|---|--|--|---|
| Échantillons Minéraux | TH3 (F2) | PL10 | TH3 (F5) | DA5 | TC3 |
| Noms | % | % | % | % | % |
| Kaolinite | 75,3 | 75,2 | 71,6 | 60,2 | 24,3 |
| quartz | 10,1 | 8,6 | 13,2 | 11,5 | 25,0 |
| muscovite | 4,3 | 6,7 | 4,6 | 5,9 | 28,5 |
| chlorite | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,4 |
| feldspath | 1,9 | 3,5 | 3,4 | 5,6 | 2,8 |
| bayerite | 1,2 | 1,4 | 2,0 | 2,2 | 2,8 |
| gibbsite | 1,6 | 0,9 | 0,8 | 2,6 | 2,1 |
| dolomite+ calcite | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,8 | 4,5 |
| smectite | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| albite | 0,7 | 1,9 | 2,2 | 2,6 | 3,8 |
| magnétite | 0,5 | 0,7 | 1,4 | 1,9 | 1,7 |
| apatite | 0,7 | 1,2 | 0,8 | 2,6 | 2,1 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| I | 0,2976 | 0,4353 | 0,5634 | 0,5132 | 0,1689 |
| % de zone amorphe | 48,5 | 35,3 | 41,2 | 33,1 | 30,5 |
| % cristallisé | 53,8 | 45,4 | 47,5 | 36,5 | 39,8 |
| Test éthylène glycole | Très peu d'argile gonflante (smectite) | Très peu d'argile gonflante (micas et smectite) | Smectite (avec une intensité du pic de 26) | Peu d'argile gonflante (sans smectite) | Smectite (avec une intensité du pic de 9) |
| avec chauffage | (idem) | (idem) | (idem) | (idem) | (idem) |

Par ailleurs, la météorisation des roches peut expliquer en partie le fort pourcentage de sable dans les sols PL10 et DA5. En effet, les roches superficielles sont soit la cuirasse (50 à 60% de quartz), soit le grès (85% de quartz). Ceci explique le développement de sol sableux. Cette analyse nous montre les types de roche mère sur lesquels se sont développés les sols de la zone d'étude, comme le montre la coupe stratigraphique des roches du bassin de Sikasso (fig. 2.4). D'ailleurs, l'altération des roches de la zone d'étude conduit à la formation de sols riche en kaolinite. Ceci est mis en évidence par les tableaux 3.6 et 3.7 qui montrent un fort pourcentage de kaolinite.

Tableau 3.7 : Analyse des roches mères à la diffraction-x

| Tableau des analyses au R-X roches R1 à R11-12 | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------|---------------------|
| Echantillons | R1: galet plaine inondable | R2: kaolinite Basydiallabougou | R3: grès | R4: schiste vert | R5: kaolinite blanche | R6: kaolinite schiste mauve | R9: cuirasse | R11-12: cuirasse |
| Minéraux | % | % | % | % | % | % | % | % |
| quartz | 2 | 2 | 85 | 68 | 69 | 80 | 50 | 60 |
| Kaolinite | 2 | 91 | 10 | 4 | 17 | 6 | 21 | 37 |
| (mus +bio) | 0 | 0 | 4 | 21 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| muscovite | 0 | 3 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| hématite | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 19 | 3 |
| albite | 1 | 0 | 0 | 2 | 3 | 2 | 4 | 0 |
| feldspath alcalin | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 0 |
| calcite | 93 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| gypse | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| pyroxènes | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| gibbsite | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| pyrite | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| sidérite | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 98 | 98 | 15 | 32 | 31 | 20 | 50 | 40 |

C'est ce qui nous mène à réfléchir sur l'évolution du sol selon son milieu. La présence moindre de kaolinite dans le sol TH3 (F5) est probablement due à son emplacement dans la plaine inondable (régime hydrique résultant principalement du débordement du fleuve Niger et non du ruissellement sur le bassin versant des plaines limono-sableuses des sols ferrugineux). Le PL10 est un sol ferrugineux peu lessivé de la partie aval de la toposéquence du bassin versant. Tandis que les sols DA5 et TC3 sont en haut de pente et ont moins de Kaolinite.

L'analyse nous a permis de montrer les types de roche mère sur lesquels se sont développés les sols de la zone d'étude. De plus, elle montre que l'altération de la roche mère de la zone d'étude conduit à la formation de sols riches en kaolinite et en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium. La kaolinite dans les sols a une importance significative dans le processus de l'érosion hydrique (érodibilité, érosivité, CEC, stabilité, éléments nutritifs et pour le choix de techniques de conservation et de restauration des sols) ainsi que les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (chap. I). Cette analyse est concluante par rapport à la caractérisation des sols de la zone d'étude.

Pour faire suite, nous analyserons par l'exoscopie les dépôts quaternaires de sables. La cartographie faite par le PIRT montre deux types de sols développés sur des dunes et des dunes remaniées ou aplanies. Pour réussir à différencier ces sols, nous ferons une analyse de l'exoscopie des grains de quartz.

3.1.3 Réfutation d'un profil avec l'exoscopie

Nous avons remarqué que la différenciation des unités de sols PS3 et DA5 n'est pas possible à faire sur le terrain. Alors, nous avons fait l'exoscopie des grains de quartz. Voyons tout d'abord comment distinguer les grains de quartz. Selon Le Ribault (1977), la quantité de grains ronds-mats dans un sable augmente proportionnellement à l'intensité de l'action éolienne subie par celui-ci. Par exemple: dans les désert 96% des grains sont ronds-mats; près des plages, les sables de dunes côtières contiennent également une très forte proportion (80 % et plus). Dans notre analyse à la loupe binoculaire, nous avons identifié des grains ronds-mats dans les sables où la géomorphologie montrait des signes de dunes ou anciennes dunes. Après vérification du pourcentage, nous pouvons conclure qu'il n'y a pas de dune (non-remaniées) d'origine éolienne ou côtière.

Alors, il faut se demander à quels autres types de dunes les études du PIRT se réfèrent. Les seules dunes qui pourraient y être représentées sur le terrain (en excluant les dunes éoliennes et côtières non-remaniées) ce sont celles formées par le fleuve Niger lors de changements de régimes hydriques dans le temps géologique (tab.2.2). Il faut vérifier si les sables de ces dunes sont remaniés, mélangés ou intouchés. Selon Le Ribault (1977), les sables mélangés montrent seulement des grains RM et EM et non des grains de transition GTr. Les sables remaniés ont quant à eux plusieurs grains de transitions. Finalement, les dunes ont un très bon classement. Pour voir les caractéristiques des grains de quartz pour définir RM, EM et GTr, il faut se référer aux photos de l'exoscopie des grains de quartz (app. V). Après vérifications des pourcentages des grains de quartz, nous avons observé un fort pourcentage de grains remaniés. Donc, ces sols sont tous des anciennes dunes aplanies et remaniées des dépôts du fleuve Niger.

Par ailleurs, l'observation à la loupe binoculaire a permis d'identifier des grains d'oxydes de fer présents en grandes quantités dans ces sols (app. V). L'agencement de grains de quarts émoussés luisants et d'oxydes de fer confirme que ces sols se sont développés sur des dunes et qu'ils sont ferrugineux, peu lessivés.

En conclusion, puisque le terrain montre la présence de dunes sableuses, que l'analyse au binoculaire montre un régime hydrique qui a remanié les sables, nous avons conclu que les sols qui étaient classifiés dans PIRT en PS3 sont tous DA5 parce que ce sont des dunes aplanies avec du matériel remanié. D'autant plus, nous avons vu que ce sont des sols sableux (tab. 3.9), qu'ils sont ferrugineux (tab. 3.1 et app. V) et peu lessivés. Alors, la taxonomie DA5 est la bonne à utiliser.

3.1.4 Profils types

L'objectif d'associer les différents types de sols selon les échantillons pour en faire des profils représentant le plus possible le secteur de référence n'est pas facile. Nous avons vu dans les paragraphes qui précèdent que les sols se distinguent. Voyons comment nous pouvons les résumer selon le domaine, le modelé, leurs symboles, le type de sol, leur régime hydrique et des indicateurs végétaux avec le tableau 3.8.

Ce tableau a été réalisé en combinant nos résultats à ceux du PIRT (1983a) et de Keita (2002). Dans la première colonne, c'est le domaine que nous pouvons voir. Il nous renseigne globalement sur le milieu de développement du sol. Quant au modelé, il sert à positionner le type de sol dans la topographie. Ce qui aide énormément dans l'élaboration de toposéquence (sect. 2.5.4). Un autre renseignement important c'est le régime hydrique. Ces informations ont été directement prises de celles du PIRT (1983a) sans changement. Finalement, la colonne des indicateurs végétaux sert à faciliter la cartographie de terrain. Par contre, la présence des indicateurs n'est pas absolue. En effet, la présence du « jun » (nom en bambara) est en général liée à des conditions hydromorphes, mais peut être expliquée aussi par des nappes perchées.

Tableau 3.8 : Légende des sols du secteur de référence

| Légende de la carte des sols du secteur de référence | | | | | |
|--|---|----------|--|----------------------|---|
| Domaines | Modelé | Symboles | Type de sol | Régimes hydriques | Indicateurs végétaux |
| Plaines sableuses | Dunes érodées et dunes aplanies | DA5 | Sols ferrugineux peu lessivés | Aridic haplustalfs | Aucun |
| Plaines à matériaux limoneux fins à sablo-limoneux | Bas glacis | PL10 | Sols ferrugineux lessivé à pseudogley ou taches et concrétions | Plinthic haplustalfs | Typique soudano-sahélien |
| | Haut et moyen glacis | PL11 | Sols ferrugineux lessivés à concrétions | Oxic nadustalfs | Typique soudano-sahélien |
| Terrains sur cuirasse latéritique | Versants gravillonnaires et plateaux | TC3 | Sols peu évolués d'érosion sur cuirasse, régosoliques | Aridic cuirustalfs | Kùnjè (bambara): <i>Guiera senegalensis</i> |
| Cuirasse latéritique | Sommets | TC5 | Sols minéraux bruts d'érosion sur cuirasse, lithosols | Mollic cuirorthent | Absence ou épineux (ex : Kùnjè) |
| Terrains hydromorphes faiblement inondés | Vallées, plaines inondables et bas-fond | TH3 | Sols hydromorphes à gley | Aquepts Aqualfs | Jun (bambara): <i>Mitragyna inermis</i> et zaadjé (bambara) |
| Terrains inondés | Fleuves, rivières, marigots, défluent et micro talwegs. | T14 | Sols peu évolués d'apport alluvial gleyifiés. | Typic haplaquepts | Nénuphar, herbes hygrophiles, jun: <i>Mitragyna inermis</i> |

Pour faire suite à ce tableau, nous devons créer des « profils types ». Nous avons vu à travers les résultats des analyses que des distinctions de caractéristiques des sols représentatives du terrain sont possibles grâce aux analyses et aux observations. Cependant, il ne faut pas oublier que l'élaboration de profils types reste une approximation. À l'intérieur

d'un champ à quelques mètres de distance, les valeurs en éléments nutritifs peuvent changer significativement. Alors, gardons en tête que les valeurs des profils types (tab. 3.9) sont des moyennes. Néanmoins, les valeurs du tableau 3.9 nous donnent de bonnes indications sur l'échelle de grandeur des variables. Les variables géophysiques comme la texture, la position topographique, la tolérance en perte de sol sont plus fiables que les variables chimiques. Le tableau 3.9 a été créé à partir des moyennes des résultats des analyses faites sur 34 échantillons (app.C) selon les types de sols.

Finalement, il est important de noter que les données sur les sols PL10 et PL11 étant trop semblables (dans toute la section analyse), nous ne pouvons pas faire une distinction pour élaborer un profil type. Ces deux unités de sols se distinguent facilement à l'échelle de la station, mais pas à l'échelle du secteur de référence. Nous avons donc créé une unité de sol PL non-différencié. Cette problématique de cartographie et d'interprétation sera expliquée dans la section 3.2.0. Cette prochaine section est la caractérisation de systèmes d'érosion.

Tableau 3.9: « Profils types » des sols du secteurs de référence

| Caractéristiques des profils types | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|------------------------|---|------------------|---------------------|------------------|---------------------------|---|--|
| Unité de sol | T14 | TH3 | PL10 | PL10 pseudo-gley | PL11 | DA5 | TC3 | PL non-différentié | |
| Couleur | brun pâle | gris clair à brun pâle | brun-jaune à brun très clair (argileux) | gris-brun clair | brun très pâle | brun-jaune | brun (pâle à jaune clair) | brun-jaune (sableux) à brun très clair (argileux) | |
| % argile | 20.00 | 34.42 | 13.21 | 31.79 | 21.24 | 7.50 | 24.41 | 17.23 | |
| % limon | 33.00 | 44.97 | 20.79 | 35.38 | 29.57 | 10.00 | 30.71 | 25.18 | |
| % sable | 47.00 | 20.60 | 66.00 | 32.82 | 49.19 | 82.50 | 44.88 | 57.60 | |
| % C (total) | 0.45 | 0.54 | 0.29 | 0.46 | 0.23 | 0.17 | 0.48 | 0.26 | |
| M.O. | 0.78 | 0.93 | 0.50 | 0.80 | 0.40 | 0.30 | 0.82 | 0.45 | |
| % N (total) | 0.05 | 0.06 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | |
| C/N | 9.99 | 11.12 | 8.59 | 10.55 | 6.65 | 7.85 | 12.43 | 7.62 | |
| Ptot (g/Kg sédiment) | 0.08 | 0.11 | 0.06 | 0.10 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | |
| Drainage de surface | D fort | D fort | C modéré-fort | D fort | B faible-modéré | A faible | A faible | C modéré-fort | |
| Drainage profond | D fort | D fort | D fort | D fort | C modéré-fort | B faible-modéré | C modéré-fort | D fort | |
| Structure | > 5 mm | > 5 mm | granulaire [2-5] mm | > 5 mm | granulaire [2-5] mm | granulaire < 1mm | granulaire [1-2] mm | granulaire [2-5] mm | |
| Perméabilité | très lent | très lent | lent-modéré | lent | modéré | rapide | modéré-rapide | lent-modéré | |
| Fragments % | 0 | 1 | 0 | 3 | 7 | 0 | 58 | 4 | |
| Roccosité % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | |
| Tolérance à l'érosion (T) | 11 | 8 | 4 | 2 | 2 | 8 | 2 | 3 | |
| Seuil critique de la MO | 3.71 | 5.56 | 2.38 | 4.70 | 3.56 | 1.23 | 3.86 | 2.97 | |

3.2 Caractérisation des systèmes d'érosion (sol/surfaces combinatoires)

Les résultats de la caractérisation des systèmes d'érosion ont pour objectif final de faire une carte des différents systèmes d'érosion du secteur de référence nécessaire à la spatialisation. Celle-ci pourra être réalisée à l'aide de surfaces combinatoires créées par la combinaison des unités d'une carte des sols « profils type » et de celles d'une carte du couvert végétal. Ces surfaces combinatoires assemblées donnent des renseignements précieux sur les systèmes d'érosion. Ainsi, nous pourrions mieux caractériser les systèmes pour les cartographier. Dans un premier temps, nous verrons la cartographie des profils types, puis celle du couvert végétal. Ensuite, nous montrerons la cartographie des systèmes d'érosion et des surfaces combinatoires. Pour finalement définir les grands processus des différents systèmes d'érosion.

3.2.0 Cartographie des « profils types » et du facteur C

Dans un premier temps, nous nous attarderons à la cartographie des « profils types ». Nous avons vu, dans le tableau 3.9, que les « profils types » sont représentés par le T14, TH3, PL10pg, PLnd, DA5 et TC3. Ceux-ci ont été distribués dans le secteur de référence. L'unité PL11 a été exclue de la cartographie puisqu'elle est peu représentée sur notre terrain. De plus, elle se développe à partir des sols PL10 ce qui évoque une extrême complexité dans le pedon autant verticalement que latéralement. La différenciation des PL10 et PL11 est très difficile à cartographier. C'est pour cette raison que nous avons combiné les unités PL10 et PL11 pour en faire une unité nommée PL non-différencié (PLnd, fig. 3.6). De plus, nous avons tenu compte que le PL10 est plus présent sur le terrain pour l'ajustement de la nouvelle unité. Sur la figure 3.6, il faut remarquer la répartition des sols dans le secteur de référence. Les sols les plus présents sont les PLnd avec 52% de la surface totale (fig. 3.7).

Par ailleurs, nous avons vu dans la section 2.4.1 que la cartographie du PIRT (1983a) sous-estime la présence du TH3. Dans notre cartographie, cette unité arrive à la deuxième place de superficie couverte avec 21%. Lorsqu'il s'agit de cartographier les sols PL10 à pseudogley (PL10pg), ceux-ci ne sont pas cartographiables si l'on ne creuse pas jusqu'à un mètre. Ses caractéristiques de surface pouvant être très variables, elle ne peut être distinguée

des PL10, sauf si l'on utilise les SIG. En effet, leur position dans la toposéquence est toujours la même. Le PL10pg est associé aux TH3 à la base des PLnd. C'est à l'aide des SIG et du DEM de la NASA (2005) que nous avons pu localiser ces sols en interprétant les observations de terrains.

Dans le même ordre d'idées, il faut noter que les TC5 sont soit de la cuirasse qui affleure ou des TC3 de moins de dix centimètres de profondeur. Alors, nous les avons combinés aux TC3 pour la caractérisation des « profils types ».

La carte des sols de la figure 3.6 permet de localiser à tout endroit du secteur de référence les « profils types ». Alors, nous pouvons obtenir les caractéristiques physico-chimiques (tab. 3.9) de chaque unité de sol de la carte.

Dans un deuxième temps, la cartographie du facteur couvert végétal (C) doit être elle aussi réalisée. La cartographie a été faite à partir de la carte *Ségou N-29-XII* (RM, 1994). Nous savons que plusieurs facteurs causent une disparition progressive du couvert végétal dans la région de Ségou. Cette progression est rapide parallèlement au développement du pays et de la région. Pour la qualité de travail nécessaire à cette recherche, la carte *N-29-XII* constitue le document le plus récent disponible.

Figure 3.6 : Carte des sols du secteur de référence.

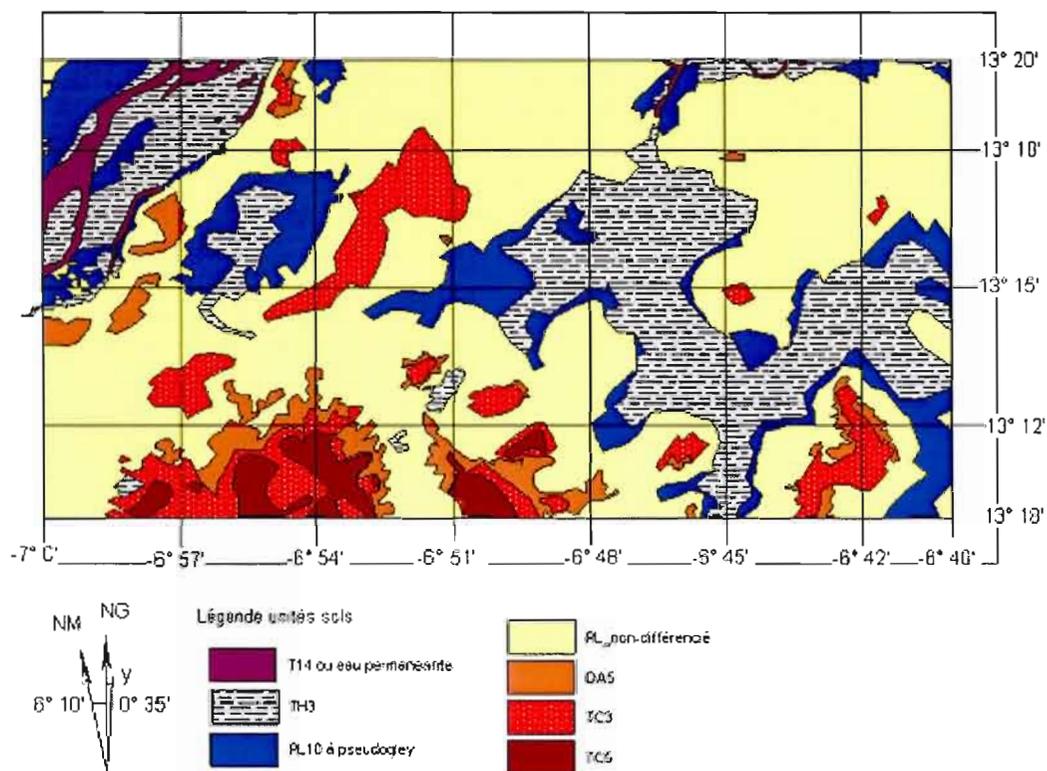


Figure 3.7 : Pourcentage de la répartition des unités de sol dans le secteur de référence.

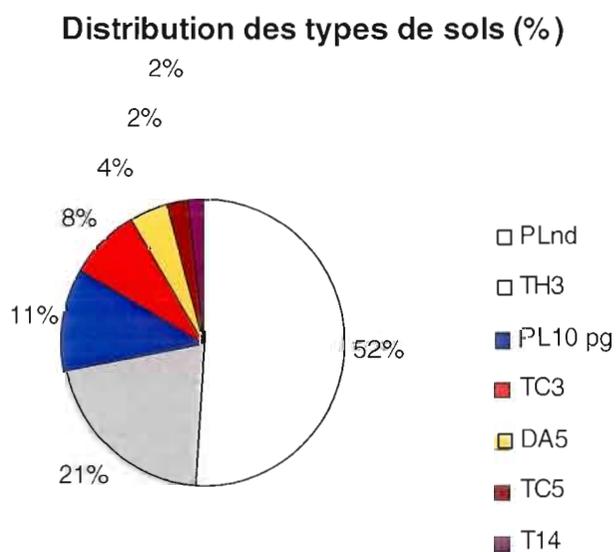
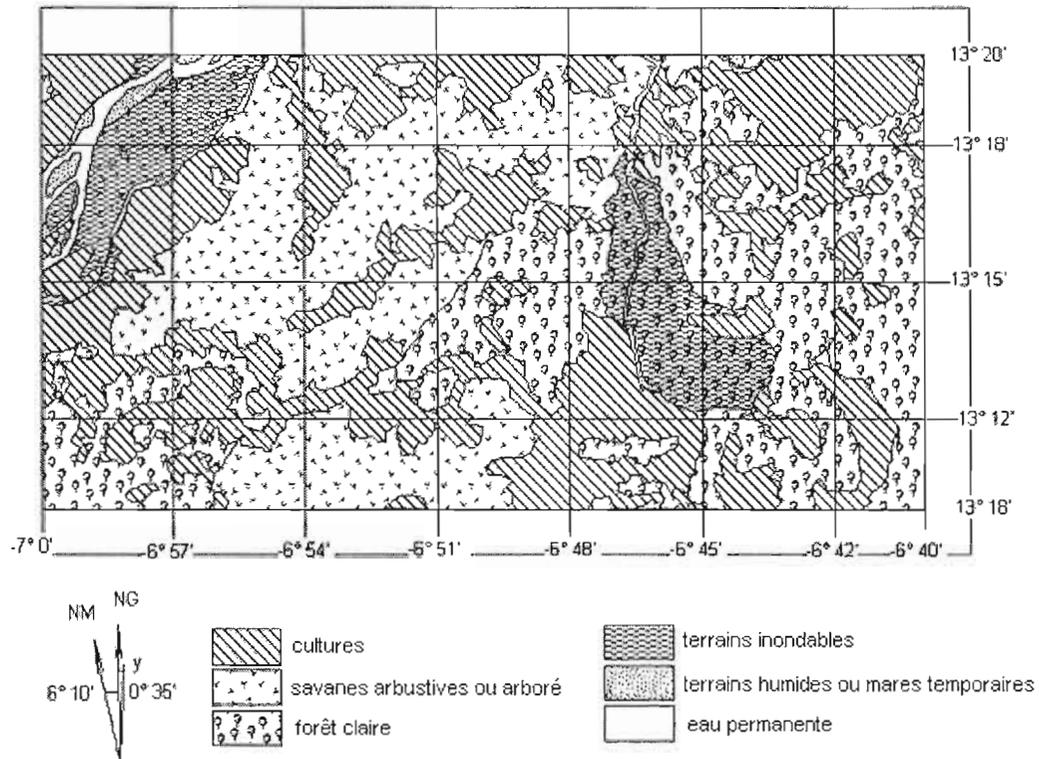


Figure 3.8 Cartographie du facteur C



Les « couverts végétaux types » de cette carte sont nécessaires à la simulation et la spatialisation. Le facteur (C) est utilisé par RUSLE2 et à différentes valeurs selon le type de couverture végétale. Pour faire nos unités de « couverts végétaux types » nous nous référons au tableau I (chap. I). Nous avons vu que les cultures de mil et de sorgho sont les cultures dominantes (sect. 2.0.7 et 2.5.3). En effet, les autres cultures se distribuent marginalement dans le secteur de référence. De plus, Roose (1994) a calculé des valeurs de C égales pour le mil et le sorgho (tab. 1). C'est pour cette raison que nous les réunissons en une seule et même unité. Les autres unités utilisées pour les simulations sont la savane en bon état (représentée à la fig. 3.8 par savanes arbustives ou arborés), la forêt claire et le sol nu (représenté sur la fig. 3.8 par terrain humide et eau permanente).

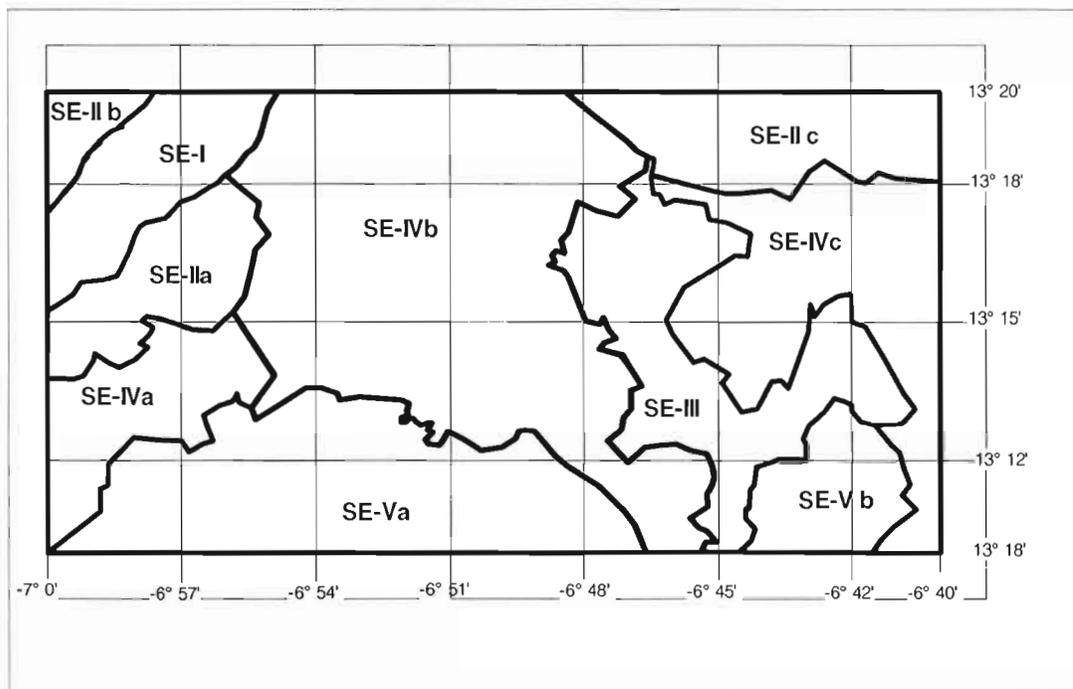
En faisant l'agencement des résultats de la légende des sols (tab. 3.8), des « profils types » (tab. 3.9) avec la carte des sols (fig. 3.7) et la carte du facteur du couvert végétal (fig.

3.8) on retrouve les informations des relations sol/topographie/végétation. C'est ce qui nous permettra de cartographier les systèmes d'érosion qui sont régularisés par ces facteurs.

3.2.1 Cartographie des systèmes d'érosion

Pour faire suite, nous avons cartographié les différents systèmes d'érosion du secteur de référence (fig. 3.9). La méthode pour délimiter les systèmes a été démontrée à la section 2.5.5. En effet, l'agencement des sols, de la topographie et des facteurs d'érosion nous a permis de regrouper dix systèmes : SE-I, SE-IIa, SE-IIb, SE-IIc, SE-III, SE-IVa, SE-IVb, SE-IVc, SE-Va et SE-Vb. Dans le tableau 3.10, toutes les valeurs des facteurs d'érosion de chaque système d'érosion sont exposées ainsi que les valeurs de caractérisation.

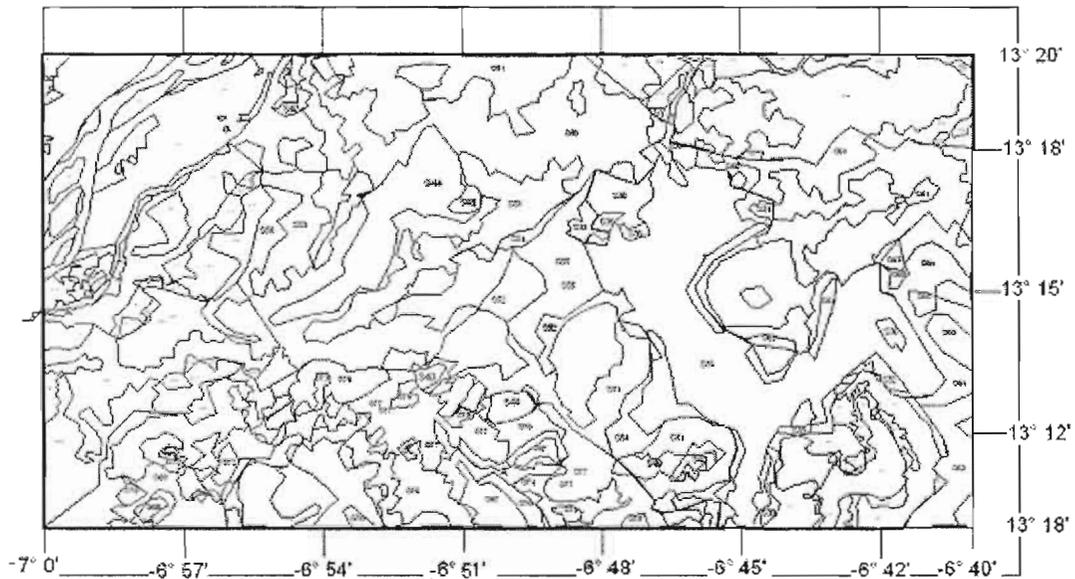
Figure 3.9: Carte des systèmes d'érosion



Comme nous l'avons vu à la section 2.6.2, les SIG nous permettent de projeter des surfaces (ex : surface de la carte de la végétation) sur d'autres (ex : surface de la carte pédologique). Ce que nous définissons comme des surfaces combinatoires. Dans chacun des

dix systèmes d'érosion, il faut créer des surfaces qui combineront le type de sol à un type de végétation. C'est ce qui est présenté à la figure suivante.

Figure 3.10: Carte de la caractérisation des systèmes d'érosion avec les surfaces combinatoires.



À la figure 3.10, nous avons les surfaces combinatoires des dix systèmes d'érosion. Pour arriver à bien caractériser chacun d'eux selon les facteurs K et C, nous avons dû faire 85 surfaces combinatoires. Dans chacune d'entre elles, nous avons pris les valeurs des longueurs de pentes médianes (facteur L) et les inclinaisons moyennes des pentes (facteur S). Les valeurs des longueurs de pentes ont été obtenues selon la méthode décrite à la section 2.5.5. Les valeurs des inclinaisons sont trouvées à l'aide de l'outil d'« analyse par région » de *Vertical Mapper* dans *MapInfo* après une correction de la pente du DEM (app. A, calcul 5). Ces surfaces permettent de caractériser les facteurs d'érosion dans le système (tab. 3.10) et d'identifier avec précision les régions qui pourraient être problématiques avant de faire des simulations.

Tableau 3.10 : Tableau de caractérisation des systèmes d'érosion.

| Tableau de la caractérisation des systèmes d'érosion du secteur de référence avec les SIG (vertical mapper dans MapInfo); depuis les cartes NASA (2005) et RM (1994). | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|--------------------|---|---------------------------------------|-----|------|---------------------------|------|----------------------------|--|
| Syst. d'éro. | Sol facteur (K) | Pente DEM (degrés) | facteur S: pente réelle moyenne après correction (degrés) | Facteur L: longueur de pente (mètres) | | | Facteur (C) | No | Surface (km ²) | Notes |
| | | | | min | max | méd. | | | | |
| SE-I | PL10 pg | 0,75 | 2,08 | 70 | 200 | 135 | Savane (bon état) | S1 | 2,200 | Savane (bon état) 60,77 % du couvert. L'érosion des berges = élevé. |
| | TH3 | 0,70 | 1,95 | 65 | 145 | 105 | sol nu | S2 | 0,154 | |
| | | 0,57 | 1,58 | 50 | 300 | 175 | Savane (bon état) | S4 | 21,030 | |
| | | 0,63 | 1,75 | 25 | 150 | 88 | sorgho/mil haut rendement | S3 | 0,696 | |
| | | 1,01 | 2,81 | 170 | 35 | 103 | sol nu (lisse) | S5 | 4,842 | |
| | T14 | 0,97 | 2,70 | 60 | 160 | 110 | sol nu (lisse) | S6 | 1,071 | |
| | | 1,16 | 3,22 | 50 | 140 | 95 | eau = sol nu rugueux | S7 | 8,230 | |
| | Syst. Tot | -- | 2,30 | -- | -- | 116 | Savane (bon état) | SE-I | 38,223 | |
| SE-IIa | DA5 | 0,59 | 1,64 | 40 | 200 | 120 | Savane (bon état) | S8 | 0,694 | % Mis en culture |
| | | 0,65 | 1,81 | 75 | 160 | 118 | sorgho/mil haut rendement | S9 | 5,477 | |
| | PL nd | 0,75 | 2,08 | 80 | 160 | 120 | Savane (bon état) | S10 | 2,158 | |
| | | 0,74 | 2,06 | 55 | 160 | 108 | sorgho/mil haut rendement | S11 | 12,190 | |
| | | 0,91 | 2,53 | 20 | 140 | 80 | sol nu (lisse) | S12 | 0,150 | |
| | PL10 pg | 0,48 | 1,33 | 50 | 125 | 88 | Savane (bon état) | S13 | 4,777 | |
| | | 0,69 | 1,92 | 50 | 170 | 110 | sorgho/mil haut rendement | S14 | 4,847 | |

| | | | | | | | | | | |
|------------|--------------|------|------|-----|-----|-----|---|------------|--------|------------------------|
| | TH3 | 0,38 | 1,06 | 35 | 100 | 68 | Savane (bon état) | S15 | 4,133 | 64,728 |
| | | 0,67 | 1,86 | 40 | 100 | 70 | sorgho/mil haut rendement | S16 | 0,805 | |
| | T14 | -- | -- | -- | -- | -- | eau défluent = bilan positif de terre | S17 | 0,795 | |
| | Syst. Tot | -- | 1,81 | -- | -- | 98 | -- | SE- IIa | 36,026 | |
| SE-II b | PL nd | 0,53 | 1,47 | 40 | 110 | 75 | Forêt | S18 | 0,187 | % Mis en culture |
| | | 0,64 | 1,78 | 40 | 110 | 75 | sorgho/mil haut rendement | S19 | 0,710 | |
| | PL10 pg | 0,53 | 1,47 | 40 | 103 | 72 | Forêt | S20 | 0,304 | 94,946 |
| | | 0,66 | 1,83 | 50 | 175 | 113 | sorgho/mil haut rendement | S21 | 8,514 | |
| | Syst. Tot | -- | 1,64 | -- | -- | 84 | -- | SE- IIb | 9,715 | |
| SE-II c | DA5 | 0,4 | 1,11 | 80 | 165 | 123 | sorgho/mil haut rendement | S22 | 0,270 | % Mis en culture |
| | PL nd | 0,36 | 1,00 | 75 | 150 | 113 | Forêt | S23 | 9,286 | |
| | | 0,5 | 1,39 | 25 | 200 | 113 | Savane (bon état) | S24 | 1,778 | |
| | | 0,46 | 1,28 | 50 | 275 | 163 | sorgho/mil haut rendement | S25 | 26,500 | |
| | | 1,19 | 3,31 | 100 | 110 | 105 | sol nu (lisse) | S26 | 0,067 | |
| | PL10 pg | 0,51 | 1,42 | 25 | 180 | 103 | Savane (bon état) | S27 | 1,704 | |
| | | 0,6 | 1,67 | 90 | 175 | 133 | sorgho/mil haut rendement | S28 | 2,505 | |
| | TH3 | 0,48 | 1,33 | 75 | 150 | 113 | Savane (bon état) | S29 | 2,612 | |
| | | 0,48 | 1,33 | 25 | 135 | 80 | sorgho/mil haut rendement | S30 | 1,513 | |
| | 65,149 | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|------------|--------------|------|------|----|-----|-----|---|------------|--------|------------------------|
| | T14 | -- | -- | -- | -- | -- | eau défluent = bilan positif de terre | S31 | 1,023 | |
| | Syst. Tot | -- | 1,54 | -- | -- | 116 | -- | SE- IIc | 47,258 | |
| SE- III | PL10 P9 | 0,58 | 1,61 | 40 | 230 | 135 | Forêt | S32 | 2,530 | % TH3 |
| | | 0,58 | 1,61 | 20 | 100 | 60 | sorgho/mil haut rendement | S33 | 3,158 | |
| | TH3 | 0,37 | 1,03 | 65 | 200 | 133 | Forêt | S34 | 57,420 | 92,613 |
| | | 0,39 | 1,08 | 15 | 100 | 58 | Savane (bon état) | S35 | 4,006 | |
| | | 0,44 | 1,22 | 25 | 125 | 75 | sorgho/mil haut rendement | S36 | 9,884 | % forêt |
| | Syst. Tot | -- | 1,31 | -- | -- | 92 | -- | SE- III | 76,998 | 77,859 |
| SE- IVa | TC3 | 0,42 | 1,17 | 35 | 100 | 68 | Forêt | S37 | 2,946 | % Mis en culture |
| | | 0,5 | 1,39 | 20 | 120 | 70 | sorgho/mil haut rendement | S38 | 1,712 | |
| | PLnd | 0,47 | 1,31 | 75 | 185 | 130 | Forêt | S39 | 10,940 | |
| | | 0,47 | 1,31 | 25 | 175 | 100 | Savane (bon état) | S40 | 9,580 | |
| | | 0,52 | 1,45 | 45 | 250 | 148 | sorgho/mil haut rendement | S41 | 12,630 | 36,617 |
| | TH3 | 0,43 | 1,20 | 40 | 100 | 70 | Savane (bon état) | S42 | 1,360 | |
| | Syst. Tot | -- | 1,30 | -- | -- | 98 | -- | SE- Iva | 39,168 | |
| SE- IVb | TC3 | 0,64 | 1,78 | 30 | 200 | 115 | Forêt | S43 | 1,516 | % Mis en culture |
| | | 0,64 | 1,78 | 50 | 400 | 225 | Savane (bon état) | S44 | 18,670 | |
| | | 0,64 | 1,78 | 80 | 200 | 140 | sorgho/mil haut rendement | S45 | 1,887 | |
| | DA5 | 0,64 | 1,78 | 60 | 100 | 80 | Forêt | S46 | 0,923 | |
| | | 0,75 | 2,08 | 80 | 195 | 138 | Savane (bon état) | S47 | 0,762 | |
| | | 0,97 | 2,70 | 80 | 175 | 128 | sorgho/mil haut rendement | S48 | 0,819 | |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|------|------|------|-----|-----|---------------------------|---------------------------|---------|--------|-------|------------------|
| | PLnd | 0,74 | 2,06 | 35 | 450 | 243 | Forêt | S49 | 16,910 | 34,481 | | |
| | | 0,46 | 1,28 | 50 | 250 | 150 | Savane (bon état) | S50 | 59,220 | | | |
| | | 0,55 | 1,53 | 50 | 200 | 125 | sorgho/mil haut rendement | S51 | 58,150 | | | |
| | PL10 pg | 0,44 | 1,22 | 25 | 100 | 63 | Forêt | S52 | 6,500 | | | |
| | | 0,36 | 1,00 | 25 | 135 | 80 | Savane (bon état) | S53 | 13,460 | | | |
| | | 0,5 | 1,39 | 20 | 185 | 103 | sorgho/mil haut rendement | S54 | 9,125 | | | |
| | TH3 | 0,35 | 0,97 | 50 | 150 | 100 | Forêt | S55 | 10,030 | | | |
| | | 0,35 | 0,97 | 75 | 290 | 183 | Savane (bon état) | S56 | 3,381 | | | |
| | | 0,35 | 0,97 | 15 | 190 | 103 | sorgho/mil haut rendement | S57 | 1,603 | | | |
| | Syst. Tot | -- | 1,55 | -- | -- | 132 | -- | SE-IVb | 202,956 | | | |
| | SE-IVc | TC3 | 0,28 | 0,78 | 60 | 140 | 100 | Forêt | S58 | | 1,029 | % Mis en culture |
| | | | 0,4 | 1,11 | 80 | 100 | 90 | sorgho/mil haut rendement | S59 | | 0,080 | |
| PLnd | | 0,38 | 1,06 | 50 | 250 | 150 | Forêt | S60 | 32,100 | | | |
| | | 0,47 | 1,31 | 90 | 200 | 145 | sorgho/mil haut rendement | S61 | 18,200 | | | |
| PL10 pg | | 0,43 | 1,20 | 18 | 180 | 99 | Forêt | S62 | 14,020 | | | |
| | | 0,49 | 1,36 | 80 | 170 | 125 | sorgho/mil haut rendement | S63 | 2,345 | | | |
| TH3 | | 0,35 | 0,97 | 40 | 450 | 245 | Forêt | S64 | 12,870 | | | |
| | | 0,31 | 0,86 | 100 | 150 | 125 | sorgho/mil haut rendement | S65 | 1,222 | | | |
| Syst. Tot | | -- | 1,08 | -- | -- | 135 | -- | SE-IVc | 81,866 | | | |
| SE-Va | | TC5 | 1,45 | 4,03 | 180 | 200 | 190 | Forêt | S66 | 1,031 | | |
| | 1,91 | | 5,31 | 30 | 450 | 240 | Savane (bon état) | S67 | 14,390 | | | |
| | 1,15 | | 3,20 | 100 | 190 | 145 | sorgho/mil haut rendement | S68 | 0,705 | | | |
| | TC3 | 1 | 2,78 | 45 | 200 | 123 | Forêt | S69 | 5,072 | | | |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|------|------|------|-----|-----|---------------------------|---------------------------|---------|-------|--|
| | | 1,1 | 3,06 | 100 | 225 | 163 | Savane (bon état) | S70 | 9,797 | | |
| | | 0,88 | 2,45 | 75 | 200 | 138 | sorgho/mil haut rendement | S71 | 3,638 | | |
| | DA5 | 0,52 | 1,45 | 50 | 175 | 113 | Forêt | S72 | 2,350 | | |
| | | 0,86 | 2,39 | 70 | 210 | 140 | Savane (bon état) | S73 | 6,409 | | |
| | | 0,62 | 1,72 | 40 | 140 | 90 | sorgho/mil haut rendement | S74 | 9,226 | | |
| | PLnd | 0,51 | 1,42 | 90 | 150 | 120 | Forêt | S75 | 9,365 | | |
| | | 0,61 | 1,70 | 100 | 350 | 225 | Savane (bon état) | S76 | 13,190 | | |
| | | 0,6 | 1,67 | 50 | 225 | 138 | sorgho/mil haut rendement | S77 | 28,250 | | |
| | TH3 | 0,66 | 1,83 | 100 | 225 | 163 | Forêt | S78 | 0,605 | | |
| | | 0,86 | 2,39 | 80 | 110 | 95 | sorgho/mil haut rendement | S79 | 0,315 | | |
| | Syst. Tot | -- | 2,53 | -- | -- | 149 | -- | SE-Va | 104,343 | | |
| | SE-Vb | TC3 | 0,43 | 1,20 | 125 | 200 | 163 | Forêt | S80 | 6,492 | |
| | | | 0,6 | 1,67 | 100 | 100 | 100 | sorgho/mil haut rendement | S81 | 0,786 | |
| | | DA5 | 0,61 | 1,70 | 50 | 220 | 135 | Forêt | S82 | 1,614 | |
| 0,54 | | | 1,50 | 90 | 190 | 140 | sorgho/mil haut rendement | S83 | 1,520 | | |
| PLnd | | 0,53 | 1,47 | 100 | 375 | 238 | Forêt | S84 | 5,434 | | |
| | | 0,65 | 1,81 | 130 | 300 | 215 | sorgho/mil haut rendement | S85 | 12,840 | | |
| Syst. Tot | | -- | 1,56 | -- | -- | 165 | -- | SE-Vb | 28,686 | | |

La caractérisation de systèmes d'érosion permet de mieux cibler les problèmes d'érosion dans le secteur de référence. Par conséquent, l'aménagement du territoire et la gestion des sols deviennent réalisables plus facilement. Des problèmes spécifiques dans chaque système nécessitent un mode de gestion discursif. La caractérisation des systèmes nous a permis de formuler nombre d'affirmations sur le milieu.

Dans un premier temps, le SE-I est un système régi par le drainage du fleuve Niger. Le système s'étend sur 38 km². La plus grande surface de couverture végétale est la savane en bon état. Le sol le plus présent est le PL10 à pseudogley. Les causes directes d'augmentation des impacts de l'érosion dans ce système sont : la présence de sol nu, la concentration de la population sur les rives du fleuve, la déforestation, la charge du fleuve et le non respect de la Loi No 95-004 (DNCNM, 1999). Celle-ci est la loi fixant les conditions de gestion des ressources forestières (article 10 : bandes riveraines de 25 mètres et article 17 : conservation des essences forestières). En effet, ce système est très sensible à l'érosion et celle-ci atteint des niveaux alarmants. C'est ce qu'on peut voir sur les photos 1, 2, et 3 de l'appendice F.

Dans un deuxième temps, les systèmes d'érosion SE-IIa, SE-IIb et SE-IIc sont en quelques sortes les répliques du système d'érosion de la station Dilango (sect. 2.5.2 et 2.5.5). Les causes prédominantes de dégradation de ces systèmes sont la grande superficie mise en culture et la mauvaise gestion. En effet, ils ont respectivement 65 %, 95% et 65% de leur surface totale qui est mise en culture. Par ailleurs, on y retrouve également des sols complètement appauvris et sans couvert végétal. Les causes : ils ont été surexploités, le passage de l'eau y est agressif et le bétail présent dévastateur. Une particularité des systèmes SE-IIa et SE-IIc, c'est qu'ils ont un défluent du fleuve Niger (voir explications sect. 2.5.5). Des sols T14 se sont développés à ces endroits. Ceux-ci sont constamment renouvelés en sédiment. En réalité, ces endroits sont les points d'arrivée des terres érodées des systèmes. Alors, ces sols ne s'érodent que si la décharge est assez puissante, ce qui est très rare (sauf exception). À ces endroits, l'eau a plutôt tendance à être plus ou moins stagnante. C'est pour cette raison que nous ne compilerons pas ces surfaces dans la simulation des pertes en terres puisque les bilans sont positifs. En fait, la dégradation est plutôt lié à l'ensablement et réduit l'accessibilité aux points d'eau.

Par la suite, il y a le SE-III qui possède sur sa surface une vaste plaine inondable. D'ailleurs, celle-ci a été bornée par les colons français et montre des vestiges d'un aménagement qui a avorté. Ce système est caractérisé par la présence très forte de forêt ouverte (78%) et de sols hydromorphes TH3 (93%). La culture de riz est la plus utilisée car

le milieu n'est pas favorable ni au mil, ni au sorgho. On y retrouve en grande quantité dans la forêt ouverte des indicateurs végétaux de sols hydromorphes (jun, zaadjié).

Ensuite, les systèmes d'érosion SE-IVa, SE-IVb, SE-IVc ajoutent une unité de sol qui n'était pas présente dans les précédentes, le TC3. Le SE-IVa semble être le milieu avec la plus grande capacité à supporter la mise en culture. Et ce, malgré la mise en culture de 37% du système. SE-IVb est le plus vaste de tous les systèmes d'érosion du secteur de référence avec 203 km². Par ailleurs, il comporte quinze surfaces combinatoires pour définir son système comparativement au plus petit SE-IIb qui en possède seulement quatre. Autrement dit, ce système est également le plus diversifié. SE-IVc autant que les deux précédents sont des systèmes typiques de glacis. De petits plateaux entremêlés de vallées forment un terrain vallonné. Ce qui mène à des changements drastiques selon les facteurs de station du processus d'érosion. C'est aussi pour cette raison que nous avons fait plusieurs surfaces combinatoires dans ces systèmes.

Finalement, nous parlerons des systèmes SE-Va et SE-Vb comme ayant de très faibles capacités de supporter la mise en culture. Ceux-ci ont des sols TC5 et TC3 qui sont peu profonds. Dans ces systèmes la profondeur des TC5 dépasse rarement 10 cm et celle des TC3 60 cm. En peu de temps, de fortes érosions décaperaient les sols pour faire affleurer la cuirasse ou la roche mère (app. F, photo 11). Par ailleurs, ces systèmes sont ceux avec les plus fortes inclinaisons de pentes de tout le secteur de référence (app. F, photo 12 et tab. 3.10).

Tout compte fait, les caractéristiques recueillis au tableau 3.9 permettent de connaître le milieu selon ses paramètres érosifs. Nous pouvons concevoir des scénarios bien précis de l'évolution du milieu en fonction de l'érosion. Dans les paragraphes qui suivront, nous ferons les simulations nécessaires pour montrer les impacts de l'érosion en nappe dans la zone d'étude.

3.3 Simulations et spatialisation

La section simulation est celle où l'on observe les impacts de l'érosion en nappes. Nous pourrions, à partir du tableau de caractérisation des systèmes d'érosion (tab. 2.3) utiliser le modèle RUSLE2 pour calculer la perte en terre. Puis, avec les modèles mathématiques, calculer les pertes en nutriments qui lui sont reliés.

Nous ferons des simulations qui montreront les impacts de l'érosion en nappe. Ces résultats seront montrés dans tout le secteur de référence selon deux scénarios. Le premier scénario est une simulation des conséquences de l'érosion selon l'état du secteur de référence à l'année 1994. Le deuxième, est une simulation selon les mêmes conditions du scénario 1. Par contre, des mesures de lutte anti-érosives sont ajoutées afin de régler les problèmes d'érosion.

3.3.0 Scénario 1

Le scénario 1 est le plus pessimiste. Nous simulons un déroulement futur de ce qui se passera dans le secteur de référence selon les bases que rien ne sera fait pour améliorer la situation. Cette simulation est faite à partir d'une moyenne faite sur vingt ans. Nous posons que la population, les surfaces anthropiques et tous les facteurs de RUSLE2 restent les mêmes (on ne tient pas compte des changements climatiques). L'année de départ de la simulation est 1994, puisque nous utilisons la carte d'utilisation des sols de RM, 1994 (voir explication sect. 3.2.0). Le couvert végétal datant de 1994, il faut garder en tête que la dégradation et la fragilité du milieu sont sous-estimées. La simulation arrête l'évolution du milieu pour observer les impacts de l'érosion en nappe. Les régulateurs des systèmes évoluent et les intrants/extrants sont en constante modification de flux.

Dans un premier temps, nous avons pris les données du tableau 3.10 pour faire des simulations avec le logiciel RUSLE2. Selon les méthodes du chapitre II et les résultats présentés dans les paragraphes précédents, nous obtenons le tableau des simulations de pertes en terres et en nutriments des systèmes d'érosion du secteur de référence (tab. 3.11). Dans ce tableau les résultats des pertes en terres sont exposés de deux manières : pertes en terres selon

chaque surface combinatoire et pertes en terres moyennes de chaque système d'érosion en t/ha/an et en t/an. Ces calculs sont démontrés à l'appendice A aux calculs 6, 7 et 8. Par ailleurs, on retrouve les pertes en C, N et P dans ce tableau. Les données sont exposées selon les pertes de chaque surface combinatoire (Kg/ha/an) et selon les moyennes des systèmes d'érosion (Kg/ha/an et t/an). Ces calculs sont démontrés à l'appendice A aux calculs 9, 10 et 11.

Dans un deuxième temps, nous pouvons affirmer, en s'appuyant sur les résultats du tableau 3.11, que le problème d'érosion en nappe est présent partout dans le secteur de référence. Par contre, il faut prendre conscience que l'impact de l'érosion en nappe n'est pas constant dans tout le secteur de référence. Certaines surfaces combinatoires rendent plus sensible le système d'érosion. C'est pour cette raison qu'il faut également identifier les surfaces combinatoires cultivées et celles qui sont problématiques. Nous définissons les surfaces problématiques comme ayant une érosion supérieure à la tolérance en perte de terre du tableau 3.9. En observant le tableau 3.11, nous pouvons observer trente-neuf surfaces combinatoires problématiques sur quatre-vingt-cinq. Les surfaces identifiées sont : S2, S3, S5, S6, S7, S9, S11, S12, S14, S16, S19, S21, S22, S25, S26, S28, S30, S33, S36, S38, S41, S45, S48, S51, S54, S57, S59, S61, S63, S65, S67, S68, S71, S74, S77, S79, S81, S83 et S85. C'est avec un tableau synthèse des surfaces à modifier que nous pourrions comparer au scénario 2 l'efficacité d'une meilleure gestion des surfaces problématiques.

Tableau 3.11 : Scénario 1 (simulations de pertes en terres et en nutriments des systèmes d'érosion du secteur de référence)

| Scénario 1 | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------|-----------|---|-----------------------------------|----------|---------------------------|---------------------------------------|----------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Simulation de pertes en terres et en nutriments des systèmes d'érosion du secteur de référence. | | | | | | | | | | | | | | |
| Noms | Sol types | No Surf. | Aire (ha) | RUSLE2 Érosion par surface combinatoire (t/ha/an) | Érosions moy. (t/ha/an) et (t/an) | C Tot. % | Perte de C (Kg/ha) par an | Pertes moy. en C (Kg/ha/an) et (t/an) | N Tot. % | Perte de N (Kg/ha) par an | Pertes moy. en N (Kg/ha/an) et (t/an) | P Tot. g/Kg par an | Perte de P (Kg/ha) par an | pertes moy. en P (Kg/ha/an) et (t/an) |
| SE-I | PL10 pg | S1 | 220 | 1.7 | 104 | 0.46 | 8 | 474 | 0.05 | 0.87 | 54 | 0.10 | 0.2 | 11 |
| | | S2 | 15 | 48 | | 0.46 | 222 | | 0.05 | 24.43 | | 0.10 | 5.7 | |
| | TH3 | S4 | 2103 | 1.8 | | 0.46 | 8 | | 0.05 | 0.92 | | 0.10 | 0.2 | |
| | | S3 | 69.6 | 70.0 | | 0.46 | 323 | | 0.05 | 35.63 | | 0.10 | 8.4 | |
| | | S5 | 484 | 133 | | 0.46 | 614 | | 0.05 | 67.69 | | 0.10 | 15.9 | |
| | T14 | S6 | 107 | 93 | | 0.45 | 418 | | 0.05 | 48.89 | | 0.08 | 9.4 | |
| | | S7 | 823 | 383 | | 0.45 | 1723 | | 0.05 | 201.33 | | 0.08 | 38.6 | |
| Syst. | SE-I | 3822 | -- | 398884 | -- | 1810.50 | -- | 207.36 | -- | 42.76 | | | | |
| SE-IIa | DA5 | S8 | 69 | 1.4 | 41 | 0.17 | 2 | 139 | 0.03 | 0.37 | 18 | 0.06 | 0.1 | 4 |
| | | S9 | 548 | 53 | | 0.17 | 93 | | 0.03 | 14.09 | | 0.06 | 4.2 | |
| | PL nd | S10 | 216 | 2.5 | | 0.26 | 7 | | 0.04 | 1.02 | | 0.07 | 0.2 | |
| | | S11 | 1219 | 78 | | 0.26 | 204 | | 0.04 | 31.70 | | 0.07 | 6.5 | |
| | | S12 | 15 | 99 | | 0.26 | 260 | | 0.04 | 40.24 | | 0.07 | 8.3 | |
| | PL10 pg | S13 | 478 | 1.8 | | 0.46 | 8 | | 0.05 | 0.92 | | 0.10 | 0.2 | |
| | | S14 | 485 | 66 | | 0.46 | 305 | | 0.05 | 33.59 | | 0.10 | 7.9 | |
| | TH3 | S15 | 413 | 1.7 | | 0.54 | 9 | | 0.06 | 0.95 | | 0.11 | 0.2 | |
| | | S16 | 81 | 68 | | 0.54 | 366 | | 0.06 | 38.03 | | 0.11 | 9.5 | |
| | T14 | S17 | 80 | -- | | 0.45 | -- | | 0.05 | -- | | 0.08 | -- | |

Tableau 3.11 : Scénario 1 (simulations de pertes en terres et en nutriments des systèmes d'érosion du secteur de référence)

| | Syst. | SE-IIa | 3603 | 371.4 | 148667 | -- | -- | 501.85 | -- | 64.41 | -- | 14.88 | |
|---------|---------|--------|--------|---------|--------|-------|--------|--------|------|-------|-------|-------|------|
| SE-II b | PL nd | S18 | 19 | 0.12 | 31 | 0.26 | 0 | 112 | 0.04 | 14 | 0.07 | 3 | |
| | | S19 | 71 | 59 | | 0.26 | 155 | | 0.04 | | 23.98 | | 0.07 |
| | PL10 pg | S20 | 30 | 0.13 | | 0.46 | 1 | | 0.05 | | 0.07 | 0.10 | 0.0 |
| | | S21 | 851 | 63 | | 0.46 | 291 | | 0.05 | | 32.07 | 0.10 | 7.5 |
| | Syst. | SE-IIb | 972 | 122.25 | 29691 | -- | -- | 108 | -- | -- | -- | 3 | |
| SE-II c | DA5 | S22 | 27 | 30 | 38 | 0.17 | 52 | 125 | 0.03 | 16 | 0.06 | 4 | |
| | | S23 | 929 | 0.098 | | 0.26 | 0 | | 0.04 | | 0.04 | | 0.07 |
| | PL nd | S24 | 178 | 1.8 | | 0.26 | 5 | | 0.04 | | 0.73 | 0.07 | 0.2 |
| | | S25 | 2650 | 50 | | 0.26 | 131 | | 0.04 | | 20.32 | 0.07 | 4.2 |
| | | S26 | 7 | 144 | | 0.26 | 378 | | 0.04 | | 58.53 | 0.07 | 12.0 |
| | | S27 | 170 | 1.9 | | 0.46 | 9 | | 0.05 | | 0.97 | 0.10 | 0.2 |
| | PL10 pg | S28 | 251 | 59 | | 0.46 | 272 | | 0.05 | | 30.03 | 0.10 | 7.0 |
| | | S29 | 261 | 2.1 | | 0.54 | 11 | | 0.06 | | 1.17 | 0.11 | 0.3 |
| | TH3 | S30 | 151 | 49 | | 0.54 | 264 | | 0.06 | | 27.40 | 0.11 | 6.9 |
| | | T14 | S31 | 102 | | -- | -- | | 0.45 | | -- | 0.05 | -- |
| | Syst. | SE-IIc | 4726 | 337.898 | 177426 | -- | -- | 589 | -- | 77 | -- | 17 | |
| SE-III | PL10 pg | S32 | 253 | 0.14 | 19 | 0.46 | 1 | 93 | 0.05 | 10 | 0.10 | 2 | |
| | | S33 | 316 | 47 | | 0.46 | 217 | | 0.05 | | 23.92 | | 0.10 |
| | TH3 | S34 | 5742 | 0.12 | | 0.54 | 1 | | 0.06 | | 0.07 | 0.11 | 0.0 |
| | | S35 | 401 | 1.7 | | 0.54 | 9 | | 0.06 | | 0.95 | 0.11 | 0.2 |
| | | S36 | 988 | 44 | | 0.54 | 237 | | 0.06 | | 24.61 | 0.11 | 6.2 |
| | | Syst. | SE-III | 7700 | | 92.96 | 143155 | | -- | | -- | 715 | -- |
| TC3 | S37 | 295 | 0.07 | 0.48 | 0 | 0.04 | 0.03 | 0.07 | 0.0 | | | | |
| | S38 | 171 | 27 | 0.48 | 129 | 0.04 | 11.67 | 0.07 | 2.3 | | | | |
| | S39 | 1094 | 0.12 | 0.26 | 0 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.0 | | | | |
| | | | | 15 | | | 49 | | 6 | | 1 | | |

Tableau 3.11 : Scénario 1 (simulations de pertes en terres et en nutriments des systèmes d'érosion du secteur de référence)

| SE-IVa | PLnd | S40 | 958 | 1.7 | 57309 | 0.26 | 4 | 192 | 0.04 | 0.69 | 24 | 0.07 | 0.1 | 5 |
|--------|---------|--------|-------|--------|--------|------|-----|------|------|-------|-----|------|-----|----|
| | S41 | 1263 | 57 | | | 0.26 | 149 | | 0.04 | 23.17 | | 0.07 | 4.8 | |
| | TH3 | S42 | 136 | 1.9 | | 0.54 | 10 | | 0.06 | 1.06 | | 0.11 | 0.3 | |
| | Syst. | SE-IVa | 3917 | 87.79 | 57309 | -- | -- | 192 | -- | -- | 24 | -- | -- | 5 |
| | TC3 | S43 | 152 | 0.092 | | 0.48 | 0 | | 0.04 | 0.04 | | 0.07 | 0.0 | |
| | | S44 | 1867 | 1.5 | | 0.48 | 7 | | 0.04 | 0.65 | | 0.07 | 0.1 | |
| | | S45 | 189 | 43 | | 0.48 | 205 | | 0.04 | 18.59 | | 0.07 | 3.6 | |
| | DA5 | S46 | 92 | 0.088 | | 0.17 | 0 | | 0.03 | 0.02 | | 0.06 | 0.0 | |
| | | S47 | 76 | 1.6 | | 0.17 | 3 | | 0.03 | 0.43 | | 0.06 | 0.1 | |
| | | S48 | 82 | 90 | | 0.17 | 157 | | 0.03 | 23.93 | | 0.06 | 7.1 | |
| | PLnd | S49 | 1691 | 0.16 | 19 | 0.26 | 0 | 64 | 0.04 | 0.07 | 8 | 0.07 | 0.0 | 2 |
| | | S50 | 5922 | 1.7 | | 0.26 | 4 | | 0.04 | 0.69 | | 0.07 | 0.1 | |
| | | S51 | 5815 | 58 | | 0.26 | 152 | | 0.04 | 23.57 | | 0.07 | 4.8 | |
| | PL10 pg | S52 | 650 | 0.12 | | 0.46 | 1 | | 0.05 | 0.06 | | 0.10 | 0.0 | |
| | | S53 | 1346 | 1.5 | | 0.46 | 7 | | 0.05 | 0.76 | | 0.10 | 0.2 | |
| | | S54 | 913 | 45 | | 0.46 | 208 | | 0.05 | 22.90 | | 0.10 | 5.4 | |
| | TH3 | S55 | 1003 | 0.12 | | 0.54 | 1 | | 0.06 | 0.07 | | 0.11 | 0.0 | |
| | | S56 | 338 | 1.7 | | 0.54 | 9 | | 0.06 | 0.95 | | 0.11 | 0.2 | |
| | | S57 | 160 | 37 | | 0.54 | 199 | | 0.06 | 20.69 | | 0.11 | 5.2 | |
| | Syst. | SE-IVb | 20296 | 281.58 | 380989 | -- | -- | 1291 | -- | -- | 153 | -- | -- | 37 |
| | TC3 | S58 | 103 | 0.056 | | 0.48 | 0 | | 0.04 | 0.02 | | 0.07 | 0.0 | |
| | | S59 | 8 | 23 | | 0.48 | 110 | | 0.04 | 9.94 | | 0.07 | 1.9 | |
| | PLnd | S60 | 3210 | 0.1 | | 0.26 | 0 | | 0.04 | 0.04 | | 0.07 | 0.0 | |
| | | S61 | 1820 | 50 | 19 | 0.26 | 131 | 80 | 0.04 | 20.32 | 9 | 0.07 | 4.2 | 2 |
| | PL10 pg | S62 | 1402 | 0.12 | | 0.46 | 1 | | 0.05 | 0.06 | | 0.10 | 0.0 | |
| | PL10 pg | S63 | 235 | 48 | | 0.46 | 222 | | 0.05 | 24.43 | | 0.10 | 5.7 | |

Tableau 3.11 : Scénario 1 (simulations de pertes en terres et en nutriments des systèmes d'érosion du secteur de référence)

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|-------|---------|------|------|--------|------|------|-------|-----|------|-----|-------|------|-----|
| TH3 | S64 | 1287 | 0 | 0.54 | 0 | 157874 | 656 | 0.06 | 0.00 | 75 | 0.11 | 0.0 | | | |
| | S65 | 122 | 33 | 0.54 | 178 | | | 0.06 | 18.45 | | | | 0.11 | 4.6 | |
| Syst. | SE-IVc | 8187 | 154.276 | -- | -- | | | -- | -- | | -- | 17 | | | |
| TC5 | S66 | 103 | 0.17 | 0.48 | 1 | 27 | 111 | 0.04 | 0.07 | 122 | 0.07 | 0.0 | | | |
| | S67 | 1439 | 3.1 | 0.48 | 15 | | | 0.04 | 1.34 | | | | 0.07 | 0.3 | |
| | S68 | 71 | 90 | 0.48 | 430 | | | 0.04 | 38.91 | | | | 0.07 | 7.6 | |
| | S69 | 507 | 0.13 | 0.48 | 1 | | | 0.04 | 0.06 | | | | 0.07 | 0.0 | |
| | S70 | 980 | 2.3 | 0.48 | 11 | | | 0.04 | 0.99 | | | | 0.07 | 0.2 | |
| | S71 | 364 | 63 | 0.48 | 301 | | | 0.04 | 27.23 | | | | 0.07 | 5.3 | |
| | S72 | 235 | 0.078 | 0.17 | 0 | | | 0.03 | 0.02 | | | | 0.06 | 0.0 | |
| DA5 | S73 | 641 | 1.8 | 0.17 | 3 | 0.03 | 0.48 | 0.06 | 0.1 | | | | | | |
| PLnd | S74 | 923 | 45 | 0.17 | 79 | 278050 | 79 | 0.03 | 11.96 | 10 | 0.06 | 3.6 | | | |
| | S75 | 937 | 0.12 | 0.26 | 0 | | | 0.04 | 0.05 | | | | 0.07 | 0.0 | |
| | S76 | 1319 | 2.2 | 0.26 | 6 | | | 0.04 | 0.89 | | | | 0.07 | 0.2 | |
| | S77 | 2825 | 66 | 0.26 | 173 | | | 0.04 | 26.83 | | | | 0.07 | 5.5 | |
| | TH3 | S78 | 61 | 0.17 | 0.54 | | | 1 | 0.06 | | | | 0.10 | 0.11 | 0.0 |
| S79 | 32 | 99 | 0.54 | 533 | 0.06 | 55.36 | 0.11 | 13.9 | | | | | | | |
| Syst. | SE-Va | 10434 | 373.068 | -- | -- | | | -- | -- | | -- | 27 | | | |
| TC3 | S80 | 649 | 0.072 | 0.48 | 0 | 27 | 225 | 0.04 | 0.03 | 29 | 0.07 | 0.0 | | | |
| | S81 | 79 | 37 | 0.48 | 177 | | | 0.04 | 15.99 | | | | 0.07 | 3.1 | |
| | S82 | 161 | 0.087 | 0.17 | 0 | | | 0.03 | 0.02 | | | | 0.06 | 0.0 | |
| | DA5 | S83 | 152 | 45 | 0.17 | | | 79 | 0.03 | | | | 11.96 | 0.06 | 3.6 |
| | PLnd | S84 | 543 | 0.13 | 0.26 | | | 0 | 0.04 | | | | 0.05 | 0.07 | 0.0 |
| S85 | 1284 | 82 | 0.26 | 215 | 0.04 | 33.33 | 0.07 | 6.9 | | | | | | | |
| Syst. | SE-Vb | 2869 | 164.289 | -- | -- | 78547 | 225 | -- | -- | 29 | -- | -- | 6 | | |

Pour faire suite, le tableau 3.12 est une synthèse des résultats des simulations selon les moyennes des systèmes d'érosion qui servira d'indicateur d'efficacité des aménagements.

Tableau 3.12 : Synthèse des simulations selon les systèmes d'érosion

| Tableau synthèse des simulations | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|---------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Systèmes d'érosion | Amoy_1 (t/ha/an) | Amoy_2 (t/an) | pertes moyennes de C (Kg/ha/an) | pertes moyennes de C (t/an) | pertes moyennes de N (Kg/ha/an) | pertes moyennes de N (t/an) | pertes moyennes de P (Kg/ha/an) | pertes moyennes de P (t/an) |
| SE-I | 91 | 349194 | 414 | 1581,15 | 48 | 182,07 | 10 | 36,83 |
| SE-IIa | 41 | 148667 | 139 | 501,85 | 18 | 64,41 | 4 | 14,88 |
| SE-II b | 31 | 29691 | 112 | 108 | 14 | 14 | 3 | 3 |
| SE-II c | 38 | 177426 | 125 | 589 | 16 | 77 | 4 | 17 |
| SE-III | 19 | 143155 | 93 | 715 | 10 | 76 | 2 | 19 |
| SE-IVa | 15 | 57309 | 49 | 192 | 6 | 24 | 1 | 5 |
| SE-IVb | 19 | 380989 | 64 | 1291 | 8 | 153 | 2 | 37 |
| SE-IVc | 19 | 157874 | 80 | 656 | 9 | 75 | 2 | 17 |
| SE-Va | 27 | 278050 | 111 | 1157 | 12 | 122 | 3 | 27 |
| SE-Vb | 27 | 78547 | 79 | 225 | 10 | 29 | 2 | 6 |

Pour le scénario 1, les résultats sont catastrophiques. Aucun système d'érosion n'obtient des résultats sous le seuil de tolérance en perte de sol par érosion. On peut affirmer que dans l'ensemble du secteur de référence les systèmes d'érosion créent des évolutions régressives du système sol. Par conséquent, les terres sont de plus en plus dégradées et appauvries.

Les impacts de l'érosion en nappe ont des répercussions sur le système social, économique et environnemental. Prenons l'exemple du système d'érosion SE-IIb qui a 95 % de sa surface totale utilisée pour la culture. Sa perte en terre moyenne est de 31 t/ha/an ce qui est 2,58 fois plus que le seuil de tolérance maximale de 12 t/ha/an. Puisque 95 % de la surface du système est cultivée on peut en déduire que ces terres perdent en moyenne 112 Kg/ha/an de C, 14 Kg/ha/an d'N et 3 Kg/ha/an de P. La gestion des nutriments en fonction

de l'érosion est difficile à faire. Les conséquences reliées à cette forte dégradation des sols sont nombreuses et plusieurs scientifiques en ont fait la preuve (sect. 1.2.5 et 1.3).

Par ailleurs, le prix des engrais est élevé (exemple : un sac de 50 Kg d'urée est à 20 000 FCFA, BNDA 2005). Pour un paysan moyen, les coûts des engrais ajouté aux coûts des semences provoquent une baisse de rentabilité et de la production. Surtout quand l'on doit combler des pertes en nutriments gigantesques comme le montre le tableau 3.12. Il est nécessaire pour le paysan de combler le bilan négatif de pertes en nutriments. La durabilité du sol est limitée et sa fertilité est grandement dégradée. Prenons l'exemple d'un sol TC5 du système d'érosion SE-Va. La profondeur maximale de ces sols est de 100 millimètres. L'érosion moyenne du système est de 27 t/ha/an. Ce qui signifie que sur une surface d'un hectare, un peu plus de 2 mm de terre arable est perdue chaque année. Alors, la durée de vie maximale de ce type de sol dans ce système d'érosion est de 50 ans. Après cet interval de temps, tout le sol est décapé. Par ailleurs, nous avons vu dans le chapitre I que les impacts de l'érosion sur la fertilité des sols sont multiples. Outre les pertes en terres et en nutriments, il y a l'acidification, la formation de croûte, la perte de structure, le lessivage des bases, etc.

3.3.1 Scénario 2

Le scénario 2 est un déroulement des événements qui résultera d'une action directe sur les surfaces combinatoires problématiques. Le milieu n'évolue pas, comme pour le scénario 1. Par contre, des méthodes culturales peuvent être changées, des pratiques de conservations ajoutées et des aménagements de territoires réalisés. Nous ferons une simulation moyenne faite sur vingt ans. Nous verrons ensuite qu'une meilleure gestion sur une surface combinatoire peut diminuer la fragilité d'un système d'érosion.

Dans un premier temps, nous devons proposer un changement de gestion des trente-cinq surfaces problématiques. Il faut trouver le facteur qui les rend le plus sensible à l'érosion. Pour les surfaces S2, S5, S6, S12, c'est le facteur C qui entre en jeu. Un sol nu et lisse comme l'on observe crée beaucoup d'érosion. Pour les surfaces S3, S9, S11, S14, S16, S19, S21, S22, S25, S28, S30, S33, S36, S38, S41, S51, S54, S57, S61, S63, S65, S77, S79 et

S85 ce sont les pratiques culturales, l'absence de pratiques de conservations et leur combinaison avec les facteurs S et L. Pour le S7, c'est la présence du fleuve Niger qui crée une érosion énorme. Pour la surface S26 c'est la combinaison d'un sol nu (lisse) avec des facteurs SL élevés. Pour les surfaces S45, S48, S59, S67, S68, S71, S74, S81, S83 c'est surtout la position topographique et le type de sol qui créent problème.

Deuxièmement, le problème majeur étant identifié, il faut trouver un type de gestion qui lui fera diminuer son érosion sous le seuil de tolérance en perte de sol. Les résultats sont présentés au tableau 3.13. Dans ce dernier, nous pouvons voir : les surfaces combinatoires avec leur système d'érosion respectif, les valeurs d'érosion de la surface selon le scénario 1, le problème ciblé, la solution proposé et la valeur de l'érosion après aménagement. En connaissant les caractéristiques des systèmes d'érosion et des types de sols (tab. 3.9 à 3.11) trouver la problématique devient plus évidente. En appendice G, nous pouvons voir les étapes pour trouver le meilleur aménagement pour la surface S3 du SE-I. De plus, en appendice I, le tableau complet du scénario 2 est disponible.

Tableau 3.13 : Solutions aux surfaces combinatoires problématiques

| Solutions selon les surfaces combinatoires problématiques | | | | | | |
|---|----|---------------------------------|----------------------------|-------------------|--|--|
| Nom | No | Érosion (t/ha/an) du Scénario 1 | Problèmes ciblés | Symboles méthodes | Solution proposée | Érosion après avoir utilisé les méthodes (t/ha/an) |
| SE-I | S2 | 48 | sol nu | M1 | Grandes graminées permanentes | 0,11 à 0,24 |
| | S3 | 70 | facteurs culture (C), L, S | M5 | Ajustement de MO à 3,5%, culture en billons cloisonnés et en courbes de niveau ou alternés, en rotation, bandes alternantes de graminées (3-10%) | 8,7 |

| | | | | | | |
|--------|-----|-----|----------------------------|-------------|--|-------------|
| | S5 | 133 | sol nu | M2 | Fourré dense et arbres fruitiers. | 0,11 à 0,24 |
| | S6 | 93 | sol nu | M1 et ou M2 | -- | 0,11 à 0,14 |
| | S7 | 383 | fleuve Niger | M3 | Bandes riveraines de 200 mètres + aménagement bétonné d'accès au fleuve | 242 |
| SE-IIa | S9 | 53 | facteurs culture (C), L, S | M5 | Ajustement de MO à 3,5%, culture en billons cloisonnés et en courbes de niveau ou alternés, en rotation, bandes alternantes de graminées (3-10%) | 7,7 |
| | S11 | 78 | facteurs culture (C), L, S | M4 | Ajustement de MO à 5%, culture en billons cloisonnés et en courbes de niveau ou alternés, en rotation, bandes alternantes de graminées(3-10%), structure de diversion (3-0,5%) | 9,1 |
| | S12 | 99 | sol nu | M1 et ou M2 | -- | 0,11 à 0,14 |
| | S14 | 66 | facteurs culture (C), L, S | M4 | Ajustement de MO à 6% | 8,7 |
| | S16 | 68 | facteurs culture (C), L, S | M4 | Ajustement de MO à 7% | 8,5 |
| SE-IIb | S19 | 59 | facteurs culture (C), L, S | M5 | Ajustement de MO à 5% | 9,9 |
| | S21 | 63 | facteurs culture (C), L, S | M4 | Ajustement de MO à 6% | 8,4 |

| | | | | | | |
|--------|-----|-----|-------------------------------|----|---|-----|
| SE-IIc | S22 | 30 | facteurs culture (C), L, S | M6 | Ajustement de MO à 3,5%, culture en billons cloisonnés et en courbes de niveau ou alternés, en rotation, bandes alternantes de graminées (1-10%) en fin de pente. | 7,1 |
| | S25 | 50 | facteurs culture (C), L, S | M5 | Ajustement de MO à 5% | 2,7 |
| | S26 | 144 | sol nu et facteur SL élevés | M7 | M1 et ou M2 additionnées d'une structure de diversion et une bande en milieu de pente. | 0,2 |
| | S28 | 59 | facteurs culture (C), L, S | M5 | Ajustement de MO à 6% | 3,2 |
| | S30 | 49 | facteurs culture (C), L, S | M4 | Ajustement de MO à 0% | 10 |
| SE-III | S33 | 47 | facteurs culture (C), L, S | M5 | Ajustement de MO à 6% | 7,1 |
| | S36 | 44 | facteurs culture (C), L, S | M6 | Ajustement de MO à 7% | 11 |
| SE-IVa | S38 | 27 | facteurs culture (C), L, S | M5 | Ajustement de MO à 5% | 4,1 |
| | S41 | 57 | facteurs culture (C), L, S | M6 | Ajustement de MO à 5% | 3,8 |
| SE-IVb | S45 | 43 | Position topo. et type de sol | M6 | Ajustement de MO à 5% | 2,4 |
| | S48 | 90 | Position topo. et type de sol | M4 | Ajustement de MO à 3,5% | 8 |
| | S51 | 58 | facteurs culture (C), L, S | M4 | Ajustement de MO à 5% | 7,3 |
| | S54 | 45 | facteurs culture (C), L, S | M5 | Ajustement de MO à 6% | 8,3 |

| | | | | | | |
|--------|-----|-----|--|----|--|-----|
| | S57 | 37 | facteurs culture (C), L, S | M6 | Ajustement de MO à 7%, culture en billons cloisonnés et en courbes de niveau ou alternés, en rotation, bandes alternantes de graminées (1-10%) en fin de pente. | 3,5 |
| SE-IVc | S59 | 23 | Position topo. et type de sol | M6 | Ajustement de MO à 5% | 1,6 |
| | S61 | 50 | facteurs culture (C), L, S | M5 | Ajustement de MO à 5%, culture en billons cloisonnés et en courbes de niveau ou alternés, en rotation, bandes alternantes de graminées (3-10%) | 8,7 |
| | S63 | 48 | facteurs culture (C), L, S | M4 | Ajustement de MO à 6%, culture en billons cloisonnés et en courbes de niveau ou alternés, en rotation, bandes alternantes de graminées(3-10%), structure de diversion (3-0,5%) | 6,9 |
| | S65 | 33 | facteurs culture (C), L, S | M6 | Ajustement de MO à 7% | 3,6 |
| SE-Va | S67 | 3,1 | Position topo. et type de sol | M8 | Aire à protéger, aménager 1 seul passage, reboiser zone mises à nue. Ajustement de MO à 7% avec l'accumulation de MO par résidus de savane | 1,8 |
| | S68 | 90 | Position topo., type de sol et culture | M5 | Ajustement de MO à 5% | 12 |
| | S71 | 63 | Position topo. et type de sol | M5 | Ajustement de MO à 5% | 8,4 |

| | | | | | | |
|-------|-----|----|-------------------------------|----|----------------------------------|-------|
| | S74 | 45 | Position topo. et type de sol | M6 | Ajustement de MO à 3,5% | 8,7 |
| | S77 | 66 | facteurs culture (C), L, S | M4 | Ajustement de MO à 5% | 8 |
| | S79 | 99 | facteurs culture (C), L, S | M9 | Gazon dense point d'eau, verger. | 0,017 |
| SE-Vb | S81 | 37 | Position topo. et type de sol | M5 | Ajustement de MO à 5% | 5,2 |
| | S83 | 45 | Position topo. et type de sol | M6 | Ajustement de MO à 3,5% | 8,5 |
| | S85 | 82 | facteurs culture (C), L, S | M4 | Ajustement de MO à 5% | 9,5 |

Dans le même ordre d'idées, plusieurs surfaces combinatoires offrent des informations importantes à tenir compte face aux résultats du tableau 3.13. D'ailleurs, l'interprétation du tableau reste délicate. Il faut connaître le milieu pour prévoir les difficultés possibles qui souvent font avorter le projet. Effectivement, connaissant le secteur de référence nous avons fait quelques observations. Tout d'abord, voyons quelques exemples du système SE-I. Pour la S2 nous recommandons de choisir une espèce de graminée que le bétail n'aime pas et aménager un passage pour les animaux. Le milieu de la surface S3 étant un bas-fond qui draine tout le bassin versant, il faut contrôler le ruissellement. Par ailleurs, augmenter le taux de MO augmente le complexe argilo-humique (TH3 riche en argile) et la fertilité des sols. Puis, réduit l'érodibilité du sol en favorisant une bonne structure. Pour la S5, l'utilisation d'arbres fruitiers peut être nécessaires à encourager les paysans à faire l'aménagement par l'obtention d'un revenu avec les fruits. De plus, l'utilisation du jujubier (*Ziziphus mauritiana*) permet de repousser le bétail qui détruit souvent l'aménagement. Pour le S6, le choix doit être fait selon la méthode qui motive le plus les paysans (M1 ou M2). Puis, il faut noter que les valeurs d'érosions sont de grossières approximations dans le cas de

la surface S7. L'érosion causée par le fleuve Niger a été évalué rapidement et n'est pas une information essentielle à ce travail.

Pour faire suite, à la surface S9 dans le système SE-IIa la cinquième méthode est proposée. La proximité des lieux avec des marres temporaire où l'argile est présente est avantageuse sur les sols DA5. L'ajout d'argile et de M.O. au sable améliore la structure et la fertilité. Ce type de sol a un bon drainage, alors il n'est pas nécessaire d'utiliser des terrasses/diversion. Il faut utiliser des bandes alternantes pour diminuer l'érosion. Par ailleurs, le paillage pourrait être une bonne technique à additionner. Pour la surface S14, l'hydromorphie y est présente, alors il faut favoriser l'infiltration de l'eau et bien contrôler le ruissellement. Voyons un dernier exemple, celui de la surface S26. L'utilisation d'une terrasse/diversion doit servir à adoucir la pente. Sa mise en application doit être accompagné d'une haie vive et ou d'un cordon pierreux et ou d'une facine d'après ce qui est disponible dans le milieu.

Ensuite, il faut voir l'impact que ces aménagements apportent aux différents systèmes d'érosion. Les résultats sont synthétisés au tableau 3.14 et les méthodes d'aménagements sont présentées à la prochaine section. On remarque au scénario 2 que l'érosion diminue de beaucoup. Par contre, un système demeure critique avec une perte en terre de 36 t/ha/an. C'est le système d'érosion SE-I puisqu'il est pourvu du fleuve Niger sur son territoire. Tous les autres restent au-dessous de la tolérance en perte de sol maximale. Néanmoins, les sols TC5, TC3, PLnd et PLpg peuvent être pour certaines surfaces supérieurs à leur seuil de tolérance.

Tableau 3.14 : Synthèse du scénario 2.

| Tableau synthèse des simulations scénario 2 | | | | | | | | |
|---|----------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Systèmes d'érosion | Amoy_1. (t/ha/an) | Amoy_2. (t/an) | pertes moyennes de C (Kg/ha/an) | pertes moyennes de C (t/an) | pertes moyennes de N (Kg/ha/an) | pertes moyennes de N (t/an) | pertes moyennes de P (Kg/ha/an) | pertes moyennes de P (t/an) |
| SE-I | 36 | 139055 | 164 | 626,25 | 19 | 72,98 | 3,70 | 14,13 |
| SE-IIa | 5 | 16616 | 17 | 60,03 | 2,03 | 7,30 | 0,49 | 1,75 |
| SE-II b | 5 | 4505 | 17 | 16 | 2,10 | 2,04 | 0,46 | 0,45 |
| SE-II c | 3 | 15279 | 13 | 60 | 1,47 | 6,93 | 0,36 | 1,72 |
| SE-III | 4 | 30892 | 20 | 158 | 2,17 | 17 | 0,53 | 4,10 |
| SE-IVa | 2 | 7631 | 7 | 29 | 0,86 | 3,36 | 0,18 | 0,71 |
| SE-IVb | 3 | 51524 | 9 | 182 | 1,07 | 22 | 0,25 | 5,14 |
| SE-IVc | 3 | 21568 | 10 | 85 | 1,23 | 10 | 0,28 | 2,27 |
| SE-Va | 3 | 34198 | 12 | 123 | 1,27 | 13 | 0,27 | 2,84 |
| SE-Vb | 4 | 11230 | 11 | 31 | 1,41 | 4,05 | 4,05 | 0,92 |

Finalement, nous avons comparé les deux scénarios (tab. 3.12 et 3.14) pour les valeurs moyennes des systèmes d'érosion. Les résultats sont frappants. Un aménagement durable des surfaces combinatoires problématiques des systèmes d'érosion provoque une diminution moyenne de l'érosion de 65 à 91 % (fig. 3.11). De plus, la différence des pertes de nutriments est magistrale. En soustrayant les pertes en éléments chimiques du scénario 2 (tab. 3.14) à celles du scénario 1 (tab. 3.12), nous obtenons les valeurs moyennes de conservation en nutriments (fig. 3.12). Pour le système d'érosion SE-IVb par exemple, la conservation en azote dans le système en entier est de 131 t/an. Tout compte fait, la spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe aide à faire une gestion durable des sols dans la région de Ségou en réduisant la perte en terre et en nutriments. Ainsi, cette méthode réduit les impacts négatifs de l'érosion sur la dynamique de la M.O., de l'azote et du phosphore des sols tropicaux acides.

Figure 3.11 : Comparaison des deux scénarios pour l'érosion.

Comparaison de l'érosion moyenne des scénarios 1 et 2 en fonction des systèmes d'érosion.

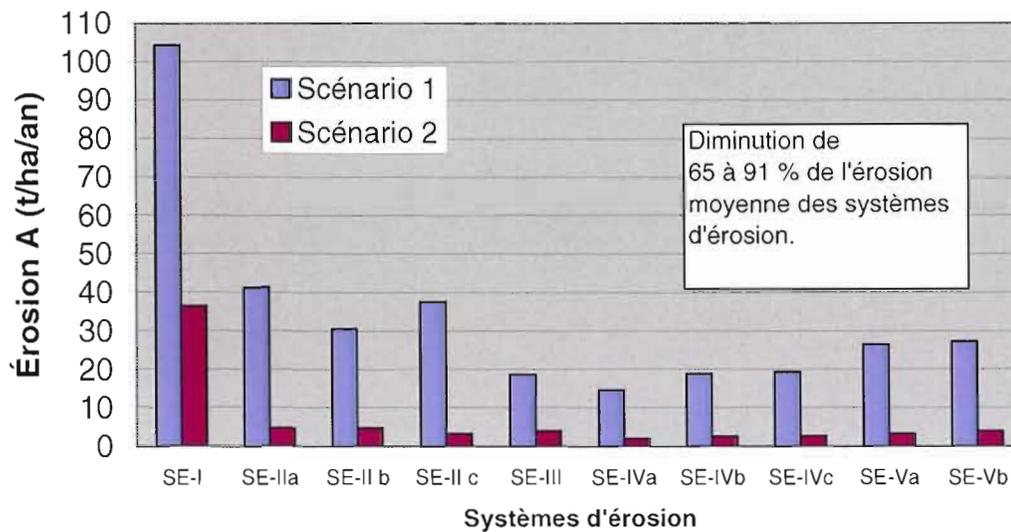
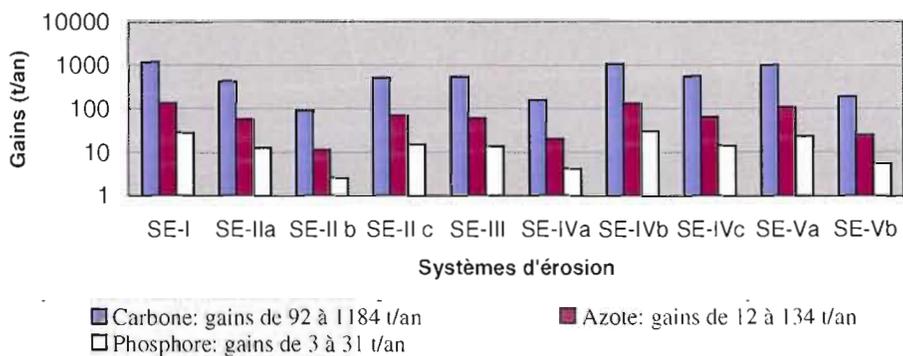


Figure 3.12 : Comparaison des deux scénarios pour la conservation des nutriments.

Conservation des nutriments par l'application du scénario 2 en fonction des systèmes d'érosions



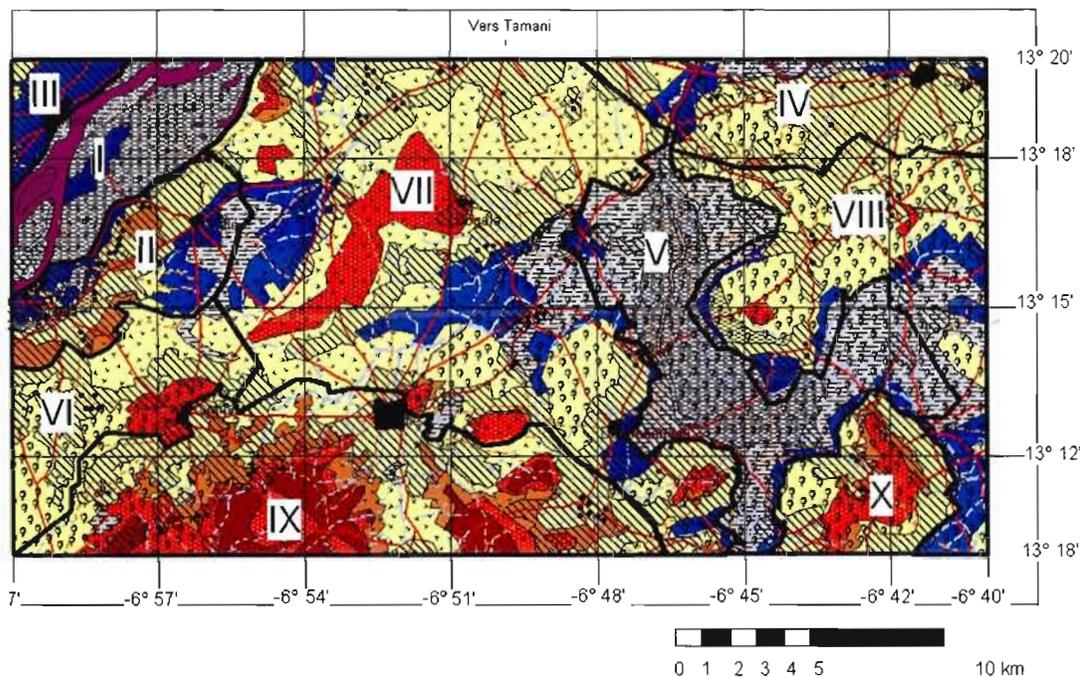
3.4 Carte de gestion des sols et unités de gestion

La spatialisation des impacts de l'érosion en nappe et les simulations faites avec le modèle RUSLE2 permettent de produire une carte de gestion des sols. Dans cette section, nous présenterons la carte et sa méthode d'utilisation. De plus, nous décrirons les techniques proposées pour une gestion durable des sols.

3.4.0 Utilisation de la carte de gestion des sols

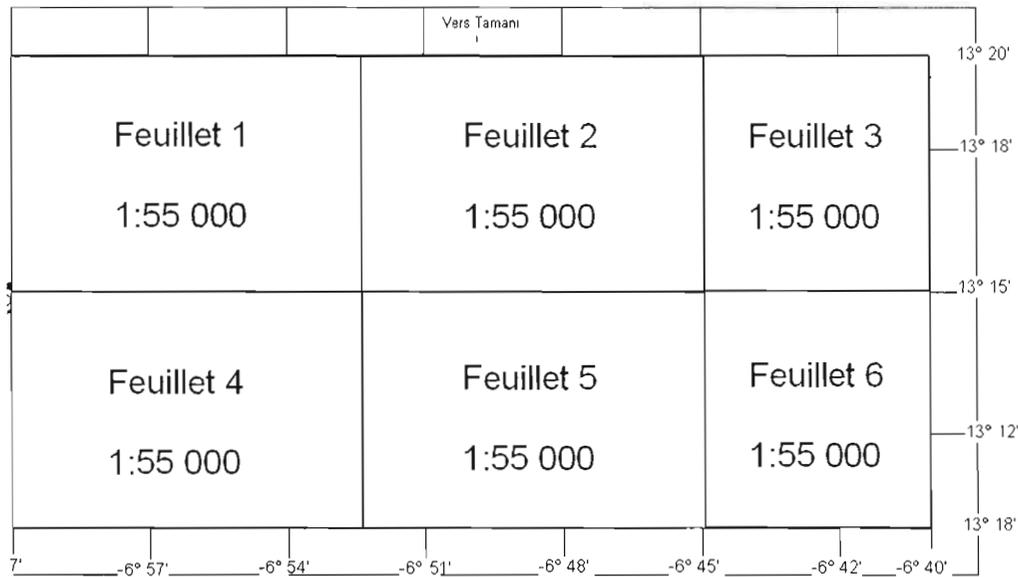
Les surfaces combinatoires permettent de cibler les problématiques d'un système d'érosion. Ainsi, nous pouvons leur attribuer des aménagements nécessaires pour diminuer l'érosion (comme nous l'avons fait au scénario 2). De plus, elles nous informent sur le type de sol et de couvert végétal présent. Par conséquent, elles nous aident à former des méthodes de gestion des sols à l'intérieur des systèmes d'érosion que nous appelons les unités de gestion de la carte.

Figure 3.13 : Carte de gestion des sols.



La figure 3.13 est la carte de gestion des sols réduite. Elle a été divisée en six feuillets à l'échelle de 1 : 55 000 (fig. 3.14).

Figure 3.14: Répartition des feuillets (app.H).



La méthode pour utiliser ces documents est de consulter la figure 3.13 pour se situer et avoir un aperçu global de la région. Ensuite, il faut se référer aux feuillets (app. H), à la légende qui lui est associée et ensuite au tableau 3.15. Celui-ci est le tableau d' « Utilisation de la carte de gestion des sols ». Il sert à trouver la méthode de gestion appropriée à tout point de la carte. Par exemple, si un paysan du village de Soya (V6) veut utiliser la carte des sols. Il commence par identifier dans quelle unité de gestion il se situe (ex. unité X). Ensuite, il doit trouver le type de sol de son champ (ex. DA5). Le type de sol étant identifié, le paysan regardera dans le tableau la ligne de la méthode de gestion qui se situe devant l'Unité de gestion X et DA5. De plus, il doit noter l'ajustement de la M.O. nécessaire selon le type de sol (tab. 3.16). Ce qui signifie que la méthode de gestion recommandée pour une diminution de l'érosion est M6 avec un ajustement de la M.O. de 3.5 %.

Tableau 3.15 : utilisation de la carte de gestion des sols

| La méthode à utiliser sur un sol selon les unités de gestion | | |
|--|---------------------|-------------|
| Unités de gestion | Types de sol | Méthodes |
| I | TH3 (culture) | M4 |
| | TH3 (sol nu) | M1 et ou M2 |
| | T14 (sol nu) | |
| | T14 (culture) | M3 |
| II | DA5 | M5 |
| | PLnd (avec culture) | M4 |
| | PL10pg | |
| | TH3 | M1 et ou M2 |
| PLnd (sol nu) | | |
| III | PLnd | M5 |
| | PL10pg | M4 |
| IV | DA5 | M6 |
| | PLnd (sol nu) | M7 |
| | PLnd (avec culture) | M5 |
| | PL10pg | |
| | TH3 | M4 |
| V | PL10pg | M5 |
| | TH3 | M6 |
| VI | TC3 | M5 |
| | PLnd | M6 |
| VII | TC3 | M6 |
| | TH3 | |
| | DA5 | M4 |
| | PLnd | |
| | PL10pg | M5 |
| VIII | TC3 | M6 |
| | TH3 | |
| | PLnd | M5 |
| | PL10pg | M4 |
| IX | TC5 (savane) | M8 |
| | TC5 (culture) | M5 |
| | TC3 | |
| | DA5 | M6 |
| | PLnd | M4 |
| | TH3 | M9 |
| X | TC3 | M5 |
| | DA5 | M6 |
| | PLnd | M4 |

Tableau 3.16 : Ajustement de la matière organique selon les types de sols

| Unités de sol | TH3 | PL10pg | PLnd | DA5 | TC3 | TC5 |
|-----------------------|-----|--------|------|-----|-----|-----|
| Ajustement de la MO % | 7 | 6 | 5 | 3,5 | 5 | 5 |

Il y a 9 méthodes d'aménagement (M1 à M9) qui sont proposés dans notre secteur de référence. Nous ferons une description détaillée de chacune d'entre elle. Il est important de noter que les méthodes sont dépendantes des surfaces combinatoires et que leur utilisation dans un champ en particulier doit être adaptée à la singularité du milieu. Les méthodes d'aménagement nécessitent des techniques particulières. Celles qui sont utilisées sont : l'ajustement de la matière organique, la rotation des cultures, les bandes alternantes, les billons cloisonnés en courbes de niveaux, les structures de diversions.

La méthode M1 est un reboisement du sol à nu avec l'utilisation de grandes graminées permanentes. La M2 consiste à reboiser pour créer un fourré dense (avec des arbustes (ex : le jujubier; *Ziziphus mauritiana*) et ou des arbres fruitiers). La M3 est un aménagement d'une bande riveraine de 200 mètres et d'un accès bétonné au fleuve. Pour la M4 il faut ajuster la M.O. et pratiquer des cultures en billons cloisonnés (en courbes de niveau ou alternés). Il faut faire la rotation avec des bandes alternantes (3-10%) et construire des structures de diversions (3-0,5%). Dans la méthode M5, on doit ajuster la M.O. et pratiquer des cultures en billons cloisonnés (en courbes de niveau ou alternés) et faire ensuite la rotation avec des bandes alternantes (3-10%). Pour la M6, il faut ajuster la M.O. et pratiquer des cultures en billons cloisonnés (en courbes de niveau ou alternés) et puis faire la rotation avec des bandes alternantes (1-10%). L'aménagement de la M7 est pareil à M1 et ou M2 additionnée d'une structure de diversion et d'une bande (10%) en milieu de pente. Pour la méthode M8, nous recommandons de créer une aire protégée où l'on peut y aménager un seul passage et reboiser les zones mises à nues. L'ajustement de M.O. se fait à 7% avec l'accumulation de M.O. des résidus de la savane. À la méthode 9, puisque le sol est hydromorphe et qu'il y a des mares temporaires, nous pouvons aménager un point d'eau et faire un pâturage (gazon dense pâturé). On peut également y aménager un verger.

Premièrement, l'ajustement de la matière organique doit être effectué (Roose, 1994; Breman et al. 1996; Breman et al. 1998). Elle permet de réduire l'érosion, mais aussi de corriger les imperfections des sols de la zone d'étude. Par exemple, la M.O. augmente la capacité d'échange cationique (sect. 1.3.1) par rapport à celle de la kaolinite de nos sols (sect. 3.1.2). Elle permet d'augmenter le pH du sol et de conserver une bonne structure si son taux reste au-dessus du seuil critique (sect. 1.3.1 et tab 3.9). Pour faire l'ajustement, il est possible de faire du paillage, d'ajouter du compost organique et d'utiliser les légumineuses comme engrais vert. Le choix de la technique dépend de l'utilisateur et de la disponibilité des matériaux. L'ajustement se fait en fonction du type de sol.

Deuxièmement, il y a la rotation de culture. Selon Roose (1994), l'alternance dans le temps (rotation) et dans l'espace de cultures qui protègent mal le sol avec des prairies temporaires ou permanentes, ou encore de bandes d'arrêt, permet de réduire l'érosion. Ceci est mis en évidence à l'appendice H. Nous proposons de faire les rotations soit avec des légumineuses, soit avec les bandes alternantes (enherbées), soit avec des jachères.

La technique des bandes alternantes réduit beaucoup l'érosion (Roose, 1994) et conserve les sédiments. Les bandes peuvent être enherbées (par exemple de *Andropogon* ou du *Pennisetum*), en graminées (*Setaria*) ou en arbustes (*Leucaena* ou *Calliandra*) (Roose, 1994). Les bandes peuvent aussi être des haies vives, constituées de deux à trois lignes d'herbes ou d'arbustes plantés en quinconce. L'utilisation de bandes alternantes forme en quelques années des terrasses progressives et adoucit la pente.

Les espèces utilisées pour la simulation avec RUSLE2 ont une masse racinaire précice décrite à la figure 3.16 (pour les 10 premiers centimètres). Elles ont également un pourcentage de couverture par la canopée démontré à la figure 3.17.

Figure 3.15 Terrasse progressive et adoucissement de la pente (adapté de Roose, 1994).

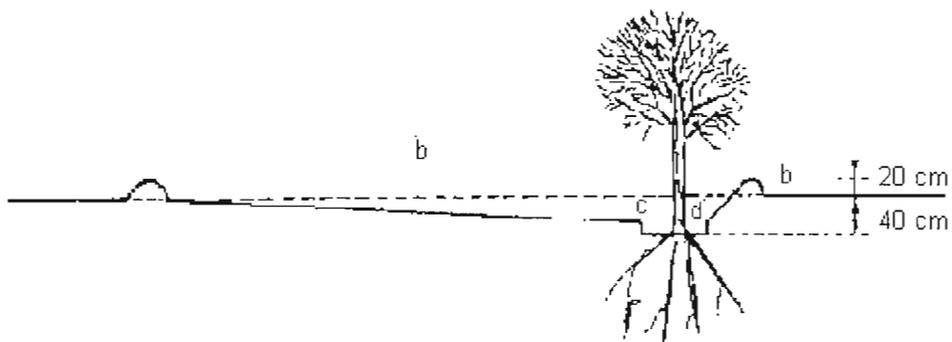


Figure 3.16 : Masse (Kg/ha) racinaire en fonction de l'âge (jours) pour les 10 premiers centimètres du facteur C de la bande alternante selon RUSLE2.

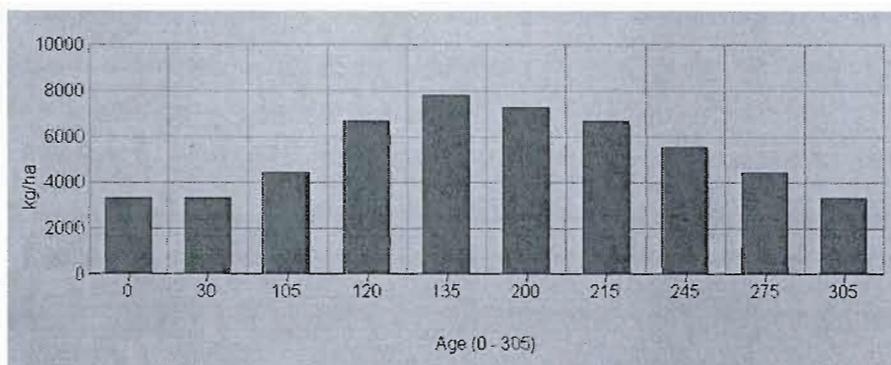
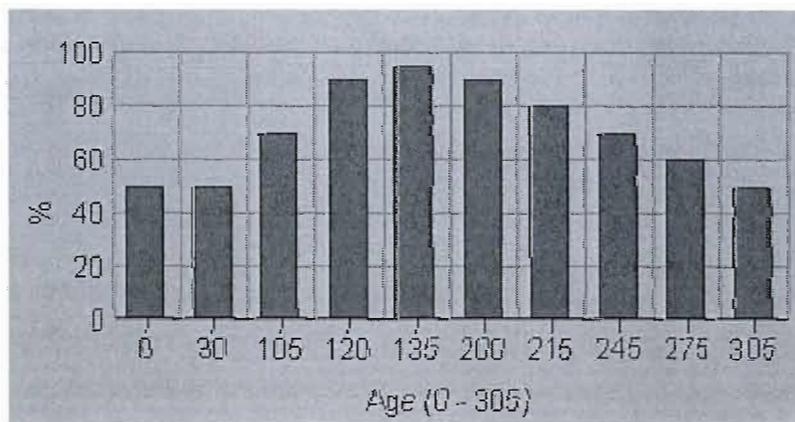
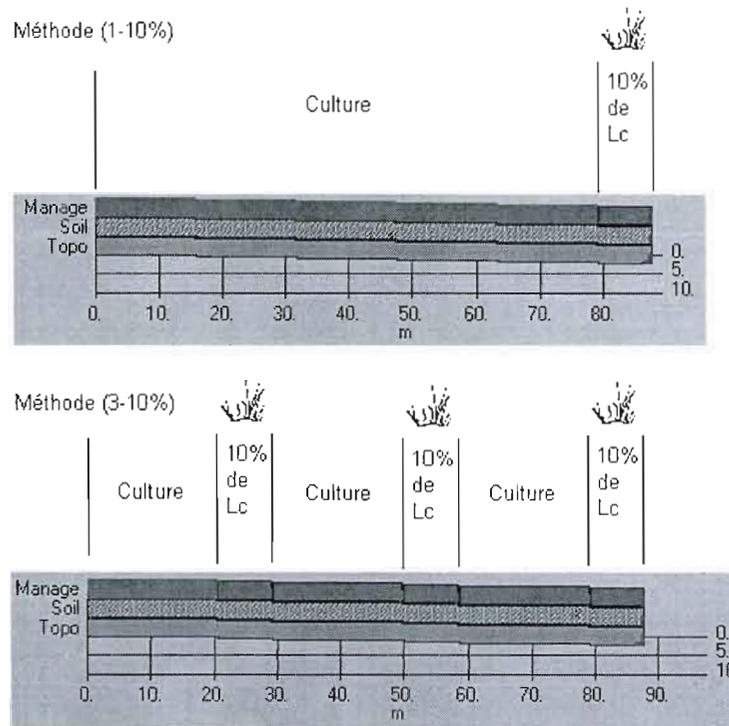


Figure 3.17 : Pourcentage de couverture par la canopée en fonction de l'âge (jours) du facteur C de la bande alternante selon RUSLE2.



Les bandes alternent avec les cultures selon les méthodes d'aménagements. Pour M4 et M5, les bandes sont installées en 3-10% et pour M6 en 1-10% (fig. 3.18).

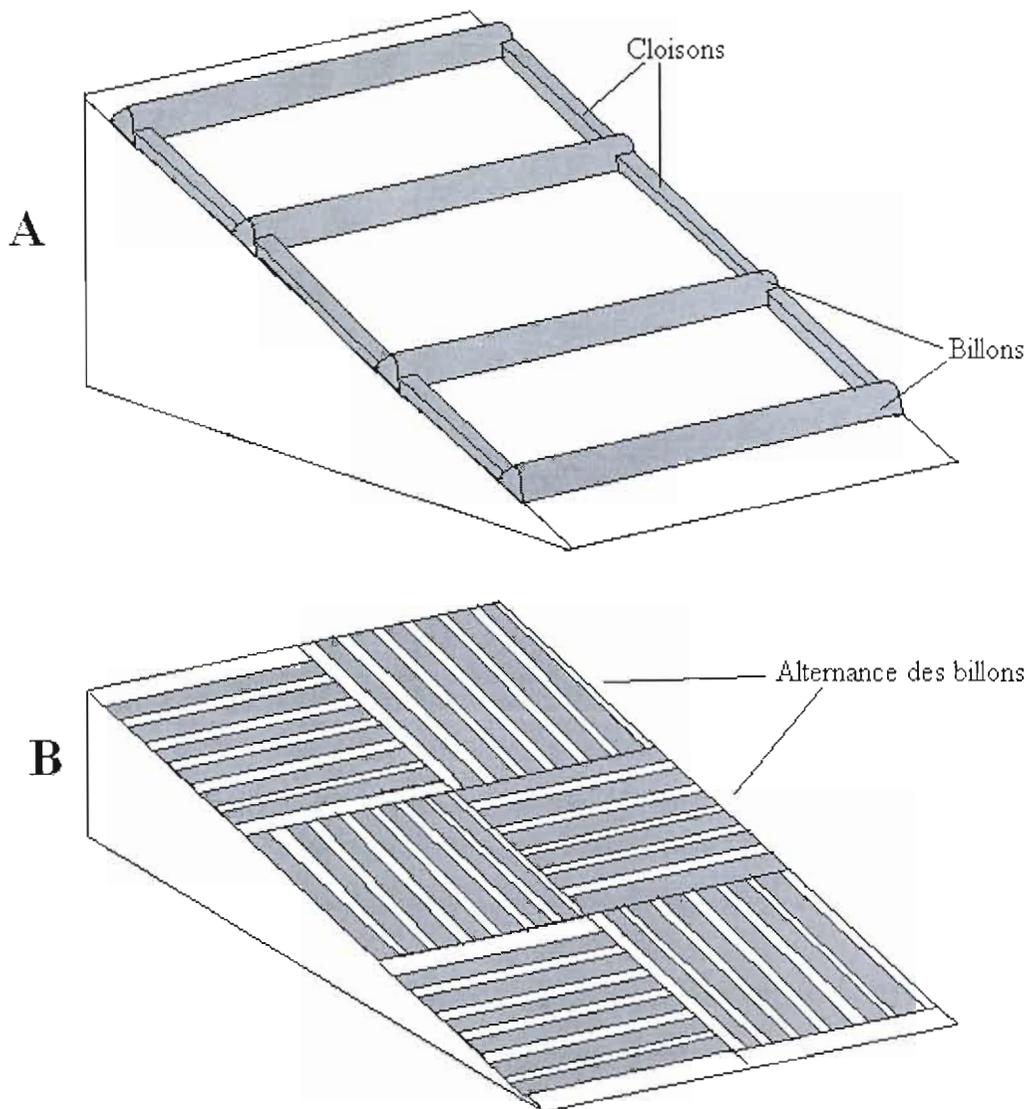
Figure 3.18 : Aménagement de bandes alternantes selon la longueur critique (Lc)



Troisièmement, il y a les billons. Cette technique sert à réduire l'érosion et à augmenter l'infiltration (sect. 1.2.4). Il peut y avoir différents types d'aménagement de billons selon la pente. Roose (1994) propose des billons en courbes de niveau pour des pentes supérieures et inférieures à 25 %. Sur des pentes inférieures à 25 %, il recommande les techniques suivantes : des petits billons isohypses, de préférence cloisonnés, au sommet des collines sur des sols peu épais pour faciliter l'infiltration des eaux et éviter la formation du ruissellement. Dans notre secteur de référence, nous recommandons les deux techniques de la figure 3.19. Les pentes de la zone d'études sont faibles, mais l'érosion en nappe est forte. Alors, des paysans équipés de niveau à eau peuvent facilement utiliser la technique en A (fig. 3.19). La technique en B est tout aussi bonne dans ces conditions. Par contre, si les pentes deviennent localement plus fortes, il faut alors aménager des bandes enherbées, des cordons

pierreux ou des facines là où le ravinement est favorisé. Les différentes bandes (de six à huit billons chacune) seront séparées par des haies vives fourragères ou des bandes alternantes. Entre deux bandes contiguës, les sillons peuvent être paillés pour augmenter l'efficacité de l'aménagement et diminuer l'érosion. Des gros billons perpendiculaires à la pente doivent être fait à proximité des talwegs sur des sols épais. Cette disposition évitera le ravinement en cas de fortes averses.

Figure 3.19 : Billons en courbes de niveau cloisonnés (A) et billons alternés (B)



Par ailleurs, des structures de diversions doivent être réalisées dans certaines conditions (tab. 3.13). Les différentes structures à utiliser sont : les fossés aveugles avec talus amont enherbé (fig. 3.20 A), des fossés de diversion (fig. 3.20 B), les bourrelets de diversion en terre (fig. 3.20 C) et des banquettes forestières (fig. 3.20 D).

Cependant, ces structures doivent être accompagnées de chenaux exutoires quand il y a débordement des structures (fig.3.21). Il est important de noter que ces chenaux peuvent devenir nuisibles s'ils ne sont pas bien aménagés ou entretenus. En effet, les structures de diversion peuvent évacuer l'énergie du ruissellement accumulée. Par contre, elle ne peuvent pas réduire l'énergie des pluies ni la dégradation du sol. L'efficacité des structures est très bonne, mais elles nécessitent un travail important d'installation et d'entretien. Les digues peuvent se dégrader, les canaux s'encombrer de sédiments et les exutoires se surcreuser ou s'ensabler si le travail d'entretien n'est pas fait.

Figure 3.20 : fossés aveugles avec talus amont enherbé (A), fossés de diversion (B), bourrelets de diversion en terre (C), banquettes forestières (D).

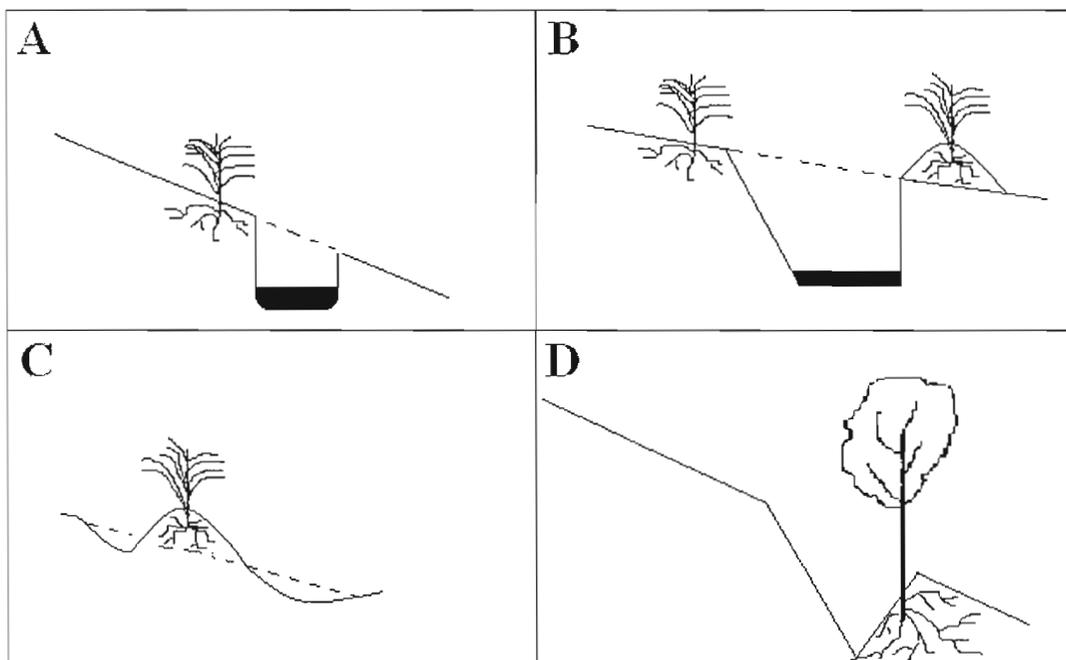
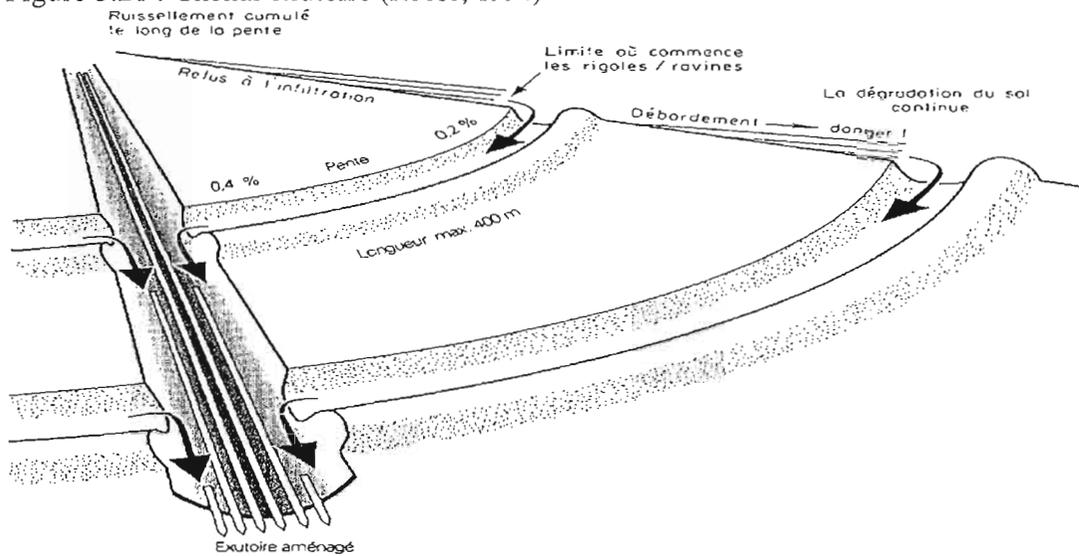


Figure 3.21 : Chenal exutoire (Roose, 1994)



En terminant, les méthodes d'aménagement causent des pertes de 5 à 15 % de la surface cultivée et augmentent la charge de travail. Par contre, les gains en conservation des nutriments par diminution de l'érosion compensent largement (fig. 3.11 et 3.12). De plus, l'augmentation de la production, du rendement et de la diversité agricole apporte des revenus supplémentaires aux paysans.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

Cette étude a mis en évidence deux résultats importants. Premièrement, nous avons pu constater que notre méthode de spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe à l'aide de SIG et de RUSLE2 fonctionne bien. Ensuite, nous avons observé que l'utilisation de cette méthode permet la gestion durable des sols en Afrique de l'Ouest. Par contre, les résultats obtenus doivent être considérés avec prudence car la méthode est sujette à des limitations.

4.1 La spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe à l'aide des SIG et de RUSLE2

La spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe est possible grâce à l'utilisation des SIG et de RUSLE2. Pour ce faire, nous avons utilisé des « profils types », la cartographie à moyenne échelle, l'analyse des toposéquences et la caractérisation de système d'érosion.

L'utilisation des SIG est nécessaire pour rendre l'exercice de spatialisation possible. En effet, les SIG nous ont permis de combiner dans l'espace les données climatiques, géomorphologiques, végétatives et pédologiques (Di Vecchia et *al.* 2001; DUBUCQ M. 1986; FAO 1995 et Nafu, 2000). Les SIG sont un outil important dans l'évaluation des risques d'érosion (Casenave et Valentin, 1989; Nafu, 2000). Leur utilisation permet de cibler les zones sensibles comme les surfaces combinatoires problématiques (sect. 3.2 et 3.3.1) et d'identifier les facteurs d'érosion qui causent leur sensibilité (tab. 3.13).

La caractérisation de « profils types » rend le facteur K de RUSLE2 spatialisable. Les caractéristiques des « profils types » remplissent tous les paramètres du facteur K (sect. 2.6.0 et 3.1; tab. 3.9). En effet, l'étude de Roose et Sarrailh (1989-90) montre l'érodibilité de quelques sols tropicaux et les résultats de nos « profils types » sont compatibles. Le modèle RUSLE2 respecte très bien les facteurs de l'érosion en nappe (sect. 1.2). C'est également ce que pense Roose (1994). Selon ce dernier, le modèle de prévision de l'érosion semble bien adapté à la majorité des terrains cultivés en Afrique de l'Ouest et en particulier aux pentes moyennes à faible. Notre secteur de référence respecte ces limites (sect. 2.5.5 et 3.2.1; tab. 3.10 et app. A, calcul 5).

Par ailleurs, la diffraction-x nous a permis de caractériser les « profils types » comme des sols ferrugineux tropicaux riches en kaolinite et riches en silicates. D'après Roose (1994), le modèle s'applique bien à des sols riches en kaolinite et aux sols ferrugineux tropicaux. Le drainage profond limité de certains types de sols augmente le lessivage et le ruissellement (Roose, 1980). La porosité des horizons des « profils types » a été étudiée dans notre recherche (app. C, D et tab. 3.9). Ainsi, nous avons tenu compte du drainage profond appelé aussi hydromorphie.

La cartographie pédologique à grande échelle est nécessaire dans la zone d'étude (sect. 2.4.1 et 3.2.0). Les cartes disponibles sont imprécises à l'échelle de notre étude (Casenave et Valentin, 1989; Di Vecchia *et al.* 2001; FAO, 1995; USDA 2000). Le résultat de notre cartographie respecte la classification et la caractérisation des sols des travaux du PIRT (1983a) et de Keita (2002). Par ailleurs, la caractérisation des « profils types » a aussi permis de préciser la cartographie du PIRT (1983a) et de réfuter la présence de l'unité PS3 dans le secteur de référence. Ce résultat est appuyé par la description des unités PS3 et DA5 de Keita (2002) et par les résultats d'exoscopie (sect. 3.1.3).

L'étude des toposéquences permet d'analyser l'organisation bidimensionnelle des sols, c'est-à-dire aussi bien verticale que latérale (Boulet *et al.* 1982). Les résultats de l'analyse des toposéquences de la zone d'étude (sect. 2.5) ont permis d'observer cette organisation bidimensionnelle. De plus, nous avons conclu que les variations de la

couverture pédologique dans le secteur de référence s'ordonnent selon la pente de la séquence topographique. Ce résultat est également appuyé par Casenave et Valentin (1989).

La caractérisation de systèmes d'érosion est une méthode que nous avons développée à partir de l'approche systémique, des SIG et de l'étude des toposéquences. Elle nous a permis de spatialiser les facteurs d'érosion à l'aide de surfaces combinatoires. De plus, elle nous a permis de calculer des pertes en terres à l'échelle de bassin versant avec RUSLE2. Ceci augmente le domaine d'application du modèle.

4.2 La spatialisation pour une gestion durable des sols en Afrique de l'Ouest

L'utilisation de notre méthode permet une gestion durable des sols en Afrique de l'Ouest. En spatialisant les facteurs d'érosion, nous pouvons utiliser le modèle RUSLE2 pour trouver des pratiques anti-érosives à appliquer dans la zone d'étude. Nous avons obtenus des résultats de pertes en terres et en nutriments selon deux scénarios.

Premièrement, le scénario 1 a révélé que l'érosion dans le secteur de référence est très élevée. En effet, l'érosion moyenne des systèmes d'érosions est de 15 à 91 t/ha/an (tab. 3.12). Selon, Roose (1994), les pertes en terre sur les glaciais ferrugineux tropicaux des régions soudano-sahéliennes sont de 0,5 à 40 t/ha/an. Nos résultats recourent ceux de cet auteur et deviennent plus précis en regardant les surfaces combinatoires des systèmes d'érosion (tab. 3.11) même à l'échelle du bassin versant.

Par ailleurs, le scénario 1 montre une perte en nutriments impressionnante. Les pertes en nutriments moyennes des systèmes d'érosions sont 49 à 414 Kg de C/ha/an, 6 à 48 Kg de N/ha/an et 1 à 10 Kg de P/ha/an (tab. 3.12). Ces résultats démontrent qu'il y a une perte substantielle de matières organiques par érosion et vont dans le même sens que Roose (1980) et Roose (1994). Les résultats de pertes en azote et en phosphore sont aussi compatibles avec la littérature précitée et Breman *et al.* (1996 et 1998). La perte en nutriments a comme grande conséquence une rupture des cycles du carbone (Roose, 1980), de l'azote et du phosphore. En d'autres mots, le système sol est en rupture.

Ensuite, les résultats de la caractérisation des « profils types » ont montré que les sols sont riches en kaolinite (tab. 3.6 et 3.7). Nous avons vu au chapitre I que les argiles 1/1 n'ont pas une CEC forte (Dabin, 1984-85). La M.O. stable est proportionnelle à la teneur en argile varie selon le type d'argile (Breman et *al.* 1998). La M.O. joue un rôle majeur dans la protection de la structure et de la capacité de stockage de l'eau et des nutriments des sols à kaolinite. Alors, les pertes en carbone dans ces types de sols cause une grande baisse de fertilité. En effet, la perte substantielle de matière organique affecte les propriétés physiques du sol (Roose, 1980).

De plus, l'absorption atomique et les tests de dispersions ont permis de montrer la présence d'oxyhydroxydes et de bases liés aux argiles (sect. 1.3). Selon Laurent et Brossard (1991), les sols tropicaux sont caractérisés par des teneurs faibles en phosphore total et par des proportions importantes de phosphore associé a des formes ferriques et alumineuses peu solubles. L'érosion sélective (sect. 1.2.5) montre l'entraînement des particules fines par l'érosion. Alors, la présence d'Al et Fe (tab.17; fig. 3.1 et 3.2) dans nos sols les appauvrit.

Deuxièmement, le scénario 2 montre des résultats très différents. Des méthodes d'aménagement pour lutter contre l'érosion ont été trouvées par RUSLE2. Celles-ci sont également conseillées par Roose (1994).

Dans ces résultats, on remarque que l'aménagement des surfaces combinatoires problématiques du SE-I a un impact moins important par rapport aux autres. Cela est du à la présence du fleuve Niger. En excluant le SE-I, l'érosion moyenne des systèmes d'érosions est de 2 à 5 t/ha/an (tab. 3.14). Quant aux pertes en nutriments moyennes des systèmes d'érosions elles se distribuent comme suit : 7 à 20 Kg de C/ha/an, 0,86 à 2,17 Kg de N/ha/an et 0,18 à 4,05 Kg de P/ha/an (tab. 3.14).

Bref, la conservation du sol des dix systèmes d'érosion (fig. 3.9; tab. 3.11 à 3.14) résulte en une diminution de 65 à 91% (fig. 3.11) de l'érosion moyenne du scénario 1. La conservation en nutriments apporte des gains de 92 à 1184 t de C/an, de 12 à 134 t de N/an et de 3 à 31 t de P/an (fig.3.12).

Tout compte fait, la spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe aide à faire une gestion durable des sols dans la région de Ségou en réduisant la perte de sol et de nutriments. Ainsi, cette méthode réduit les impacts négatifs de l'érosion sur la dynamique de la M.O., de l'azote et du phosphore des sols tropicaux.

4.3 Limites de l'étude

Maintenant qu'on dispose d'un nombre relativement important de mesures de l'érosion en parcelles expérimentales (plus de 560 en Afrique de l'ouest, du nord et du centre, Roose, 1994), on peut se questionner sur l'applicabilité de RUSLE2 au Mali. Ensuite, nous montrerons les limites de notre méthode.

Dans un premier temps, ce modèle ne s'applique pas aux zones où dominent les glissements de terrain et l'érosion linéaire. De plus, l'érosion linéaire est très forte dans notre secteur de référence (sect. 2.1.2). Le modèle n'aborde ni le problème du mode de ruissellement, ni des transports en solution. Cependant, l'objectif de cette étude est de spatialiser les facteurs de l'érosion en nappe. Alors, le lessivage des sols et l'érosion linéaire ne sont pas comptabilisés. Ensuite, le modèle est basé sur des données provenant de petites parcelles (90 à 300 m de côté). Elle proviennent également des champs ou des bassins versants de surface très limitée (quelques hectares). Il se pose donc des problèmes d'échelle lorsqu'on tente de prévoir des valeurs régionales d'érosion sur de grand bassin versant Roose (1994). En revanche, la méthode de caractérisation de système d'érosion résout ce problème d'échelle.

Par ailleurs, le couplage de modèle pourrait régler des lacunes d'application du modèle au Mali en corrigeant l'aspect qualitatif des matériaux érodés par érosion sélective en choisissant un modèle intégrant les nutriments. Ce processus faisant partie de l'érosion en nappe est négligé par le modèle. De plus, les études de l'ORSTOM et du CIRAD montrent que le modèle néglige les interactions entre les différents facteurs (Roose, 1994). Or, ces interactions se sont avérées très nombreuses à l'analyse des résultats. Ainsi, on a observé une grande différence de réaction de sol à l'agressivité des pluies en fonction de la pente, selon que le sol est argileux (rigoles) ou sableux (nappes) et selon l'état de surface du sol (rugosité

due aux façons culturales, humidité préalable du sol, gestion des résidus de culture). Malgré tout, le modèle RUSLE2 reste celui qui, en pratique, donne de meilleurs résultats (Roose, 1994). De plus, le facteur C du modèle n'est pas bien calibré pour les régions sub-tropicales. Alors, nous avons dû recalibrer les sous-modèles de végétaux et d'opérations pour obtenir des résultats plus près de la réalité.

Dans un deuxième temps, notre méthode comporte ses propres limites. En effet, les facteurs attribués aux pratiques humaines ont été négligés. Les interventions de l'homme sont difficiles à évaluer quand à leur influence sur le processus. Par contre, une intensification de l'agriculture (Breman et al. 1998) par meilleure gestion des sols comme nous le recommandons réduit l'extention des interventions anthropiques.

Les dépressions ou les pentes fortes sur de petites distances sont observables sur le terrain. Le DEM ayant des mailles de 90 mètres, il ne peut identifier ces zones. Alors, nous avons fait une correction des pentes apparentes en fonction des pentes réelles (app. A, calcul 5). Malgré l'importance de la télédétection dans de telles études, sa précision dans l'identification du taux de couverture végétale du sol est limitée (Nafo, 2000). À cet effet, nous avons utilisé une carte de RM (1994) avec une qualité de travail élevée. La caractérisation de profils avec des analyses de C, N, P totaux donne une représentativité relative du terrain. Cependant, nous avons utilisé des méthodes pour conserver la représentativité de l'échantillonnage (ex : séparation par quartiles). Nous l'avons fait sur le terrain et lors des analyses.

De plus, cartographier les PL10 et PL11 sans analyse de laboratoire et sans moyens techniques est très difficile. Par conséquent, nous avons été forcé de combiner ces sols pour n'en former qu'un, le PLnd. Par contre, les différences négligeables des caractéristiques de ces deux sols ont été observées (tab. 3.9). Ce qui nous a permis de conclure que ces sols ont des caractéristiques semblables pour calculer l'érosion.

CONCLUSION

Le but du travail est d'assurer à long terme la sécurité alimentaire au Mali avec une méthode de spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe.

Pour ce faire, une étude de terrain de deux mois au Mali (à Boidié) a été réalisée. Des données météorologiques, géomorphologiques, pédologiques et agronomiques ont été recueillies. De plus, nous avons pris 34 échantillons pour l'analyse en laboratoire. Nous avons fait une étude détaillée de la station de Dilango de 81 ha. Puis, nous avons cartographié le secteur de référence ayant une superficie total de 648 km².

Les sujets qui ont été traités sont : l'érosion en nappe, la modélisation, la spatialisation, la dynamique des nutriments des sols tropicaux acides (M.O., C, N et P), les pratiques de conservation des sols et les bilans de terre et de nutriments.

Les problèmes que nous avons à résoudre pour atteindre nos objectifs ont été : la cartographie pédologique à grande échelle, la caractérisation de « profils types », le calcul de l'érosion à l'échelle du secteur de référence et la spatialisation

Nous nous étions fixés comme objectifs d'améliorer les références pédologiques locales, d'analyser et décrire les « profils types » de sols. Montrer l'applicabilité du modèle RUSLE2 dans la région de Ségou. Montrer les impacts de l'érosion en nappe dans le secteur de référence. Produire une carte locale de gestion des sols.

Pour réaliser les objectifs, nous avons dû utiliser plusieurs méthodes et disciplines: la modélisation, la spatialisation, la cartographie, pédologie, les toposéquences et la systémique. Pour la modélisation, nous avons utilisé le modèle RUSLE2 (Foster et *al.* 2002) et des calculs de pertes en nutriments du projet PSS (Breman et *al.* 1996). Au niveau de la spatialisation, la

méthode des SIG a été utilisée (Nafo, 2000). Pour la cartographie, nous avons utilisé la méthode de cartographie réfléchie et systématique (Duchaufour, 2001). En plus, l'approche de l'étude des toposéquences (Boulet et *al.* 1982) a été utilisée avec succès. La pédologie nous a servi à caractériser les « profils types ». Cette dernière utilise les méthodes d'analyses suivantes: la dispersion, l'absorption atomique, l'analyse granulométrique, l'exoscopie, la diffraction-x et les analyses de C, N et P totaux. Finalement, nous avons élaboré une méthode de caractérisation de systèmes d'érosion pour augmenter la qualité de la spatialisation.

L'utilisation de la carte de gestion des sols des environs de la commune de Boidié permettrait de diminuer l'érosion moyenne des systèmes d'érosion de 65 à 91 %. La perte en nutriment des sols est diminuée et la fertilité est augmentée. La conservation en nutriments apporte des gains de 92 à 1184 t de C/an, de 12 à 134 t de N/an et de 3 à 31 t de P/an. Bref, la spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe aide à faire une gestion durable des sols dans la région de Ségou en réduisant la perte en terre et en nutriments.

Certaines problématiques sont ressorties de ce travail pour des recherches à venir. La spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe devrait tenir compte des croûtes de battance et de l'hydromorphie. De plus, selon Roose (1980), la perte continue et régulière des bases (surtout Ca et parfois K) est certainement le point le plus grave à long terme. Des travaux comme ceux de Casenave et Valentin (1989) montre l'importance des croûtes de surface dans le processus d'érosion. Les techniques de cartographie de celles-ci étant avancées, leur spatialisation avec les SIG pourrait augmenter la fiabilité de certains résultats. De plus, l'hydromorphie est trop peu utilisé dans le modèle RUSLE2. Ce processus est visible dans notre zone d'étude et peu connu. Finalement, nous avons constaté que la perte de nutriments par l'érosion est énorme. Alors, il serait intéressant de travailler à l'intégration de calculs de pertes en nutriments dans des modèles comme celui-ci.

BIBLIOGRAPHIE

SITES INTERNET

AGRYMET <http://www.agrhymet.ne/>

Association française pour l'étude des sols <http://www.inra.fr/Internet/Hebergement/afes/>

British society of soil science <http://www.soils.org.uk/index.htm>

Corning (2005)
www.scienceproducts.corning.com

Coulibaly A., 2003. *Profil fourrager du Mali*. FAO. 31 pp.
<http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGP/AGPS/docÉpasture/pasture.htm>

DESPA, 2005. <http://despa.obsprm.fr/~moncuque/DESS/node1.html>

FAO, 2004. <http://www.fao.org/countryprofiles/maps.asp?iso3=MLI&lang=fr>

FAO, 2003. <http://www.fao.org>

Kuenstler B. 2002. *RUSLE2 slides set*.
http://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2_dataweb/RUSLE2_Index.htm.

Liste francophone d'étude des sols <http://listes.cru.fr/wws/info/sols-afes>

Moughli L. 2005. Fertilité du sol et contrôle de la pollution.
http://www.iav.ac.ma/agro/dss/fertilite_4/index.htm

National Society of Consulting Soil Scientists <http://www.nscss.org/>

Penning et al. 1991. <http://www.gcw.nl/kiosk/sahel/PENNING/B052.htm>

PNUD, 2004. Document de stratégie nationale de la deuxième phase opérationnelle du programme de petites subventions du fonds pour l'environnement mondial (PPS/FEM), Mali.
<http://www.ml.undp.org/>

Technical University of Berlin, 2004.
<http://www.tu-berlin.de/fb7/kartographie/projekte/mali/imap>

Soil Science Society of America <http://www.soils.org/>

World Climate, 2003. <http://www.worldclimate.com/index.htm>

MONOGRAPHIES

Arrignon J. 1987. *Agro-écologie des zones arides et sub-humides*. G.-P.Maisonneuve et Larose et A.C.C.T. Techniques agricoles et productions tropicales, France 283 pp. ISBN: 2-7068-0955-8 et 92-9028-111-1

Casenave A. et VALENTIN C. 1989. *Les états de surface de la zone sahélienne; influence sur l'infiltration*. ORSTOM, Paris, 1989, 212 pp.

Condom N. 2000. *Analyse et modélisation couplée des processus hydro- géochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali)*. Thèse, Ministère de l'agriculture et école nationale supérieure agronomique de Montpellier. 191 pp.

Breman H. et al. 1996. *Description agronomique quantitative des systèmes de production végétale en zone soudano-sahélienne*. Wageningen. Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS) no 28, 4 annexe, 82 pp.

Breman H. et al. 1998. *L'intensification agricole au Sahel*. Éditions Karthala, Paris, 996 pp.

Davidson R. 2004. *Sujet de pointe en environnement ENV 9560 Amazonie milieu, intervention et conservation*. Notes de cours. UQÀM, Montréal. 89 pp.

Di Vecchia A. et al. 2001. *Les aptitudes agricoles et pastorales des sols dans les pays du CILSS*. Projet Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles (AP3A) dans le cadre du Programme Majeur Information, 165 pp. SITE INTERNET: <http://p-case.iata.fi.cnr.it/ap3a/> ISBN 88-900502-5-X

DNCNM, 1999. *Recueil des textes législatifs et réglementaires en matière de gestion des ressources forestières fauniques et halieutiques*. Ministère de l'environnement du Mali, Bamako, 87 pp.

Duchaufourd P., 1965. *Précis de pédologie. Deuxième édition*. Masson et Cie, éditeurs. Paris, 481 pp.

Duchaufourd P., 2001. *Introduction à la science du sol; sol, végétation, environnement*. 6^e édition. DUNOD, Paris, 331 pp. ISBN 2 10 048390 0

FAO, 1995. *Global and National Soils and Terrain Digital Databases (SOTER)*. FAO, Italy, 124 pp. ISBN 92-5-103191-4.

FAO, ISRIC, ISSS, 1998. WRB (*World Reference Base for Soil Resources*). ISSS-AISS-IBG International Society of Soil Science, ISRIC (International Soil Reference and Information Centre), Rome, 76 pp.

Foster G.R., Weesies G.A., Renard, K. G., Mccool D. K., and Yoder D. C. 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, 404 pp.

Foster G. R. et al. 2002. *USER'S GUIDE Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2)* USDA-Agricultural Research Service Washington, D.C. 163 pp.

Foucault A. et Raoult J.-F., 1995. *Dictionnaire de géologie*. 4^e édition, Masson, Paris. 324 pp. ISBN2-225-84635-9

Girard P., Goulet N. et Malo M. 1998. *La géologie du Mali. Synthèse des données géologiques et cartographiques; Amélioration et modernisation du centre de documentation. Rapport final partie II*. Kilborn TECSULT 85 rue Ste-Catherine Ouest, Montréal.

Harbaugh, A.W. et al. 2000, *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process* U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 pp.

Landry B. et Mercier M. 1992. *Notions de géologie*. 3^e édition revue et augmentée. Modulo, Canada, 558 pp.

Legros J.P. 1996. *Cartographie des sols*. Presses Polytechniques Romandes. 321 pp.

Le Ribault L., 1977. *L'exoscopie du quartz*. MASSON. Collection: Techniques et méthodes sédimentologiques. Paris, New York, Barcelone, Milan. 150 pp. ISBN 2-225-46123-6

Mathieu C. et Pieltain F. 1998. *Analyse physique des sols: méthodes choisies*. Paris : Technique et documentation. France, 275 pp. ISBN 2-7430-0283-2

Morel. R., 1989. *Les sols cultivés*. Tech. & doc. Lavoisier, Paris, 373 pp.

Nations Unies, 2003. *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. Conclue à Paris le 17 juin 1994. Approuvée par l'Assemblée fédérale le 27 septembre 1995. RO 2003 787, 66 pp.*
<http://www.admin.ch/ch/f/as/2003/788.pdf>

Nations Unies, 1992. *Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. ONU, 31 pp.

Osmond, D.L., T.J. Smyth, R.S. Yost, D. L. Hoag, W.S. Reid, W. Branch, X. Wang et H. Li. 2004. *Nutrient Management Support System (NuMaSS), v. 2.1.* Soil Management Collaborative Research Support Program, North Carolina State University, Raleigh, NC.

Penning et al. 1982. *La productivité du pâturage sahélien. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle.* Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen, 525 pp. ISBN 90 220 0806 1

PIRT, 1983a. *Les ressources terrestres au Mali.* Volume I. Atlas. Projet Mali/USAID Bamako, Mali TAMS, New York, USA. 33 cartes au 1/500 000 + 33 transparents.

Roose E., 1994. *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols.* FAO, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie. Bulletin pédologique 70. 502 pp. ISBN 92-5-203451-X

Rosnay J. (1975). *Le microscope; vers une vision globale.* Seuil, Paris, 289 pp.

SLACAER, 2004. *Données agro-météorologique des campagnes 1999 à 2004. Les pluies utiles pour la commune de Barouéli.* Consultation sur place SLACAER (Service local appuis, conseils, aménagements, équipement rural à Barouéli)

Toure, A. S. et al. 2000. *Situation générale de la diversité biologique au Mali.* Ministère de L'Équipement, de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et de l'Urbanisme, République du Mali, SNPA/DB. 103 pp.

USDA, 2003. *Keys to Soil Taxonomy, Ninth Edition.* USDA (United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service) et NRCS (Natural Resources Conservation Service), USA, 332 pp.

Wishmeier W.H. et Smith D.D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses.* Agricultural Handbook no 537, 58 pp.

ARTICLES SCIENTIFIQUES

Aly Ould O., 2003. *Le Niger, un grand fleuve menacé dans son existence physique (exposé pour le 3^e Forum mondial de l'eau, Kyoto, 16-23 Mars 2003)*. Kyoto, 27 pp.

Blic P. et Some N.A., 1997. *État structural d'horizons superficiels sableux sous culture ou jachère herbacée en Afrique de l'Ouest*. *Étude et Gestion des sols* vol. 4-1, 17-24 pp.

Boulet R., Chauvel A., Humbel F-X. et Lucas Y. 1982. *Analyse structurale et cartographie en pédologie. Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique : les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols*. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol. XIX, no 4, 309-321 pp.

CFGA, 2002. *L'expérience du Mali dans la lutte contre la pauvreté*. Cinquième forum sur la gouvernance en Afrique, Maputo, Mozambique, 30 pp.

Collinet J. 1988. *Étude expérimentale de l'érosion hydrique de sols représentatifs de l'Afrique de l'Ouest:Présentation des sites expérimentaux; Méthode et identification des processus élémentaires; Analyse et comparaison des régimes de ruissellement*. Cah. ORSTOM, sér. Pedol., vol. XXIV, no 3, 235-254 pp.

Dabin B., 1984-1985. *Les sols tropicaux acides*. Cah. ORSTOM, Série. Pédologique., vol. XXI, no 1, 7-19 pp.

Diarra L. et al. 2003. *Analyse des externalités environnementales des deux systèmes de productions cibles*; Roles of Agriculture Project International Conference 20-22 October, FAO, Rome, Italy. 52 pp.

D-IC SAHEL, 2002. *Appuis à la gestion locale et durable des ressources naturelles au Sahel; rôle des organisations paysannes:expérience de Barouéli et de Ségou*. Agridoc, Ségou, Mali. 8 pp.

Doumbia M. et al. 2003. *Recommandations spécifiques d'engrais: Calibration et validation du Module Phosphore Du Modèle NuMaSS*. African Crop Science Journal, Vol. 11. No. 1, 17-25 pp. ISSN: 1021-9730

Dubucq M. 1986. *Téledétection spatiale et érosion des sols. Étude bibliographique*. Cah. ORSTOM, sér. Pédologique, vol. XXII, no 2. 247-258 pp.

Dugué P. et al. 1993. *L'aménagement de terroirs villageois et l'amélioration de la production agricole au Yatenga (Burkina Faso) : Une expérience de recherche-développement*. Cahier. Orstom, Série Pédologique, vol. XXVIII, no 2, 385-402 pp.

- Eschenbrenner V. 1986. *Contribution des termites à la micro-agrégation des sols tropicaux*. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXII, no 4, 397-408 pp.
- Ellison W.D. 1944. *Studies of raindrop erosion*. Agric. Eng. 25: 13, 1-181 pp
- FAO, 2000. *Quatorzième réunion du sous-comité ouest et centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres*. FAO, Bénin Abomey, 193 pp.
- Fearnside, P.M., 1997. *Human carrying capacity estimation in Brazilian Amazonia as a basis for sustainable development*. Environmental Conservation 24 : 271-282 pp.
- Feller C., Chopart J.L. et Dancette F. 1987. *Effet de divers modes de restitution de pailles de mil sur le niveau et la nature du stock organique dans deux sols sableux tropicaux (Sénégal)*. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIII, no 3, 237-252 pp.
- Feller C., Fritsch E., Poss R. et Valentin C., 1991. *Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier)* Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXVI, no 1, 25-36 pp.
- Ferault V., 2003. *Analyse-diagnostic des systèmes agraires passés et actuels d'un village de la région de Kita au Mali*. Land Reform Volume I. 118 pp.
- Henderson W.H., Lalande H. et Duquette M. 1993. *Soil Reaction and Exchangeable Acidity*. Canadian Society of Soil Science, Chap.16, 141-143 pp.
- Jones C. et Jacobsens J., 2001. *Nitrogen cycling, Testing and Fertiliser Recommendations*. Dans Nutrient Management, MSU (Montana State University), Extension soil scientist, Module 1 à 9. Montana, 15 pp.
- Keita B. 2002. *Les sols dominants du Mali. Tiré de Quatorzième réunion du sous-comité ouest et centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres*. FAO, Bénin. ISBN 92-5-204803-0
- Kouyaté Z. et Juo A.S.R. 1998. *Effets des engrais verts et des rotations de cultures sur la productivité des sols au Mali*. Dans Buckles D. et al. juillet 1998. *Plantes de couvertures en Afrique de l'Ouest, une contribution à l'agriculture durable*. CRDI/IITA/SG2000, 171-177 pp.
- Latham M., Kilian J., Pieri C., 1984-1985. *Fertilité des sols acides tropicaux Une démarche pour les projets IBSRAM*. Cah. ORSTOM, ser. Pedol., vol. XXI, no 1, 33-41 pp.
- Laurent J-Y. et Brossard M. 1991. *Étude comparée de la détermination du phosphore total de sols tropicaux*. Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVI no 3, 281-285 pp.

- MAEP, 2003. *Réunion de suivi/évaluation de la situation alimentaire au Sahel au titre de la campagne 2002/2003*. Dans le rapport National du Mali. Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche. République du Mali. 16 pp.
- Manlay R., 2004. *Bilans spatialisés de carbone, d'azote et de phosphore à l'échelle d'un terroir de savane ouest-africaine*. Agricultural Systems (1), 83-107 pp.
- Michel P., 1973. *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie*. Étude géomorphologique. Mémoires ORSTOM no. 63, tome 3, Paris.
- Mietton M. 1986. *Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina Faso*. Cahier. ORSTOM. Série. Pédologie, vol. XXII, no 2, 181-196 pp.
- Nafo I. I. 2000. *Conservation des sols avec l'aide du SIG et de la télédétection; Exemple d'utilisation du SIG et de la télédétection pour l'estimation des pertes en terres dans un petit bassin de l'ouest du Mali*. 141-151 pp.
- Roose E. 1979. *Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous une savane arbustive soudanienne du nord de la Côte d'ivoire (Korhogo : 1967-75)*. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVII, n 2, 81-118 pp.
- Roose E., 1980. *Quelques conclusions des recherches françaises sur la dynamique actuelle des sols en Afrique occidentale*. Journée Georges Aubert - 11 Septembre 1980. Cahier O.R.S.T.O.M., Série Pédologie, Volume XVIII, nos 3-4, 285-298 pp.
- Roose E. 1983. *Ruissellement et érosion avant et après défrichement en fonction du type de culture en Afrique occidentale*. Cah. O.R.S.T.O.M., série. Pédologie., Volume XX, no 4, 1983: 327-339 pp.
- Roose E., 1986. *Terrasses de diversion ou microbarrages perméables? Analyse de leur efficacité en milieu paysan ouest-africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne*. Cah. ORSTOM, Ser. Pedol., vol. XXII, no 2, 197-208 pp.
- Roose E. et Sarrailh J.M. 1989-90. *Érodibilité de quelques sols tropicaux; Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles*. Cahier. ORSTOM, série Pédologie, Volume XXV, no 1-2, : 7-30 pp.
- Le Bissonnais Y. et al., 1989-90. *Étude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles : Apport à la notion d'érodibilité des sols*. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., vol. XXV, no I-2, 31-40 pp.

CARTES

Bassot J-P. et al. 1980. *Le plan minéral de la République du Mali*, Ministère du développement industriel, Direction Nationale de la géologie et des mines du Mali. Carte. Consultation sur place à Bamako avec SEIDOU DIABATE, de la Direction Nationale de la géologie section cartographie.

NASA, 2005. *DEM N13W007, 90m*. NASA, STRM, USGS.

USDA, 2000, NRCS (U.S Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service), *Global soil regions*. Carte, Miller projection, 1 :1 000 000.

RM (République du Mali), 1994. *Ségou N-29-XII*. Établi par: Institut Géographique National de Paris. En collaboration avec: La Direction Nationale de la Géographie et de la Topographie du Mali. 1:200 000

PIRT, 1983a. *Les ressources terrestres au Mali*. Volume I. Atlas. Projet Mali/USAID Bamako, Mali TAMS, New York, USA. 33 cartes au 1/500 000 + 33 transparents.

CONSULTATIONS

Diabate S. 2004. *Géologie*. Ingénieur géologue à la Direction Nationale de la géologie et des Mines du Mali division géologie. Chef de la section cartographie. BP. 223, Tél : 222-24-66.

ORS, 2003-04. *Lecture du fleuve Niger; crues. Côte 282.36*. ORS (office du riz Ségou) à Tamani.

SLACAER, 2005. *Données agro-météorologiques des campagnes 1999 à 2004*. Les pluies utiles pour la commune de Barouéli. Consultation au SLACAER (Service local appuis, conseils, aménagements, équipement rural). Barouéli, Mali.

APPENDICE A

CALCULS

| Appendice | Page |
|-----------|--|
| A.1 | Calcul 1: Conversion des unités des lectures à l'absorption atomique.....200 |
| A.2 | Calcul 2 : Conversion des unités des lectures du phosphore total.....200 |
| A.3 | Calcul 3 : Conversion du carbone total en pourcentage de M.O.....200 |
| A.4 | Calcul 4 : Calcul du facteur L.201 |
| A.5 | Calcul 5 : Correction des inclinaisons apparentes (DEM) Vs réelles.....201 |
| A.6 | Calcul6 : Conversion de surfaces (km2 en ha)202 |
| A.7 | Calcul 7 : Érosion moyenne de systèmes d'érosion (Amoy_1. t/ha/an)202 |
| A.8 | Calcul 8 : Érosion moyenne de systèmes d'érosion (Amoy_2. t/an).....202 |
| A.9 | Calcul 9 : Calcul de perte de carbone par érosion.....203 |
| A.10 | Calcul 10 : Calcul de perte d'azote par érosion.....203 |
| A.11 | Calcul 11 : Calcul de perte de phosphore par érosion.....203 |

A.1.

Calcul 1: Conversion des unités des lectures à l'absorption atomique.

Soit les facteurs de conversions suivants:

$\mu\text{g/mL} = \text{mg/L} = \mu\text{g/g} = \text{mg/kg} = \text{ppm}$, selon que la mesure est dans un milieu solide ou liquide.

Prenons l'exemple de la fiche 2 avec la solution du test 1. Nous avons une lecture d'absorption atomique de 1,076 $\mu\text{g/mL}$ d'Al avec une dilution de 4 dans une solution de volume 100 mL provenant d'une masse de sol de 30 g. Alors, nous utiliserons le calcul suivant :

$$(1.076 \mu\text{g/mL} * 4 * 100\text{mL}) / 30\text{g} = 14.35 \mu\text{g/g} = 14.35 \text{ ppm de Al dans le sol.}$$

A.2.

Calcul 2: Conversion des unités des lectures du phosphore total.

Soit : MP, la masse moléculaire du phosphore MP= 31g/mol

Où : $\mu\text{mol/g} * 1000\text{g/Kg} * 10^{-6} \text{ mol}/\mu\text{mol} * \text{MP} = \text{g de P/Kg de sédiment.}$

Prenons l'exemple de la fiche 2 qui a une lecture de phosphore total de 5,847 $\mu\text{mol/g}$ de sédiments. Alors, nous utiliserons le calcul suivant :

$$5,847 \mu\text{mol/g} * 1000\text{g/Kg} * 10^{-6} \text{ mol}/\mu\text{mol} * 31\text{g/mol} = 0,18 \text{ g de P/Kg de sédiments.}$$

A.3.

Calcul 3: Conversion du carbone total en pourcentage de M.O.

Soit : le facteur de conversion du pourcentage de carbone total en M.O. au Mali selon Breman et al. (1998) : **M.O. = % C / 0,58**

Prenons l'exemple de la fiche 2 qui a une lecture moyenne (sur 2 valeurs) de 0,63 % de C. Alors, nous utiliserons le calcul suivant :

$$\text{M.O.} = 0,63 \% / 0,58 = 1,08 \%$$

Ce facteur de conversion a été vérifié lors du test 2 de destruction de la M.O.

A.4

C.alcul 4: Calcul du facteur L

Pour trouver le facteur L, il faut identifier la pente la plus longue (sans rupture de pente) dans toute la surface combinatoire. Puis, on regarde la longueur minimale.

Soit : Une surface combinatoire S1. Sa longueur maximale est égale à 200 mètres et sa longueur minimale 70 mètres.

Où : $L = \text{médiane}(L_{\min}; L_{\max})$

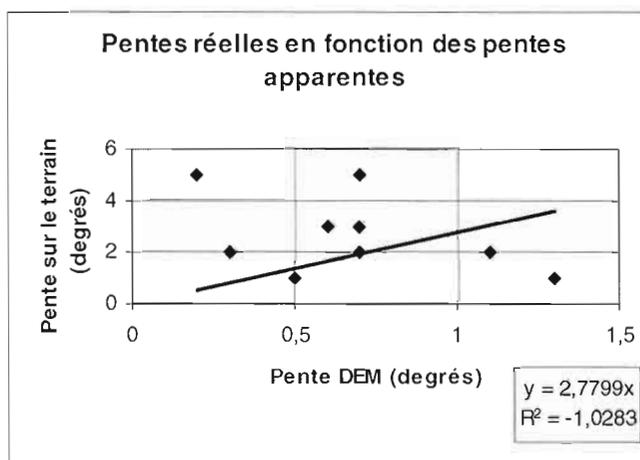
Alors : Facteur $L = \text{médiane}(70; 200) = 135$ mètres

A.5

Calcul 5: Correction des inclinaisons apparentes (DEM) Vs réelles.

La correction des valeurs d'inclinaisons apparentes obtenues par le DEM (NASA, 2005), nous avons fait une corrélation linéaire entre les valeurs du DEM et des mesures de terrains. Les mailles du DEM étant de 90 mètres de côtés, les valeurs d'inclinaisons sont sous estimées quand les pentes sont petites à l'intérieur de cette maille. Par ailleurs, nous trouvons ces valeurs à l'aide de MapInfo avec l'outil d' « analyse par région » de *Vertical Mapper*. Ces valeurs sont le résultat de moyennes d'unités numériques (nombre de mailles dans une région donnée) qui sont elles aussi sous-estimées. Dans le but de faire l'ajustement des inclinaisons apparentes, nous avons fait une corrélation linéaire que nous voyons ci-dessous.

| Valeurs d'inclinaisons de pentes réelles et apparentes | | |
|--|-----------------|-------------|
| no Fiche | % pente terrain | % pente DEM |
| 19 | 1 | 1,3 |
| 20 | 3 | 0,7 |
| 23 | 5 | 0,2 |
| 24 | 2 | 0,3 |
| 25 | 1 | 0,5 |
| 26 | 3 | 0,6 |
| 28 | 1 | 0,5 |
| 31 | 2 | 1,1 |
| 33 | 2 | 0,7 |
| 34 | 5 | 0,7 |



Alors, nous trouvons un coefficient de corrélation R^2 égale à 1,03 avec la fonction :

$y = 2,7799x$. Donc, pour une valeur d'inclinaison du DEM de 0,8 degrés, nous trouvons une inclinaison de pente réelle (après correction) de $y = 2,2$. Cette correction est à notre avis très conservatrice dans certains cas, mais représente très bien la réalité de terrain.

A.6

Calcul 6: Conversion de surfaces (km^2 en ha)

Soit : S1 une surface combinatoire du SE-Ia égale à $2,2 \text{ km}^2$.

Et : 1 ha est égale à $10\,000 \text{ m}^2$; $100\text{m} * 100\text{m}$ est égale à 1 ha ; $100\text{m} = 0,1 \text{ km}$;

$0,1 \text{ km} * 0,1 \text{ km} = 0,01 \text{ km}^2$, alors 1 ha = $0,01 \text{ km}^2$

D'où : $S (\text{km}^2) * 100 = \text{nb. ha}$

Alors : $S1 * 100 = 2,2 \text{ km}^2 * 100 = 220 \text{ ha}$

A.7

Calcul 7: Érosion moyenne de systèmes d'érosion (Amoy_1 . t/ha/an)

Soit : S32 à S36 les surfaces combinatoires du SE-III dont les valeurs d'érosion (A_{S_n} calculées par le logiciel RUSLE2) sont respectivement de 0,14; 47; 0,12; 1,7 et 44.

Où : $\text{Amoy}_1 = (A_{S32} + A_{S33} + A_{S34} + A_{S35} + A_{S36}) / 5$

Alors: $\text{Amoy}_1 = (0,14 + 47 + 0,12 + 1,7 + 44) / 5 = 19 \text{ t/ha/an}$

A.8

Calcul 8: Érosion moyenne de systèmes d'érosion (Amoy_2 . t/an)

Soit : Amoy_1 qui est l'érosion moyenne du SE-III égale à 19 t/ha/an et S32 à S36 les surfaces combinatoires du SE-III qui ont des surfaces (S_n) respectives de 253, 316, 5742, 401 et 988 hectares. Donc, S_T est la surface total du SE-III égale à 7700 ha.

Où : $\text{Amoy}_2 = \text{Amoy}_1 * S_T$

Alors : $\text{Amoy}_2 = 19 \text{ t/ha/an} * 7700 \text{ ha} = 143\,155 \text{ t/ha}$

A.9

Calcul 9: Calcul de perte de carbone par érosion

Soit : % de C (total) de 0,46 pour un profil type de PL10 pg et une érosion de 1,7 t/ha/an.

Où : $A \text{ t/ha/an} * \%C/100\% * 1000 \text{ Kg/t} = \text{perte de C (Kg/ha/an)}$.

Alors : Perte de Carbone (total) par érosion = $1,7 \text{ t/ha/an} * 0,46\%/100\% * 1000 \text{ Kg/t}$
 $= 8 \text{ Kg/ha/an}$.

A.10

Calcul 10: Calcul de perte d'azote par érosion

Soit : % de N (total) de 0,05 pour un profil type de PL10 pg et une érosion de 1,7 t/ha/an.

Où : $A \text{ t/ha/an} * \%N/100\% * 1000 \text{ Kg/t} = \text{perte de N (Kg/ha/an)}$.

Alors : Perte d'azote (total) par érosion = $1,7 \text{ t/ha/an} * 0,05\%/100\% * 1000 \text{ Kg/t}$
 $= 0,87 \text{ Kg/ha/an}$.

A.11

Calcul 11: Calcul de perte de phosphore par érosion

Soit : 0,1 g de P (total) par Kg de sol pour un profil type de PL10 pg et une érosion de 1,7 t/ha/an et selon Breman et *al.* (1998) un facteur d'enrichissement de 1,25 (accumulation en surface).

Où : $A \text{ t/ha/an} * 1000 \text{ Kg/t} * \text{nb. g de P /Kg} * 1 \text{ Kg/1000g} * 1,25 = \text{perte de P (Kg/ha/an)}$.

Alors : Perte de Phosphore (total) par érosion = $1,7 \text{ t/ha/an} * 1000 \text{ Kg/t} * 0,1\text{g/Kg} * 1 \text{ Kg/1000g} * 1,25 = 0,2 \text{ Kg/ha/an}$.

APPENDICE B

(PLANTES CULTURALES) TOURE ET AL. 2000

Mil (*Pennisetum glaucum* L)

Le mil, appelé aussi mil à chandelle ou mil pénicillaire, est une culture de grande importance dans les zones soudano-sahéliennes et prédésertiques d'Afrique. Les zones préférentielles de la culture du mil sont le Centre-Nord (N-O et N-E), dominé par un climat sahélien à saharien et des terres sableuses ou sablo-limoneuses. Ces mils sont du type hâtif peu productif (75 à 85 jours et 500 à 800 kg/ha). De nombreuses missions de collecte, organisées en 1975 au Mali en collaboration avec divers organismes nationaux et internationaux (ORSTOM, ICRISAT, etc.), ont permis de constituer progressivement la collection malienne de mil. La plupart des variétés n'ont pas survécu aux mauvaises conditions de conservation qui constituent une contrainte majeure pour les ressources phytogénétiques au Mali. Heureusement que le double de cette collection est conservé ailleurs : ORSTOM, ICRISAT, collection mondiale au Canada.

Le sorgho (*Sorghum bicolor* Moench)

Les sorghos appartiennent aux Andropogonées et ne comprennent qu'un seul genre : *Sorghum* qui se divise en plusieurs espèces. Sur les cinq principales espèces de sorgho déterminées par Harlan M. (Crop and Man), deux ont des foyers de diversité au Mali : *Guinea* et *Durra*. Les prospections et collectes réalisées ont permis de constituer la collection malienne de sorgho. Plus de 1 200 écotypes de sorgho ont ainsi été collectés. Ce matériel a été évalué et utilisé dans diverses localités. Les différentes espèces de sorgho représentées dans la collection sont *Guinea* (70%) avec ses deux principaux groupes : kéninké (54%), kendé (16%), *durra* (17%), *caudatum* (moins de 1%). Il y a un dernier groupe de sorgho de formes intermédiaires (13% de la collection).

Dans les régions de Kayes, de Ségou et de Mopti, on rencontre un type de sorgho appartenant au groupe *membranaceum*, connu sous le nom “ keniké ” ou “ bimbiri ”. Les sorghos maliens de *guineense* ont un cycle de maturité variable pouvant atteindre plus de 150 jours pour les photosensibles et tardives de la zone sud du pays et 85 jours pour les “ kéniké télini ” de cycle relativement précoce. Ces variétés sont retenues comme des variétés hâtives par les cultivateurs des zones de Koutiala et de Ségou. Il existe également un petit groupe de sorgho *guineense* cultivé au Mali, le Guinense margariteferum, connu localement sous le nom de “ kendé ”. Ces variétés sont caractérisées par leur grain dur et petit, grain souvent utilisé pour faire un plat ressemblant au riz “ le Niènyen kini ”. Dans la zone sahélienne des régions de Kayes et de Ségou du Mali, le *durra* est le plus cultivée. Il est connu sous plusieurs appellations dont la plus courante est “ Gadiaba ”. Les sorghos gadiaba ont des plantules vigoureuses et bien développées et possèdent cette capacité de rester en état de dormance durant les périodes sèches et chaudes au cours de son développement végétatif et d'utiliser l'humidité résiduelle du sol au stade de remplissage du grain en l'absence de toute pluie. Quand il pleut beaucoup au cours du remplissage, on obtient un grain de qualité médiocre. Dans les régions de Kayes, Ségou et Mopti, il existe du sorgho appartenant au groupe *membranaceum*, connue sous le nom de “ Nio-fionto ” (sorgho aveugle) en milieu paysan à cause de ses longues glumes couvrant complètement son gros grain. Les panicules sont compactes et légèrement courbées.

Le riz (*Oryza sp*)

Du point de vue génétique, on distingue deux types cultivées (*Oryza glaberrima* et *Oryza sativa*) et deux variétés sauvages : *Oryza longistaminata* (diga) et *Oryza barthii* (sego). 42 Le Delta Central du Niger constitue, selon de nombreux auteurs, un important foyer de diversité et même un centre de domestication de l'espèce de riz africain (*Oryza glaberrima steud*). Différentes variétés de riz *Oryza glaberrima* et riz *Oryza sativa* ont fait l'objet de collecte, d'évaluation et d'utilisation pour la recherche et la production : 396 variétés collectées dont 215 collections de l'espèce *Oryza glaberrima* et 181 variétés de riz *Oryza sativa*. En 1987, 105 nouvelles accessions ont été introduites de l'IRRI (riz flottant et d'immersion profonde). L'évaluation de ces accessions a permis d'identifier certaines variétés qui ont été inscrites au

catalogue officiel des espèces et variétés (IER, 1986). Actuellement la station de Kogoni dispose de 2218 accessions (espèce *sativa L.* : groupe indica, japonica et javanica). La plupart des matériels proviennent de l'ADRAO, de l'IRRI, de l'IRAT/CIRAD, de l'IITA.

Le maïs (*Zea mays*)

Le maïs est originaire d'Amérique tropicale. Les variétés sont classées suivant la durée de leur cycle végétatif d'une part, les caractères de leurs grains d'autre part (couleur, forme, texture, etc.). La collection malienne de maïs comporte des variétés locales ou introduites de cycle précoce ou tardif, avec certaines variétés résistantes aux maladies et très productives : dix variétés ont été identifiées comme résistantes à la striure. A partir des recherches menées sur l'amélioration du maïs au Mali, une liste de variétés performantes a été inscrite dans le catalogue officiel des variétés.

Le fonio (*Digitaria exilis*)

Le fonio a toujours été considéré au Mali comme une culture secondaire, bien qu'il joue un grand rôle sur le plan diététique. Il s'accommode de conditions de culture peu favorables (sols pauvres, sécheresse, etc.). La recherche malienne dispose d'une collection qui a été enrichie par du matériel en provenance de la Guinée. Les plus performantes ont été identifiées et inscrites au catalogue officiel des variétés. Les cultures oléagineuses et protéagineuses.

L'arachide (*Arachis hypogea*)

La collection disponible est constituée d'un nombre important de variétés de types spanish, valencia, virginia introduites et des accessions locales qui ont été collectées 43 lors de différentes missions de prospection. Les différents travaux réalisés sur cette culture ont permis de caractériser des écotypes et variétés d'arachide tolérantes à la sécheresse, d'identifier des variétés à cycle précoce, intermédiaire et tardif et des variétés résistantes ou tolérantes aux maladies et insectes.

Le niébé (*Vigna unguiculata*) et le voandzou (*Voandzea subterranea*)

Le niébé et le voandzou sont cultivés de la zone sahélienne à la zone soudano-guinéenne.

Outre la production de graines, le voandzou et surtout le niébé fournissent des fanes qui sont utilisées comme fourrage pour les animaux.

APPENDICE C

FICHES D'ÉCHANTILLONNAGES 2 À 34

Fiche 2

| | |
|--|--|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | Village de Bokon |
| Date : | 25-Oct-04 |
| Unité cartographique : | TH3 |
| Horizon échantillonné : | A |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrures |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 90 |
| - Abondance (nb)/surface | Peu nombreuses (1-3) |
| - Dimensions (mm) | Micro-racines (< 0.075) à Grossières (>5) |
| - Orientation | Sans orientation |
| Porosité de l'horizon : | Peu poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Très collant |
| - Sol Humide | Friable |
| - Sol sec | Peu dur |
| Texture selon USDA : | Silty clay |
| % Argile | 45 |
| % Limon | 47 |
| % Sable | 8 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 5.847 |
| Rapport C/N | 12.80296 |
| Marbrures (taches) : | Hue 7.5 YR 5/8, Très nombreuses (>20), Dimension Moyenne (5-15) |
| Structure primaire du sol : | |
| - Grade : | Forte |
| - Classe (grosueur) : | Très fine à Très Grossière |
| - Sous-Type : | Polyédrique subangulaire |
| - Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Matrice : | naturel humide/oxydé |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluvio-lacustre |
| Modificateur lithologique : | non déterminé |
| Utilisation actuelle : | Agricole (jachère), Pâturage (délaissé), Terres humides. |
| Pratiques conservatoires : | aucunes |
| Formes de terrains : | Bassin |
| Processus modificateur : | aucune |
| Type de pente : | Simple |
| Classe de pente : | 0 – 1 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Milieu de pente du bassin versant du Niger, mais c'est dans un bassin. |
| Exposition : | 20°Nord |
| Érosion hydrique : | aucune |
| Ravinement : | aucune |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Pierrosité : | Non (<0.01%, >30 m) |

| | |
|------------------------------|--|
| Température du sol (°C) : | Ext: 40, à 10 cm = 31, à 60 =29 |
| Couleur du sol : | 10YR 7/2 |
| Couverture végétale : | Herbes, Djou (indicateur de milieu hydromorphe), balanzan, arbustre=Goudjé et grama. |
| Observations particulières : | Couche arable = plus petit que 1 mm. Altitude = 269 m |

Fiche 3

| | |
|--|---|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | Champs de Bakary Keita de Bokon |
| Date : | 25-Oct-04 |
| Unité cartographique : | PL11 d'érosion |
| Horizon échantillonné : | A et A1 |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Diffuse |
| - Forme | Ondulée |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrures et Concré, nodules, déjections |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 100 |
| - Abondance (nb)/surface | Peu nombreuses (1-3) |
| - Dimensions (mm) | Très fines (0.075 <_>1) |
| - Orientation | Horizontales |
| Porosité de l'horizon : | Assez poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Peu collant |
| - Sol Humide | Friable |
| - Sol sec | Dur |
| Texture selon USDA : | Sandy loam |
| % Argile | 12 |
| % Limon | 12 |
| % Sable | 62 |
| % Gravier | 14 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.494 |
| Rapport C/N | 6.21 |
| Marbrures (taches) : | -- |
| Structure primaire du sol : | |
| - Grade : | Modérée à forte |
| - Classe (grosseur) : | Moyenne à grossière |
| - Sous-Type : | Polyédrique subangulaire, |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Matrice : | Endo-agrégat sec |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale |
| Modificateur lithologique : | non déterminé, mais présence d'argile en horizon B. |
| Utilisation actuelle : | Agricole (jachère) |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Vallonné |
| Processus modificateur : | Érodé et Ravinement |
| Type de pente : | Complexe, convexe |
| Classe de pente : | 3 à 5 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Bas de pente |
| Exposition : | 200° Nord |
| Érosion hydrique : | Grave (> 75%) |
| Ravinement : | Longueur=200m, l=3-5 m, 2x ha |
| Érosion éolienne : | aucun |
| Pierrosité : | Non (<0.01%, >30 m) |

| | |
|------------------------------|--|
| Température du sol (°C) : | Ext: 44, à 45cm =34 |
| Couleur du sol: | 10YR 7/3 |
| Couverture végétale : | Karité, manguier, baobab, rôniers (peu), herbes. |
| Observations particulières : | Érosion linéaire, Plaine limono-sableuse sol ferrugineux lessivé à concrétion, beaucoup de concrétions. Ensablement dans le ravin, Altitude 256 m. |

Fiche 4

| | |
|--|---|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | Village de Bokon |
| Date : | 25-Oct-04 |
| Unité cartographique : | PL10 |
| Horizon échantillonné : | A et A1 (mélange) |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Nette |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrures et Concrétions |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 100 |
| - Abondance (nb)/surface | Très peu nombreuses (<1) |
| - Dimensions (mm) | Micro-racines (< 0.075) à Grossières (>5) |
| - Orientation | Sans orientation |
| Porosité de l'horizon : | Assez poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Collant |
| - Sol Humide | Friable |
| - Sol sec | Peu dur |
| Texture selon USDA : | Sandy loam |
| % Argile | 17 |
| % Limon | 12 |
| % Sable | 71 |
| % Gravier | |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.766 |
| Rapport C/N | 8.64 |
| Marbrures (taches) : | Peu nombreuses (< 2), D. Moyenne (5-15), fer oxydé, rouille |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Modéré à forte |
| Classe (grosseur) : | Fine à grossière |
| Sous-Type : | Granulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Matrice : | Endo-agrégat humide |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviatile |
| Modificateur lithologique : | non déterminé |
| Utilisation actuelle : | Culture |
| Pratiques conservatoires : | aucun |
| Formes de terrains : | Plat et plateau |
| Processus modificateur : | aucun |
| Type de pente : | Simple |
| Classe de pente : | 0 - 1 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Plateau |
| Exposition : | 320° Nord |
| Érosion hydrique : | aucun |
| Ravinement : | aucun |
| Érosion éolienne : | aucun |
| Pierrosité : | Non (<0.01%, >30 m) |

| | |
|------------------------------|---|
| Température du sol (°C): | Ext: 44, à 10 cm=40, à 60=35 |
| Couleur du sol: | 7,5 YR 6/8 |
| Couverture végétale : | Culture de mil. Karité et Baobab. |
| Observations particulières : | Plaine limono-sableuse, sol ferrugineux peu lessivé à taches et concrétions. Nous sommes sur un plateau (voir dessin d'échantillonnage). On remarque que c'est la même unité que la fiche 3, mais avec des variations: en texture (+fine), en couleur (+rouge), en concrétions (- de concrétions). |

Fiche 5-6 O

| | |
|--|--|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Soya |
| Date : | 26-Oct-04 |
| Unité cartographique : | TH3 |
| Horizon échantillonné : | O |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Diffuse |
| - Forme | Irrégulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrures |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 20 |
| - Abondance (nb)/surface | Nombreuses (4-14) |
| - Dimensions (mm) | Micro-racines (< 0.075) et Grossières (>5) |
| - Orientation | Horizontales |
| Porosité de l'horizon : | Très poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Très collant |
| - Sol Humide | Meuble |
| - Sol sec | Peu dur |
| Texture selon USDA : | Clay loam |
| % Argile | 34 |
| % Limon | 33 |
| % Sable | 33 |
| % Gravier | 0.12 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.127 |
| Rapport C/N | 16.31 |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Modéré à forte |
| Classe (grosseur) : | Fine et Très Grossière |
| Sous-Type : | Polyédrique subangulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Matrice : | écrasé sec |
| Accumulation ou mode de déposition : | Organique |
| Modificateur lithologique : | non déterminé |
| Utilisation actuelle : | Terres humides, culture et Pâturage (délaissé) |
| Pratiques conservatoires : | aucun |
| Formes de terrains : | Bassin |
| Processus modificateur : | aucun |
| Type de pente : | Simple |
| Classe de pente : | 0 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Dépression |
| Exposition : | 280°N |
| Érosion hydrique : | aucun |

| | |
|------------------------------|--|
| Ravinement : | aucun |
| Érosion éolienne : | aucun |
| Pierrosité : | aucun |
| Température du sol (°C): | Ext : 43, à 10 cm=31, à 65=30 |
| Couleur du sol: | 7.5 Y 4/1 |
| Couverture végétale : | Épineux, Djou, zizifuce, Zadjè, arbres fourragers, herbes= n'golo. (culture de riz à 200 m) |
| Observations particulières : | Zone très boisé et à certains endroit ce n'est pas exploité depuis la colonisation. La fiche 5 est l'horizon O et la fiche 6 l'horizon A. La zone est dans la plaine inondable. |

Fiche 5-6 A

| | |
|--------------------------------------|--|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Soya |
| Date : | 26-Oct-04 |
| Unité cartographique : | TH3 |
| Horizon échantillonné : | A |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Diffuse |
| - Forme | Irrégulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrures (réduction) |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 90 |
| - Abondance (nb)/surface | Nombreuses (4-14) |
| - Dimensions (mm) | Micro-racines (< 0.075) et Grossières (>5) |
| - Orientation | Horizontales |
| Porosité de l'horizon : | Peu poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Très collant |
| - Sol Humide | Très ferme |
| - Sol sec | Très dur |
| Texture selon USDA : | Clay |
| % Argile | 42 |
| % Limon | 22 |
| % Sable | 34 |
| % Gravier | 2 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.321 |
| Rapport C/N | 10.07 |
| Marbrures (taches) : | Très nombreuses (>20), Moyenne (5-15) et 7.5YR 5/8 |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Faible à modéré |
| Classe (grosseur) : | Moyenne à grossière |
| Sous-Type : | Polyédrique angulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Matrice : | Naturel humide/réduit |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluvio-lacustre |
| Modificateur lithologique : | non déterminé |
| Modificateur lithologique : | non déterminé |
| Utilisation actuelle : | Terres humides, culture et Pâturage (délaissé) |
| Pratiques conservatoires : | aucun |
| Formes de terrains : | Bassin |
| Processus modificateur : | aucun |
| Type de pente : | simple |

| | |
|--|----------------------|
| Classe de pente : | 0 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Dépression |
| Exposition : | 280°N |
| Érosion hydrique : | aucun |
| Ravinement : | aucun |
| Érosion éolienne : | aucun |
| Pierrosité : | aucun |
| Température du sol : | voir fiche 5-6 O |
| Couleur du sol : | 10 YR 6/4 |
| Couverture végétale : | même que fiche 5-6 O |
| Observations particulières : | même que fiche 5-6 O |

Fiche 7

| | |
|--------------------------------------|--|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Soya |
| Date : | 26-Oct-04 |
| Unité cartographique : | DA5 |
| Horizon échantillonné : | O, A et B (mêlé), mais les description sont seulement en référence à l'horizon A (pour autre information voir l'original de terrain) |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Graduelle |
| - Forme | Irrégulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Concrétions |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 68 |
| - Abondance (nb)/surface | Peu nombreuses (1-3) |
| - Dimensions (mm) | Fines (1-2) |
| - Orientation | Sans orientation |
| Porosité de l'horizon : | Très poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Non collant |
| - Sol Humide | Très friable |
| - Sol sec | Peu dur |
| Texture selon USDA : | Loamy sand |
| % Argile | 8 |
| % Limon | 9 |
| % Sable | 83 |
| % Gravier | 0.24 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 3.110 |
| Rapport C/N | 7.35 |
| Marbrures (concrétions) : | 5YR 2/4, Nombreuses (2-20), Grandes (>15) |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Faible |
| Classe (grosseur) : | Grossière |
| Sous-Type : | Granulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Matrice : | écrasé sec |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale |
| Modificateur lithologique : | Cuirasse |
| Utilisation actuelle : | Culture |
| Pratiques conservatoires : | Ajout d'argile et de fumier sur le terrain sableux |
| Formes de terrains : | Incliné |
| Processus modificateur : | Ravinement et Érodé |
| Type de pente : | Simple |

| | |
|--|---|
| Classe de pente : | 1 à 3 et 6 à 9 dans les ravins. |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Milieu de pente |
| Exposition : | 143°Nord |
| Érosion hydrique : | modérée (25 à 75 %) à grave (> 75%) |
| Ravinement : | L=3 de 300m, l=2,5m, Prof=1m |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Pierrosité : | aucune, |
| Température du sol (°C): | Ext=38, à 10cm=33, à 40 cm=30, à 100 cm=30 |
| Couleur du sol: | 7,5 YR 6/8 |
| Couverture végétale : | Culture de mil, Karité, balanzan, rônier, Baobab |
| Observations particulières : | L'horizon O: plus sableux que limoneux et très peu de concrétions. Vers l'horizon B : plus de limon et plus de concrétions. 9h40 am |

Fiche 8

| | |
|--------------------------------------|---|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Soya |
| Date : | 26-Oct-04 |
| Unité cartographique : | DA5 sableux |
| Horizon échantillonné : | A |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Un peu lités |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 90 |
| - Abondance (nb)/surface | Nombreuses (4-14) |
| - Dimensions (mm) | Fines (1-2) |
| - Orientation | Horizontales |
| Porosité de l'horizon : | Très poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Non collant |
| - Sol Humide | Meuble |
| - Sol sec | Meuble |
| Texture selon USDA : | Loamy sand |
| % Argile | 8 |
| % Limon | 7 |
| % Sable | 85 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.031 |
| Rapport C/N | 9.19 |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Sans structure |
| Modificateur sous-type : | Laminée |
| Matrice : | frotté sec |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluvio-éolien ou fluv ou éolien |
| Utilisation actuelle : | Culture |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Plateau, incliné |
| Processus modificateur : | érodé |
| Type de pente : | Simple |
| Exposition : | 324° Nord |
| Érosion hydrique : | milieu de pente du bassin versant du niger. |
| Ravinement : | aucun |
| Érosion éolienne : | aucun |
| Pierrosité : | aucun |

| | |
|------------------------------|--|
| Température du sol (°C): | Ext =40, à 20cm = 32, à 40cm = 32, à 90 cm = 31 |
| Couleur du sol : | 10YR 5/6 |
| Couverture végétale : | Culture de petit mil. Karité, baobab, zizifuce. |
| Observations particulières : | Dunes érodées massives? 11h41 am, la photo 25 est du mil en paquet pour le faire sécher. Échantillon pris en haut de la pente près d'un plateau. |

Fiche 10

| | |
|--|--|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Vers Siakabougou |
| Date : | 28-Oct-04 |
| Unité cartographique : | TC3 |
| Horizon échantillonné : | Ah/schiste : Sol peu évolué (régosolite) |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Graduelle |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Fragments grossiers |
| Porosité de l'horizon : | Très poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Non collant |
| - Sol Humide | Meuble |
| - Sol sec | Meuble |
| Texture selon USDA : | Clay (49-38-13 sans le gravier) |
| % Argile | 18 |
| % Limon | 14 |
| % Sable | 6 |
| % Gravier | 62 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.024 |
| Rapport C/N | 14.46 |
| Accumulation ou mode de déposition : | Résiduel (altération du schiste) |
| Modificateur lithologique : | Schiste |
| Utilisation actuelle : | Terrain improductif, caillouteux |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Glacis |
| Processus modificateur : | Érodé |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Haute de pente |
| Érosion hydrique : | légère (25 %) |
| Pierrosité : | Excessivement (> 50%, < 0.1 m) |
| Couleur du sol : | 10YR 7/3 |
| Couverture végétale : | Savanne arbustive à épineux |

Fiche 11-12 HA1

| | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Vers basydiallabougou de Kamba |
| Date : | 06-Nov-04 |
| Unité cartographique : | TC3 |
| Horizon échantillonné : | A1 |
| Limite de l'horizon : | Graduelle |
| - Netteté | Régulière |
| - Forme | |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Fragments grossiers |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 48 |

| | |
|--|--|
| - Abondance (nb)/surface | Peu nombreuses (1-3) |
| - Dimensions (mm) | Fines (1-2) |
| - Orientation | Horizontales |
| Porosité de l'horizon : | Assez poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Peu collant |
| - Sol Humide | Meuble |
| - Sol sec | Meuble |
| Texture selon USDA : | Sandy loam (9-30-61 sans le gravier) |
| % Argile | 5 |
| % Limon | 16 |
| % Sable | 33 |
| % Gravier | 46 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.346 |
| Rapport C/N | 11.83 |
| Concrétions: | Nombreuses (2-20), Petites (<5) à Moyenne (5-15) et 2, 5 YR 4/4 à 4/8 |
| Matrice : | sèche |
| Accumulation ou mode de déposition : | Saprolité en oxydes de fer |
| Modificateur lithologique : | Cuirasse |
| Utilisation actuelle : | Pâturage (délaissé) et jachère |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Cuirasse et plateau |
| Processus modificateur : | Érodé |
| Type de pente : | Simple |
| Classe de pente : | 0 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Plateau |
| Exposition : | 310 Nord |
| Érosion hydrique : | Légère (25 %) |
| Température du sol (°C): | Ext =39, à 32 cm = 37 |
| Couleur du sol : | 10YR 5/3 |
| Couverture végétale : | Arbustes et herbes |
| Observations particulières : | C'est un sol gravillonnaire de haut de pente (versant gravillonnaire) sur cuirasse latéritique. La photo indique : herbe /A1 |

Fiche 11-12HA2

| | |
|-----------------------------------|--|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Vers basydiallabougou de Kamba |
| Date : | 06-Nov-04 |
| Unité cartographique : | TC3 |
| Horizon échantillonné : | A2 |
| Texture selon USDA : | Sandy clay loam (24-26-50 sans le gravier) |
| % Argile | 8 |
| % Limon | 9 |
| % Sable | 18 |
| % Gravier | 65 |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.144 |
| Rapport C/N | 11.01 |
| Observations particulières : | C'est comme la fiche précédente. SUR la photo le carton indique la limite de A2/C. On s'approche de la cuirasse et c'est donc pour cela que le % de gravier augmente de A1 vers A2 |

Fiche 13 HA

| | |
|--|--|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Basydiallabougou |
| Date : | 07-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL 11 |
| Horizon échantillonné : | A =0 à 44 cm |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Nette |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrures |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 44 |
| - Abondance (nb)/surface | Très peu nombreuses (<1) |
| - Dimensions (mm) | Très fines (0.075 <_>1) |
| - Orientation | Sans orientation |
| Porosité de l'horizon : | Peu poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Collant |
| - Sol Humide | Friable |
| - Sol sec | Dur |
| Texture selon USDA : | Sandy clay loam |
| % Argile | 24 |
| % Limon | 12 |
| % Sable | 64 |
| % Gravier | 0.44 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.739 |
| Rapport C/N | 8.78 |
| Marbrures (concrétions) : | Très nombreuses (>20), Moyenne (5-15), 7.5YR 6/8 |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Faible à modéré |
| Classe (grosseur) : | Moyenne à grossière |
| Sous-Type : | Polyédrique angulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Matrice : | -- |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale et Saprolité |
| Modificateur lithologique : | cuirasse |
| Utilisation actuelle : | Pâturage (délaissé) |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Cuirasse |
| Processus modificateur : | Érodé et Ravinement |
| Type de pente : | Complexe |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Pied de pente |
| Exposition : | 172 Nord |
| Érosion hydrique : | Grave (> 75%) |
| Ravinement : | L=100m, l=2m, prof=l |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Pierrosité : | Faiblement (0.01 à 0.1%, 10 - 30 m) |
| Rocosité : | Modérément (10 à 20%, 10 - 25 m) |
| Température du sol (oC): | Ext = 38, à 20cm = 31, à 58cm = 29, à 100cm = 29 |
| Couleur du sol : | 2,5 YR 7/4 à 7/8 |
| Couverture végétale : | Savane arbustive (brousse tigrée) |
| Observations particulières : | La photo 1 indique la proximité des sols PL11 ou pl10 des sols T14 alluviaux. De plus, elle montre le décapage du PL à gauche (on voit la cuirasse) et ce qui reste de sol à droite. On peut aussi noter la présence d'arbre indicateur le djou. Le sac montre |

l'endroit de l'échantillonnage. La photo 2 montre la limite de A/B et l'absence de végétation. La photo 3 montre la variation latérale entre la cuirasse et le PL.

Fiche 13 HB

| | |
|--|--|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Basydiallabougou |
| Date : | 07-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL11 |
| Horizon échantillonné : | B |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Nette |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrures |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 44 à 56 |
| - Abondance (nb)/surface | Très peu nombreuses (<1) |
| - Dimensions (mm) | Fines (1-2) |
| - Orientation | Sans orientation |
| Porosité de l'horizon : | Peu poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Très collant |
| - Sol Humide | Ferme |
| - Sol sec | Très dur |
| Texture selon USDA : | Sandy loam (19-13-68) |
| % Argile | 10 |
| % Limon | 7 |
| % Sable | 35 |
| % Gravier | 48 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 3.161 |
| Rapport C/N | 5.56 |
| Marbrures (concrétions) : | Très nombreuses (>20), Moyenne (5-15), 7.5 YR 5/8 humide |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Très faible |
| Classe (grosseur) : | Très fine et Fine |
| Sous-Type : | Granulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale et Saprolite |
| Modificateur lithologique : | cuirasse |
| Utilisation actuelle : | Pâturage (délaissé) |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Cuirasse |
| Processus modificateur : | Érodé et Ravinement |
| Type de pente : | Complexe |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Pied de pente |
| Exposition : | 172° Nord |
| Érosion hydrique : | grave (> 75%) |
| Ravinement : | L=100m, l=2m, prof=1 |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Pierrosité : | Très (3-15%, l à 2 m) |
| Rocosité : | Modérément (10 à 20%, 10 - 25 m) |
| Température du sol (°C): | Comme Fiche 13 HA |
| Couleur du sol : | 2,5 YR 7/4 à 7/8 |
| Couverture végétale : | Savane arbustive (brousse tigrée) |

Observations particulières :

La photo 1 et 2 montre le profil complet c'est-à-dire A/B/C du sol ferrugineux. Sur la photo 3 le marteau indique la limite de A/B et l'augmentation de concrétions

Fiche 14

| | |
|--|--|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Basydiallabougou |
| Date : | 07-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 |
| Horizon échantillonné : | A (0-40cm); échantillonnage à 15 et 30 cm |
| Texture selon USDA : | Sandy loam |
| % Argile | 15 |
| % Limon | 12 |
| % Sable | 73 |
| % Gravier | 0.2 |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.076 |
| Rapport C/N | 9.16 |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluvatile |
| Utilisation actuelle : | Champ Mil |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Type de pente : | Simple |
| Classe de pente : | 1 à 3 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Milieu de pente |
| Érosion hydrique : | Légère (25 %) |
| Ravinement : | peu |
| Érosion éolienne : | aucun |
| Pierrosité : | Non (<0.01%, >30 m) |
| Couleur du sol : | 7.5YR 5/8 |
| Couverture végétale : | Culture de mil. |
| Observations particulières : | À utiliser pour compare la fertilité par rapport à la fiche 13 de ravinement. Plus on creuse plus le sol est brun-orangé. |

Fiche 15 HA

| | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Djidian |
| Date : | 09-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 |
| Horizon échantillonné : | A |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Graduelle |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | aucune |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 35 |
| - Abondance (nb)/surface | Peu nombreuses (1-3) |
| - Dimensions (mm) | Fines (1-2) |
| - Orientation | Obliques |
| Porosité de l'horizon : | Assez poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Peu collant |
| - Sol Humide | Très friable |
| - Sol sec | Tendre |
| Texture selon USDA : | Loamy sand sans gravier (9-7-84) |
| % Argile | 5 |

| | |
|--|---|
| % Limon | 4 |
| % Sable | 47 |
| % Gravier | 44 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.131 |
| Rapport C/N | 7.85 |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Faible |
| Classe (grosseur) : | Fine à moyenne |
| Sous-Type : | Polyédrique subangulaire à granulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale |
| Modificateur lithologique : | Cuirasse |
| Utilisation actuelle : | Champ mil |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Incliné |
| Processus modificateur : | Érodé et ensablement |
| Type de pente : | Complexe |
| Classe de pente : | 1 à 2 degrés |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Haute de pente |
| Érosion hydrique : | Légère (25 %) |
| Ravinement : | peu |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Pierrosité : | Non (<0.01%, >30 m) |
| Température du sol (°C): | Ext = 40, à 10cm = 34, à 60cm = 31, à 90cm = 32 |
| Couleur du sol : | 7,5YR 4/6 |
| Couverture végétale : | Culture de mil. Balanzan, Baobab, Karité, |
| Observations particulières : | Augmentation du % d'argile avec la profondeur |

Fiche 15 HB

| | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Djidian |
| Date : | 09-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 |
| Horizon échantillonné : | B |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Graduelle |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | aucune |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | Supérieur à 35 |
| - Abondance (nb)/surface | Peu nombreuses (1-3) |
| - Dimensions (mm) | Très fines (0.075 <_>1) |
| - Orientation | Obliques |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Non collant |
| - Sol Humide | Friable |
| - Sol sec | Peu dur |
| Texture selon USDA : | Sand |
| % Argile | 4 |
| % Limon | 8 |
| % Sable | 88 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.499 |

| | |
|--|---|
| Rapport C/N | 9.72 |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Faible |
| Classe (grosseur) : | Moyenne à grossière |
| Sous-Type : | Polyédrique subangulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluvatile |
| Modificateur lithologique : | cuirasse |
| Utilisation actuelle : | Champ mil |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Incliné |
| Processus modificateur : | Érodé et ensablement |
| Type de pente : | Complexe |
| Classe de pente : | 1 à 2 degrés |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Haute de pente |
| Érosion hydrique : | légère (25 %) |
| Ravinement : | peu |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Pierrosité : | Non (<0.01%, >30 m) |
| Température du sol : | Comme Fiche 15HA |
| Couleur du sol : | 7,5YR 5/8 |
| Couverture végétale : | Culture de mil. Balanzan, Baobab, Karité, |
| Observations particulières : | Augmentation du % d'argile avec la profondeur |

Fiche 16.1

| | |
|--|---|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Boidié |
| Date : | 10-Nov-04 |
| Unité cartographique : | Ensablement sur TH3 |
| Horizon échantillonné : | Ensablement d'érosion de cette année |
| Texture selon USDA : | Sand |
| % Argile | 2 |
| % Limon | 4 |
| % Sable | 94 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 0.845 |
| Rapport C/N | 4.80 |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluvio-lacustre |
| Utilisation actuelle : | Culture |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Bassin |
| Processus modificateur : | Biseauté |
| Type de pente : | Simple |
| Classe de pente : | 1 à 3 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Dépression, mais en amont des sols hydromorphe. |
| Exposition : | 150 Nord |
| Érosion hydrique : | Modérée (25 à 75 %) |
| Ravinement : | Ensablement |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Pierrosité : | non |
| Température du sol (°C): | Ext = 34, à 17cm = 29, à 25cm = 30 |
| Couleur du sol : | 5 YR 6/8 |
| Couverture végétale : | Sorgho et melon d'eau |
| Observations particulières : | C'est peut-être un Delta-fluvio-lacustre ou bien une ancienne dune remaniée. De 0 à 15 cm c'est un sable meuble. De 15 à 20 |

cm A1=sables à interlits. De 20 à 43 cm argile TH3. Les mesures d'écoulement dans les sables à interlits est de 40 de direction 70o Nord. Prise à 9h15 am.

Fiche 16.2

| | |
|--|---|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobankan |
| Village : | Boidié |
| Date : | 10-Nov-04 |
| Unité cartographique : | Ensablement sur TH3 |
| Horizon échantillonné : | A1 |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Nette |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrures, Films argileux et interlits |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 20 |
| - Abondance (nb)/surface | Peu nombreuses (1-3) |
| - Dimensions (mm) | Fines (1-2) |
| - Orientation | Horizontales |
| Porosité de l'horizon : | Très poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Non collant |
| - Sol Humide | Meuble |
| - Sol sec | Tendre |
| Texture selon USDA : | Loamy sand |
| % Argile | 6 |
| % Limon | 12 |
| % Sable | 82 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.794 |
| Rapport C/N | 10.00 |
| Marbrures (taches) : | Nombreuses (2-20), Petites (<5), Contraste faible |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Très faible |
| Classe (grosseur) : | Fine à moyenne |
| Sous-Type : | Polyédrique angulaire |
| Modificateur sous-type : | En lits et Laminée |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluvio-lacustre |
| Utilisation actuelle : | Culture |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Bassin |
| Processus modificateur : | Biseauté |
| Type de pente : | Simple |
| Classe de pente : | 1 à 3 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Dépression, mais en amont des sols hydromorphe. |
| Exposition : | 150 Nord |
| Érosion hydrique : | Modérée (25 à 75 %) |
| Ravinement : | Ensablement |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Pierrosité : | non |
| Température du sol (°C): | Comme 16.1 |
| Couleur du sol : | 5 YR 8/4 |
| Couverture végétale : | Sorgho et melon d'eau |
| Observations particulières : | C'est peut-être un Delta-fluvio-lacustre ou bien une ancienne dune remaniée. De 0 à 15 cm c'est un sable meuble. De 15 à 20 |

cm A1=sables à interlits. De 20 à 43 cm argile TH3. Les mesures d'écoulement dans les sables à interlits est de 40 de direction 70o Nord. Prise à 9h15 am. Dans les photos ci-dessous on peut remarquer les interlits et la limite entre les horizons A1 (plus clair) et A2 (gris)

Fiche 16.3

| | |
|--|---|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobankan |
| Village : | Boidié |
| Date : | 10-Nov-04 |
| Unité cartographique : | TH3 |
| Horizon échantillonné : | A2 ou B |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Nette |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrures, Films argileux et interlits |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 33 |
| - Abondance (nb)/surface | Très peu nombreuses (<1) |
| - Dimensions (mm) | Grossières (>5) |
| - Orientation | Horizontales (donc c'est cette horizon qui limite la profondeur et l'horizontalité des racines. |
| Porosité de l'horizon : | Peu poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Très collant |
| - Sol Humide | Ferme |
| - Sol sec | Dur |
| Texture selon USDA : | Clay loam |
| % Argile | 34 |
| % Limon | 37 |
| % Sable | 29 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 3.514 |
| Rapport C/N | 11.90 |
| Marbrures (taches) : | Très nombreuses (>20), Grandes (>15), fort contraste |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Modéré à forte et Forte |
| Classe (grosseur) : | Moyenne à grossière |
| Sous-Type : | Granulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluvio-lacustre |
| Utilisation actuelle : | Culture |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Bassin |
| Processus modificateur : | Biseauté |
| Type de pente : | Simple |
| Classe de pente : | 1 à 3 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Dépression, mais en amont des sols hydromorphe. |
| Exposition : | 150o Nord |
| Érosion hydrique : | Modérée (25 à 75 %) |
| Ravinement : | Ensablement |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Pierrosité : | non |
| Température du sol: | Comme 16.1 |

Couleur du sol : 7.5 YR 7/2 à 6/3
 Couverture végétale : Sorgho et melon d'eau
 Observations particulières : C'est peut-être un Delta-fluvio-lacustre ou bien une ancienne dune remaniée. Les photo 1 et 2 montrent les trois horizon (sable/A1/A2). De 0 à 15 cm c'est un sable meuble. De 15 à 20 cm A1=sables à interlits. De 20 à 43 cm argile TH3. Les mesures d'écoulement dans les sables à interlits est de 40 de direction 70o Nord. Prise à 9h15 am.

Fiche 17

Commune : Boidié
 Fédération paysanne : Dobenkan
 Propriétaire : Dotembougou
 Date : 08-Nov-04
 Unité cartographique : PL10 à pseudogley
 Horizon échantillonné : A 0 à 80 cm
 Particularité de l'horizon (PH) : (fer réduit)
 Description des racines :
 - Profondeur en cm 10
 - Abondance (nb)/surface Très peu nombreuses (<1)
 - Dimensions (mm) Très fines (0.075 <_>1)
 - Orientation Horizontales
 Porosité de l'horizon : Peu poreux
 Consistance :
 - Sol trempé Très collant
 - Sol Humide Très ferme
 - Sol sec Très dur
 Texture selon USDA : Sandy clay loam (sans gravier)
 % Argile 26
 % Limon 26
 % Sable 43
 % Gravier 5
 Effervescence : aucune
 µmol de phosphore/ g – sédiment : 1.936
 Rapport C/N 10.36
 Marbrures (taches) : Peu nombreuses (< 2) à Très nombreuses (>20) et Grandes (>15) de couleur 7.5 YR 7/8 à 2.5 YR 3/6

Structure primaire du sol :
 Grade : Forte
 Classe (grosseur) : Fine à moyenne
 Sous-Type : Polyédrique subangulaire à Granulaire
 Modificateur sous-type : Pseudo
 Accumulation ou mode de déposition : Fluvio-lacustre
 Modificateur lithologique : non déterminé
 Utilisation actuelle : Culture d'arachides
 Pratiques conservatoires : aucune
 Formes de terrains : Bassin
 Processus modificateur : aucun
 Type de pente : Simple
 Classe de pente : 0
 Endroit d'échantillonnage sur la pente : Dépression
 Exposition : 068° N --- 900oN
 Érosion hydrique : légère (25 %)
 Pierrosité : Non (<0.01%, >30 m)
 Température du sol (°C): Ext = 44, à 25cm = 38, à 50cm = 34, à 75cm = 33
 Couleur du sol : 5YR 5/2 et 2.5 YR 7/4
 Couverture végétale : Culture d'arachides

Observations particulières : 13h34, Aug. en concrétion de fer réduit avec la prof.
Concrétions: MA=1 à 3 vers prof; MD=3; MC 2,5 YR 2/1.

Fiche 18 HA

| | |
|--|---|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobankan |
| Village : | Dotembougou |
| Date : | 08-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 profil 0 à 90 cm |
| Horizon échantillonné : | A |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Nette |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Concrétions |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 20 |
| - Abondance (nb)/surface | Peu nombreuses (1-3) |
| - Dimensions (mm) | Fines (1-2) à Grossières (>5) |
| - Orientation | Horizontales |
| Porosité de l'horizon : | Très poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Peu collant |
| - Sol Humide | Friable |
| - Sol sec | Tendre |
| Texture selon USDA : | Loamy sand |
| % Argile | 9 |
| % Limon | 11 |
| % Sable | 80 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.700 |
| Rapport C/N | 11.51 |
| Marbrures (concrétions) : | Peu nombreuses (< 2), Petites (<5) |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Faible |
| Classe (grosseur) : | Très fine à Fine à moyenne |
| Sous-Type : | Granulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Accumulation ou mode de déposition : | non déterm. |
| Utilisation actuelle : | Culture mil |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Haies-vives |
| Processus modificateur : | Érodé et ravinement |
| Type de pente : | Complexe |
| Classe de pente : | 2 à 3 degrés |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Haute de pente |
| Exposition : | 056o Nord |
| Érosion hydrique : | Modérée (25 à 75 %) |
| Ravinement : | Prof= 10 cm et 300, 2, 1/ha et ensablement |
| Érosion éolienne : | aucun |
| Pierrosité : | Non (<0.01%, >30 m) |
| Température du sol (°C): | Ext = 38, à 10cm = 36, à 50cm = 32, à 85cm = 32 |
| Couleur du sol: | 7,5 YR 4/4 |
| Couverture végétale : | Culture de mil avec agroforesterie de karité |
| Observations particulières : | 15h08, Horizonation peu développée. + argile ou limon en profondeur |

Fiche 18 HB

| | |
|--|--|
| Commune : | Boidié |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Village : | Dotembougou |
| Date : | 08-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 profil 0 à 90 cm |
| Horizon échantillonné : | B |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Nette |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Concrétions |
| Description des racines : | |
| - Profondeur en cm | 20 |
| - Abondance (nb)/surface | Peu nombreuses (1-3) |
| - Dimensions (mm) | Fines (1-2) à Grossières (>5) |
| - Orientation | Horizontales |
| Porosité de l'horizon : | Très poreux |
| Consistance : | |
| - Sol trempé | Collant |
| - Sol Humide | Friable |
| - Sol sec | Peu dur |
| Texture selon USDA : | Sandy clay loam |
| % Argile | 22 |
| % Limon | 17 |
| % Sable | 61 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.001 |
| Rapport C/N | 7.18 |
| Marbrures (concrétions) : | Peu nombreuses (< 2), Petites (<5) |
| Structure primaire du sol : | |
| Grade : | Faible |
| Classe (grosseur) : | Très fine à Fine à moyenne |
| Sous-Type : | Granulaire |
| Modificateur sous-type : | Pseudo |
| Accumulation ou mode de déposition : | non déterm. |
| Utilisation actuelle : | Culture mil |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Haies-vives |
| Processus modificateur : | Érodé et ravinement |
| Type de pente : | Complexe |
| Classe de pente : | 2 à 3 degrés |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Haute de pente |
| Exposition : | 056° Nord |
| Érosion hydrique : | Modérée (25 à 75 %) |
| Ravinement : | Prof= 10 cm et 300, 2, 1/ha et ensablement |
| Érosion éolienne : | aucun |
| Pierrosité : | Non (<0.01%, >30 m) |
| Température du sol: | Comme Fiche 18HA |
| Couleur du sol: | 7,5 YR 5/8 |
| Couverture végétale : | Culture de mil avec agroforesterie de karité |
| Observations particulières : | 15h08, Horizonation peu développée. + d'argile ou de limon en profondeur |

Fiche 19

| | |
|-----------------------|-------------------|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |

| | |
|--------------------------------------|--|
| Propriétaire : | Mamadou Diarra |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 sol ferrug. plaine limoneuse (limon fin) |
| Horizon échantillonné : | A/B mélangé |
| Limite de l'horizon : | |
| - Netteté | Diffuse |
| - Forme | Régulière |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrure en B |
| Porosité de l'horizon : | Peu poreux à moyen poreux |
| Texture selon USDA : | Loam |
| % Argile | 21 |
| % Limon | 44 |
| % Sable | 35 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.359 |
| Rapport C/N | 8.13 |
| Marbrures (taches) : | en B orangé oxydé |
| Structure primaire du sol : | Granulaire de 1 à 3 cm et polyédrique sub-angulaire de 10 à 15 cm |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale |
| Utilisation actuelle : | Champ de mil |
| Pratiques conservatoires : | Haies vives à la section Ouest |
| Formes de terrains : | Incliné à plat |
| Processus modificateur : | Érodé vers la berge au Nord |
| Type de pente : | Simple |
| Érosion hydrique : | Légère (25 %) |
| Ravinement : | non |
| Érosion éolienne : | non |
| Couverture végétale : | Agroforesterie: champ de mil et arbres de Karité, manguier et figuier (toro) |
| Couleur du sol : | 10YR 7/2 |
| Observations particulières : | 10h48 am A: est limoneux et B: est limoneux gleyifié à taches (marbrures) oxydés orangés. Il n'y a aucun compost ajouté, c'est juste de la fumure lors du passage des animaux. 25 Kg de NPK d'engrais chimique. Les opérations sont la charrue attelée. le champ est de 100m (N-S) et 150 m (E-O). |

Fiche 20

| | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | Sumana Dougouré |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 plaine limoneuse, limon fin |
| Horizon échantillonné : | A/B mélangé |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Marbrures en B |
| Texture selon USDA : | Sandy loam |
| % Argile | 15 |
| % Limon | 25 |
| % Sable | 60 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.465 |
| Rapport C/N | 6.69 |
| Marbrures (taches) : | en B orangé oxydé |

| | |
|--------------------------------------|---|
| Structure primaire du sol : | Granulaire |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale |
| Utilisation actuelle : | Champ de mil |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Incliné à plat |
| Processus modificateur : | Érosion en nappe |
| Type de pente : | Simple |
| Érosion hydrique : | Érosion en nappe |
| Ravinement : | non |
| Érosion éolienne : | non |
| Couverture végétale : | Culture de mil, et très peu d'arbres. |
| Couleur du sol : | 10YR 7/3 |
| Observations particulières : | 11h20 am. L'an dernier pas d'ajout d'engrais ni compost. L'opération à la charrue attelée. A: 0 à 10 cm limoneux fin. B: 10 à 40 cm gleyifié avec taches orangé (oxydation) |

Fiche 21

| | |
|--|--|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | Bakary Koné |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 Plus sableux que le précédent. |
| Horizon échantillonné : | A (mélange de 10, 20 et 40 cm). |
| Porosité de l'horizon : | Assez poreux |
| Texture selon USDA : | Sandy loam |
| % Argile | 7 |
| % Limon | 17 |
| % Sable | 76 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.658 |
| Rapport C/N | 7.43 |
| Marbrures (taches) : | oui |
| Structure primaire du sol : | Granulaire (de 1 à 3 cm de diamètre) à meuble |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale |
| Utilisation actuelle : | Culture de mil |
| Pratiques conservatoires : | Haies vives N-S |
| Formes de terrains : | Vallonné |
| Processus modificateur : | érosion en nappe |
| Type de pente : | Complexe |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Milieu |
| Érosion hydrique : | Légère (25 %) |
| Ravinement : | 1 N-S |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Couverture végétale : | Culture de mil, les haies vives sont construites de pougère et herbes. |
| Couleur du sol : | 10YR 7/3 |
| Observations particulières : | 11h51 am, Sol ferugineux tropical de plaine limoneuse (limon fin à grossier et + sableux que le précédent). Opération avec charrues attelées. Compost ajouté, mais sûrement des ordures ménagères. |

Fiche 22

| | |
|-----------------------|-------------------|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | inconnu |

| | |
|--|---|
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 |
| Horizon échantillonné : | A |
| Porosité de l'horizon : | moyen poreux |
| Texture selon USDA : | Sandy loam |
| % Argile | 12 |
| % Limon | 19 |
| % Sable | 69 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.403 |
| Rapport C/N | 7.67 |
| Marbrures (taches) : | Oui |
| Structure primaire du sol : | Granulaire (de 1 à 3 cm de diamètre) à meuble |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale |
| Utilisation actuelle : | Culture de mil |
| Pratiques conservatoires : | Bandes herbés N-S |
| Formes de terrains : | Vallonné |
| Processus modificateur : | érosion |
| Type de pente : | Complexe |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Milieu |
| Érosion hydrique : | Légère (25 %) |
| Ravinement : | non |
| Érosion éolienne : | non |
| Couverture végétale : | Culture de mil et culture de manioc vers l'est. |
| Couleur du sol : | 10YR 7/4 |
| Observations particulières : | Agroforesterie avec arbres de karité et zone de pâturage. Plus sableux que fiche 19 et 20 |

Fiche 23

| | |
|--|-----------------------|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | aucun |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 |
| Horizon échantillonné : | A de 0 à 20 cm |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Taches oxydées orangé |
| Porosité de l'horizon : | Peu poreux |
| Texture selon USDA : | Loam |
| % Argile | 23 |
| % Limon | 38 |
| % Sable | 39 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 3.503 |
| Rapport C/N | 11.63 |
| Marbrures (taches) : | Orangé de 1 cm |
| Structure primaire du sol : | Granuleuse |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale |
| Utilisation actuelle : | Jachère |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Bassin |
| Processus modificateur : | aucune |
| Type de pente : | Simple |
| Classe de pente : | 0 |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Bas. bassin |
| Érosion hydrique : | aucun |

| | |
|------------------------------|---|
| Ravinement : | aucun |
| Érosion éolienne : | aucun |
| Couverture végétale : | Jachère ou forêt jamais exploité par la génération du village. |
| Couleur du sol : | 10YR 7/3 |
| Observations particulières : | 12h46 pm, Plaine limoneuse. Sol ferrugineux (limon très fin) gleyifié. Le profil était de 0 à 20 cm et on remarque de l'anaérobie un peu. On passe de la couleur grise à brun oxydation. C'est un passage d'eau de la saison des pluies. |

Fiche 24

| | |
|--|---|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | Sidi Sanogo |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | DA5 |
| Horizon échantillonné : | A |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Sableux |
| Porosité de l'horizon : | Poreux |
| Texture selon USDA : | Loamy sand |
| % Argile | 7 |
| % Limon | 10 |
| % Sable | 83 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.431 |
| Rapport C/N | 7.79 |
| Marbrures (taches) : | aucune |
| Structure primaire du sol : | Meuble |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale ?? |
| Utilisation actuelle : | Culture de mil |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Incliné à plat |
| Processus modificateur : | érosion nappe |
| Type de pente : | Simple |
| Classe de pente : | -- |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Milieu |
| Exposition : | -- |
| Érosion hydrique : | Légère (25 %) |
| Ravinement : | aucun |
| Érosion éolienne : | Peu |
| Couverture végétale : | Culture de mil |
| Couleur du sol : | 10YR 6/4 |
| Observations particulières : | 13h14, Sur la photo no 12 du film 5 on voit de gauche à droite: Baba Djarra, Ablaye Dagouré, Amadou Sanogo, Mamadou Sanogo. Fumier ajouté de vache et pas d'engrais chimique. |

Fiche 25

| | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | Mamadou Sanogo |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 |
| Horizon échantillonné : | A/début de B de 0 à 40 cm |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Peu de marbrure |

| | |
|--|---|
| Porosité de l'horizon : | Moyen |
| Texture selon USDA : | Sandy loam |
| % Argile | 10 |
| % Limon | 18 |
| % Sable | 72 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.494 |
| Rapport C/N | 6.76 |
| Marbrures (taches) : | un peu en B |
| Structure primaire du sol : | Polyédrique angulaire |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviatile |
| Utilisation actuelle : | Culture |
| Pratiques conservatoires : | Bandes herbés N-S et E-O de 20 mètres |
| Formes de terrains : | Incliné |
| Processus modificateur : | érosion |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Milieu |
| Érosion hydrique : | aucun |
| Ravinement : | aucun |
| Érosion éolienne : | érodé (25 à 75 %) |
| Couverture végétale : | Culture de Calebasse et de mil en bandes. De plus, il y a le cougnès associé au mil. |
| Couleur du sol : | 10YR 7/3 |
| Observations particulières : | 13h22, Sol ferrugineux tropicaux de limon fins. Pas d'engrais chimique. Des ajouts de 20 à 30 charrette de fumier de vache. Les pratiques conservatoires sont des cultures en billon perpendiculaire à la pente. |

Fiche 26

| | |
|--|-------------------------|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | Lamine Sanogo |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 |
| Horizon échantillonné : | A |
| Porosité de l'horizon : | Moyen |
| Texture selon USDA : | Sandy loam |
| % Argile | 10 |
| % Limon | 22 |
| % Sable | 68 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.576 |
| Rapport C/N | 8.77 |
| Marbrures (taches) : | non |
| Structure primaire du sol : | Polyédrique sub-arrondi |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviatile |
| Utilisation actuelle : | Jachère |
| Pratiques conservatoires : | Haies vives |
| Formes de terrains : | Incliné |
| Processus modificateur : | aucun |
| Type de pente : | Simple |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Haut |
| Érosion hydrique : | aucune |
| Ravinement : | aucune |
| Érosion éolienne : | aucune |
| Couverture végétale : | Herbes et pourghère |

Couleur du sol : 10YR 7/4
 Observations particulières : 13h52, Sol ferrugineux tropicaux. À côté du champ, il y a le début de la route

Fiche 27

Commune et village : Boidié et Dilango
 Fédération paysanne : Dobenkan
 Propriétaire : aucun
 Date : 17-Nov-04
 Unité cartographique : PL10 vers hydromorphe
 Horizon échantillonné : A/B
 Particularité de l'horizon (PH) : Tacheté
 Porosité de l'horizon : Peu poreux
 Texture selon USDA : Sandy loam
 % Argile : 8
 % Limon : 26
 % Sable : 66
 % Gravier : 0
 Effervescence : aucune
 μmol de phosphore/ g – sédiment : 1.581
 Rapport C/N : 9.99
 Marbrures (taches) : peu Brune pour A et peu à moyen pour B
 Structure primaire du sol : Granulaire
 Accumulation ou mode de déposition : Fluviale
 Utilisation actuelle : Jachère ou forêt
 Pratiques conservatoires : aucune
 Formes de terrains : Incliné à plat
 Type de pente : Simple
 Érosion hydrique : Légère (25 %)
 Ravinement : aucun
 Érosion éolienne : aucun
 Couverture végétale : Jachère ou forêt arbustive.
 Couleur du sol : 10YR 6/2
 Observations particulières : 15h00, Plaine limoneuse vers hydromorphe

Fiche 28

Commune et village : Boidié et Dilango
 Fédération paysanne : Dobenkan
 Propriétaire : aucun
 Date : 17-Nov-04
 Unité cartographique : TH3 Sol hydromorphe à limoneux fin
 Horizon échantillonné : A
 Particularité de l'horizon (PH) : Dépôts meubles ou alluviales
 Porosité de l'horizon : peu poreux
 Texture selon USDA : Silt loam
 % Argile : 16
 % Limon : 73
 % Sable : 11
 % Gravier : 0
 Effervescence : aucune
 μmol de phosphore/ g – sédiment : 3.807
 Rapport C/N : 9.71
 Marbrures (taches) : Jaunâtre oxydé
 Structure primaire du sol : Sub-angulaire, polyédrique à meuble à cause de l'ensablement
 Accumulation ou mode de déposition : Fluviale
 Utilisation actuelle : Jachère

| | |
|--|---|
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Bassin |
| Processus modificateur : | Ensablement |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Bas |
| Érosion hydrique : | aucun |
| Ravinement : | aucun |
| Couverture végétale : | Jachère, forêt ouverte, Djou, herbe. |
| Couleur du sol : | 10YR 6/3 |
| Observations particulières : | 16h15, Sol hydromorphe, limoneux fin, dépôts meuble de consistance peu dure |

Fiche 29

| | |
|--|---|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | aucun |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL11 sol d'érosion |
| Horizon échantillonné : | A lessivé et B gleyifié |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Concrétions |
| Porosité de l'horizon : | Moyen |
| Texture selon USDA : | Clay loam |
| % Argile | 30 |
| % Limon | 37 |
| % Sable | 29 |
| % Gravier | 4 |
| Effervescence : | aucune |
| μmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.797 |
| Rapport C/N | 5.27 |
| Marbrures (taches) : | Orangé et rouge rouille |
| Structure primaire du sol : | Sub-angulaire polyédrique |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluviale |
| Utilisation actuelle : | Berge abandonnée et passage d'animaux |
| Pratiques conservatoires : | Aucune |
| Formes de terrains : | Pente de berge |
| Processus modificateur : | érosion, ravinement |
| Type de pente : | Complexe |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Bas |
| Érosion hydrique : | Grave (> 75%) |
| Ravinement : | Grave, multiple |
| Couverture végétale : | Djou, et herbes hydrophiles |
| Couleur du sol : | 10YR 7/4 |
| Observations particulières : | Sol ferrugineux tropicaux à concrétion lessivé et sol d'érosion |

Fiche 30

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | aucun |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL10 fin du T14 |
| Horizon échantillonné : | A |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Induré |
| Porosité de l'horizon : | Moyen à peu |
| Texture selon USDA : | Sandy loam |
| % Argile | 12 |
| % Limon | 22 |
| % Sable | 66 |

| | |
|--|---|
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.248 |
| Rapport C/N | 6.93 |
| Marbrures (taches) : | non |
| Structure primaire du sol : | Polyédrique angulaire |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluv. |
| Utilisation actuelle : | Jachère |
| Processus modificateur : | érosion |
| Type de pente : | Simple |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Bas |
| Érosion hydrique : | Modérée (25 à 75 %) |
| Ravinement : | 3 graves multiples |
| Couverture végétale : | Herbe épineux, djou. |
| Couleur du sol : | 10YR 6/4 |
| Observations particulières : | 17h32, Sol d'érosion un peu sableux à la fin du T14 |

Fiche 31

| | |
|--|---------------------|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | Inconnu |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL 10 pseudogley |
| Horizon échantillonné : | A/B 0 à 50 cm |
| Porosité de l'horizon : | Peu poreux |
| Texture selon USDA : | Clay loam |
| % Argile | 36 |
| % Limon | 43 |
| % Sable | 21 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 4.223 |
| Rapport C/N | 10.75 |
| Marbrures (taches) : | en Horizon B |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluv. |
| Utilisation actuelle : | Jachère |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Incliné |
| Processus modificateur : | érosion nappe |
| Type de pente : | Complexe |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Bas-milieu |
| Érosion hydrique : | Légère (25 %) |
| Couverture végétale : | Herbes Djou épineux |
| Couleur du sol : | 10YR 6/2 |

Fiche 32

| | |
|-------------------------|-------------------|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | Aba Diallo |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | DA5 |
| Horizon échantillonné : | A/B |
| Porosité de l'horizon : | Moyen |
| Texture selon USDA : | Loamy sand |
| % Argile | 7 |
| % Limon | 14 |

| | |
|--|---|
| % Sable | 79 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 1.585 |
| Rapport C/N | 7.07 |
| Structure primaire du sol : | Meuble à granulaire |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluv. |
| Utilisation actuelle : | Culture de mil |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Incliné |
| Processus modificateur : | érosion en nappe |
| Type de pente : | Simple |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Milieu |
| Érosion hydrique : | Légère (25 %) |
| Ravinement : | aucun |
| Couverture végétale : | Culture de mil |
| Couleur du sol : | 10YR 5/4 |
| Observations particulières : | Aucun engrais chimique, ni compost, ni fumier |

Fiche 33

| | |
|--|--|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |
| Propriétaire : | aucun |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | TJ4 |
| Horizon échantillonné : | A |
| Particularité de l'horizon (PH) : | Humide et tacheté orangé |
| Porosité de l'horizon : | Peu |
| Texture selon USDA : | Loam |
| % Argile | 20 |
| % Limon | 33 |
| % Sable | 47 |
| % Gravier | 0 |
| Effervescence : | aucune |
| µmol de phosphore/ g – sédiment : | 2.599 |
| Rapport C/N | 9.99 |
| Marbrures (taches) : | Orangé nombreuse |
| Structure primaire du sol : | Polyédrique sub-angulaire |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluv. |
| Utilisation actuelle : | Marre temporaire (point d'eau animaux) |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Bassin |
| Processus modificateur : | érosion |
| Type de pente : | Simple |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Bas |
| Érosion hydrique : | Légère (25 %) à grave (> 75%) |
| Ravinement : | Peu à grave |
| Érosion éolienne : | aucun |
| Couverture végétale : | Herbes hydrophiles et nénuphars |
| Couleur du sol : | 10YR 6/3 |
| Observations particulières : | Lit du bras mort du fleuve niger se remplis en saison des pluies |

Fiche 34

| | |
|-----------------------|-------------------|
| Commune et village : | Boidié et Dilango |
| Fédération paysanne : | Dobenkan |

| | |
|--|---|
| Propriétaire : | aucun |
| Date : | 17-Nov-04 |
| Unité cartographique : | PL11 lessivé |
| Horizon échantillonné : | A |
| Particularité de l'horizon (PH) : | érosion, marbrure, lessivage |
| Porosité de l'horizon : | Moyen |
| Texture selon USDA : | Silt loam (sans gravier) |
| % Argile | 13 |
| % Limon | 49 |
| % Sable | 28 |
| % Gravier | 10 |
| Effervescence : | aucune |
| μ mol de phosphore/ g – sédiment : | 2.232 |
| Rapport C/N | 6.33 |
| Marbrures (taches) : | Centrimétrique, oxydé orangé |
| Structure primaire du sol : | Granulaire polyédrique sub-angulaire |
| Accumulation ou mode de déposition : | Fluv. |
| Utilisation actuelle : | Jachère abondante |
| Pratiques conservatoires : | aucune |
| Formes de terrains : | Incliné |
| Processus modificateur : | érosion, ravinement |
| Type de pente : | Simple |
| Endroit d'échantillonnage sur la pente : | Bas |
| Érosion hydrique : | Modérée (25 à 75 %) à grave (> 75%) |
| Ravinement : | Grave multiple |
| Érosion éolienne : | non |
| Couverture végétale : | Jachère déboisé |
| Couleur du sol : | 10YR 7/3 |
| Observations particulières : | 18h10, Sol d'érosion ferrugineux tropicaux à concrétions. Routes et passage d'animaux. |

APPENDICE D

CODES ET FICHES DE TERRAINS QUOTIDIENNES

Codes de fiches pour les caractéristiques intrinsèques des sols

| Limite de l'horizon | | Sol Humide | CSH | Marbrures (taches) | | Matrice | |
|--|-------|----------------------|-------|--------------------------|--------|-----------------------|----|
| Netteté (LHN) | | Meuble | CSH1 | Abondance | MA | humide | 1 |
| Diffuse | LHN1 | Très friable | CSH2 | Peu nombreuses (< 2) | MA 1 | sèche | 2 |
| Graduelle | LHN2 | Friable | CSH3 | Nombreuses (2-20) | MA 2 | exo-agrégat humide | 3 |
| Nette | LHN3 | Ferme | CSH4 | Très nombreuses (> 20) | MA 3 | exo-agrégat sec | 4 |
| Abrupte | LHN4 | Très ferme | CSH5 | Dimensions (mm) | MD | endo-agrégat humide | 5 |
| Forme (LHF) | | Sol sec | CSS | Petites (< 5) | MD 1 | endo-agrégat sec | 6 |
| Régulière | LHF 1 | Meuble | CSS 1 | Moyenne (5-15) | MD 2 | écrasé humide | 7 |
| Ondulée | LHF 2 | Tendre | CSS 2 | Grandes (> 15) | MD 3 | écrasé sec | 8 |
| Irégulière | LHF 3 | Peu dur | CSS 3 | Contraste | MC | naturel humide/réduit | 9 |
| Interrompue | LHF 4 | Dur | CSS 4 | faible | MC 1 | naturel humide/oxydé | 10 |
| | | Très dur | CSS 5 | distinct | MC 2 | frotté humide/oxydé | 11 |
| | | | | fort | MC 3 | frotté sec | 12 |
| Particularité de l'horizon (PH) | | | | | | | |
| Marbrures | PH1 | Texture | T | Couleur | | | |
| Films argileux | PH2 | SG | | (voir charte) | | | |
| Concré, nodules, déjections | PH3 | S | | | | | |
| Sels | PH4 | SF | | Structure du sol | | | |
| Carbonates | PH5 | STF | | Primaire | SSP | | |
| Fragments grossiers | PH6 | SLG | | Grade | SSPG | | |
| | | SLG | | Sans structure | SSPG 1 | | |
| | | SLF | | Très faible | SSPG 2 | | |
| Description des racines | | SLTF | | Faible | SSPG 3 | | |
| profondeur en cm | DRP | LSG | | Faible à modéré | SSPG 4 | | |
| Abondance (nb)/surface | DRA | LS | | Modérée | SSPG 5 | | |
| Très peu nombreuses (<1) | DRA 1 | LSF | | Modérée à forte | SSPG 6 | | |
| Peu nombreuses (1-3) | DRA 2 | LSTF | | Forte | SSPG 7 | | |
| Nombreuses (4-14) | DRA 3 | L | | Classe (grosseur) | SSPC | | |
| Très nombreuses (> 14) | DRA 4 | Li | | Très fine | SSPC 1 | | |
| Dimensions (mm) | DRD | Li | | Très fine à fine | SSPC 2 | | |
| Micro-racines (< 0,075) | DRD 1 | LSA | | Fine | SSPC 3 | | |
| Très fines (0,075 < > 1) | DRD 2 | LA | | Fine à moyenne | SSPC 4 | | |
| Fines (1-2) | DRD 3 | LLiA | | Moyenne à grossière | SSPC 5 | | |
| Moyenne (2 < > 5) | DRD 4 | AS | | Grossière | SSPC 6 | | |
| Grossières (> 5) | DRD 5 | Ali | | Très Grossière | SSPC 7 | | |
| Orienteation | DRD | A | | Sous-Type | SSST | | |
| Verticales | DRD 1 | ALO | | Lamellaire | SSST 1 | | |
| Horizontales | DRD 2 | O | | Prismatique | SSST 2 | | |
| Obliques | DRD 3 | GR | | Colonnaire | SSST 3 | | |
| Sans orientation | DRD 4 | TGR | | Polyédrique angulaire | SSST 4 | | |
| | | HUM | | Polyédrique subangulaire | SSST 5 | | |
| Porosité de l'horizon | PoH | GRX | | Granulaire | SSST 6 | | |
| Peu poreux | PoH 1 | | | Massive | SSST 7 | | |
| Assez poreux | PoH 2 | Effervescence | HCL | Particulaire | SSST 8 | | |
| Très poreux | PoH 3 | Très faible | HCL 1 | Motteuse | SSST 9 | | |
| | | Faible | HCL 2 | Modificateur sous-type | SSM | | |
| Consistance | C | Modéré | HCL 3 | Pseudo | SSM 1 | | |
| Sol trempé | CST | Forte | HCL 4 | Stratifiée | SSM 2 | | |
| Non collant | CST 1 | | | En lits | SSM 3 | | |
| Peu collant | CST 2 | | | Laminée | SSM 4 | | |
| Collant | CST 3 | | | Secondaire | SSS | | |
| Très collant | CST 4 | | | (se référer ci-haut) | | | |

Codes de fiches pour la géomorphologie et la physique du terrain.

| Accumulation ou mode de déposition | AMD | Boisé | UAB | Classe de pente | CP | Rocosté |
|------------------------------------|--------|---------------------------------|-------|---|-------|----------------------------------|
| Fluviatile | AMD 1 | productif | UAB 1 | degré | CP | Non (2%, > 75 m) |
| Colluvionnaire | AMD 2 | non productif | UAB 2 | 0 | CP 1 | Faiblement (2 à 10%, 25 - 75 m) |
| Éolien | AMD 3 | naturel | UAB 3 | 0 - 1 | CP 2 | modérément (10 à 20%, 10 - 25 m) |
| Fluvio-éolien | AMD 4 | dégradé | UAB 4 | 1 à 3 | CP 3 | Très (25-50%, 2 à 10 m) |
| Fluvio-lacustre | AMD 5 | | | 3 à 5 | CP 4 | Extrêmement (50-90%, 2 m) |
| Fluvio-marin | AMD 6 | Terres humides | UATH | 6 à 9 | CP 5 | Excessivement (> 90%) |
| Lacustre | AMD 7 | | | 9 à 17 | CP 6 | |
| Marin | AMD 8 | Terrain improductif | UATI | 17 à 24 | CP 7 | Végétation de couverture |
| Organique | AMD 9 | sable | UATI1 | 25 à 35 | CP 8 | |
| Résiduel | AMD 10 | rocheux | UATI2 | 35 à 45 | CP 9 | |
| Antropogénique | AMD 11 | accidenté | UATI3 | > 45 | CP 10 | |
| Saprotité | AMD 12 | caillouteux | UATI4 | | | |
| | | eau | UATI5 | Endroit d'échantillonnage sur la pente | EEP | |
| Modificateur lithologique | ML | | | Crête | EEP 1 | |
| non déterminé | ML 1 | Pratiques conservatoires | PC | Haut de pente | EEP 2 | |
| Mixte | ML 2 | Drains | PC 1 | milieu de pente | EEP 3 | |
| Igné | ML 3 | fossés de drainage | PC 2 | bas de pente | EEP 4 | |
| Sédimentaire | | irrigation | PC 3 | ped de pente | EEP 5 | |
| Shale | ML 4 | Épierrement | PC 4 | dépression | EEP 6 | |
| grès | ML 5 | haies-vives | PC 5 | plateau | EEP 7 | |
| conglomérat | ML 6 | brise-vent | PC 6 | | | |
| carbonates | ML 7 | cordons pierreux | PC 7 | Exposition | | |
| Brèche | ML 8 | barrière ligneuse | PC 8 | degré N. | | |
| Métamorphique | | terrasses | PC 9 | | | |
| gneiss | ML 9 | | | Érosion hydrique | V | |
| Schiste | ML 10 | Formes de terrains | FT | légère (25%) | V1 | |
| Quartzite | ML 11 | Cuirasse | FT 1 | modérée (25 à 75%) | V2 | |
| Pyroclastique | ML 12 | glacis | FT 2 | grave (> 75%) | V3 | |
| | | incliné | FT 3 | | | |
| Utilisation actuelle | UA | plat | FT 4 | Ravinement | R | |
| Urbaine | UAU | valloné | FT 5 | nombre de segment | RSx | |
| bâtiments | UAU 1 | Abrupte | FT 6 | longueur (m) | RSx1 | |
| Mines carrières etc | UAU 2 | Terrasse | FT 7 | largeur (m) | RSx2 | |
| Protégé | UAU 3 | ondulé | FT 8 | nombre par surface | RSx3 | |
| | | plateau | FT 9 | | | |
| Agricole | UAA | bassin | FT 10 | Érosion éolienne | EE | |
| Sylviculture | UAA 1 | | | Érodée (25 à 75%) | EE 1 | |
| Vergés | UAA 2 | Processus modificateur | PM | grave (> 75%) | EE 2 | |
| culture | UAA 3 | Biseauté | PM 1 | dénudée | EE 3 | |
| culture fourragère | UAA 4 | Érodé | PM 2 | | | |
| jachère | UAA 5 | Solifluxion | PM 3 | Pierrosité | | |
| | | Ravinement | PM 4 | Non (< 0.01%, > 30 m) | 1 | |
| Pâturage | UAP | | | Faiblement (0.01 à 0.1%, 10 - 30 m) | 2 | |
| naturel | UAP 1 | Type de pente | TP | modérément (0.1 à 3%, 2 - 10 m) | 3 | |
| boisé | UAP 2 | Simple | TP 1 | Très (3-15%, 1 à 2 m) | 4 | |
| aménagé | UAP 3 | Complexe | TP 2 | Extrêmement (15-50%, 0.1 à 0.5 m) | 5 | |
| délaissé | UAP 4 | | | Excessivement (> 50%, < 0.1 m) | 6 | |

APPENDICE E

PHOTOS DE L'EXOSCOPIE DES GRAINS DE QUARTZ

ANNEXE E

Photos de l'exoscopie des grains de quartz à la loupe binoculaire.

Photo 1 : Grains ferrugineux >1180 et < 2000 mm; grossissement X16; F15HA.



Photo 2 : Grains ferrugineux, surface intérieur >1180 et < 2000 mm; grossissement X60; F15HA.



Photo 3 : Grains quartz ronds mats (RM), >1180 et < 2000 mm; grossissement X35; F7. Dépoli à gauche, croissant à droite.



Photo 4 : Grains quartz émoussés luisants (EL), >1180 et < 2000 mm; grossissement X35; F24.



Photo 5 : Grains quartz ronds mats (RM), >1180 et < 2000 mm; grossissement X60; F7. Croissants de chocs visibles.



Photo 6 : Grains quartz de transition (TR), >1180 et < 2000 mm; grossissement X35; F8. Origine éolienne et fluviale.



APPENDICE F

PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE

APPENDICE F

Planche photographique

Photo 1: Érosion aux berges du fleuve Niger.

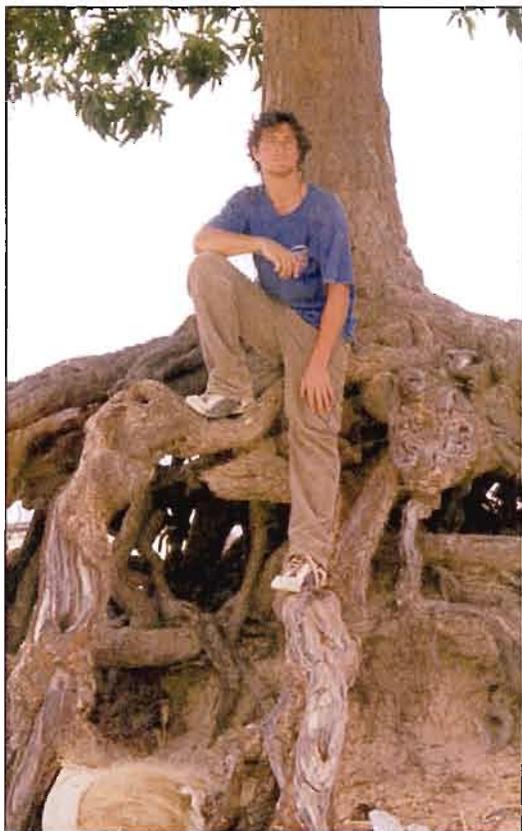


Photo 2: Érosion linéaire aux berges du fleuve Niger (village de Dilango).

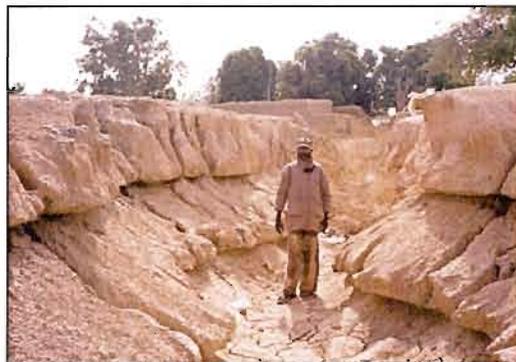


Photo 4: L'arbre le jun (indicateur de sols hydromorphes).



Photo 3: Érosion aux berges du fleuve Niger (village de Ségéla).



Photo 5: Zadjé (indicateur de sols hydromorphes).

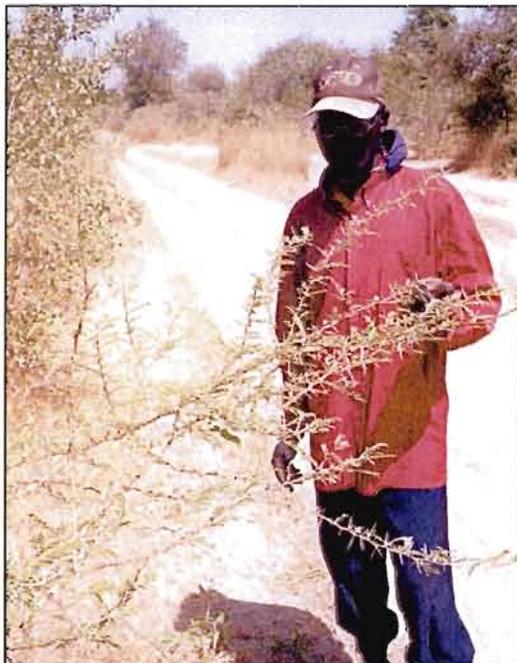


Photo 6: Dessiccation d'un sol hydromorphe.



Photo 8: Épis de sorgho.



Photo 7: Culture de Mil.



Photo 9: Forêt ouverte (bas de la photo) et savane (haut de la photo).

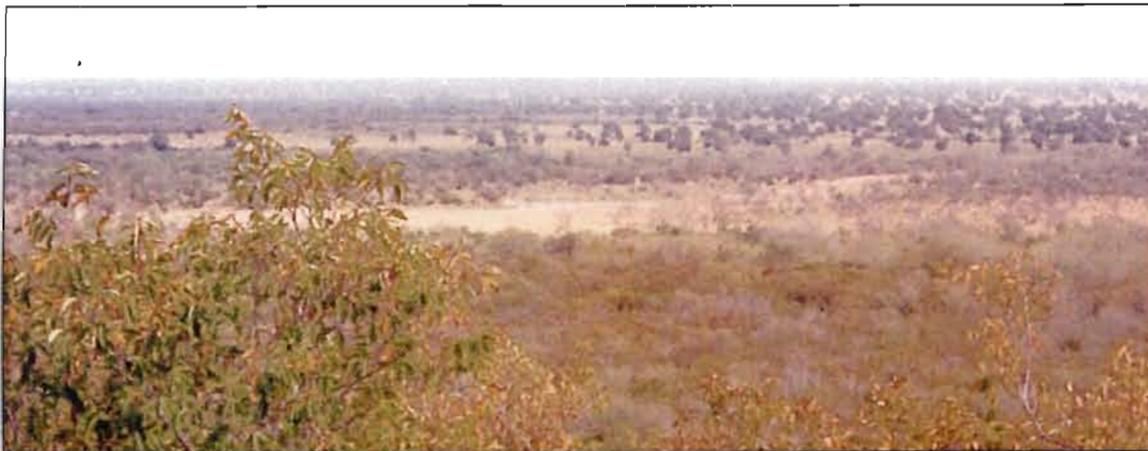


Photo 10: Savane typique.



Photo 11: Décapage de sol très peu profond.



Photo 12: Collines à fortes pentes du SE-Va dans le haut de la photo.



Photo 13: Érosion sélective d'un sol DA5 (Dépôts de MO, argiles et minéraux ferreux pointés par les flèches).



Photo 14a : Fiche 16 (Dépôts de sables érodés sur sol hydromorphe TH3).

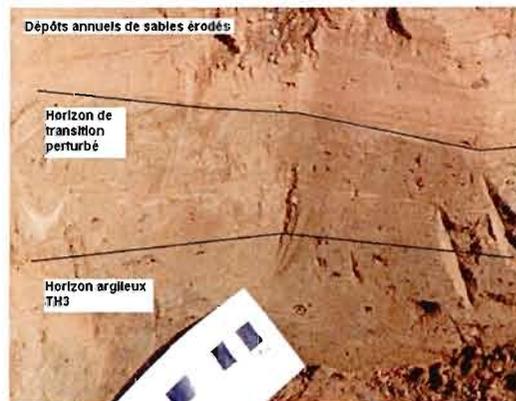


Photo 15: Fiche 9 (TC5, cuirasse latéritique affleurante).

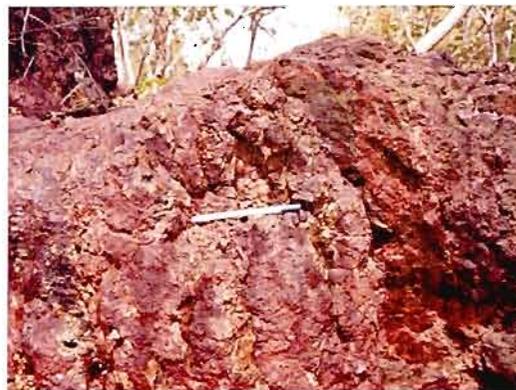


Photo 14b : Fiche 16 (sol hydromorphe TH3, courant alluvial).



Photo 16: Fiche 11-12 (TC3, profil A/C: Sol peu évolué et peu profond).

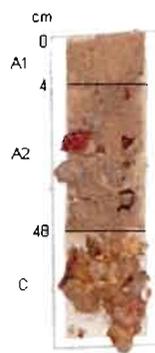


Photo 17: Fiche 11-12 (TC3, sol gravillonnaire).



Photo 18: Fiche 8 (DA5, même après un mètres il n'y avait que du sable.



Photo 20: Fiche 4, PL10 sans concrétion



Photo 19: Fiche 8 (DA5, dune massive faiblement litée par endroit).



Photo 20 (suite) Profil du sol de la photo 20.



Photo 21: Boidié, PL10 à pseudogley (horizon A lessivé).

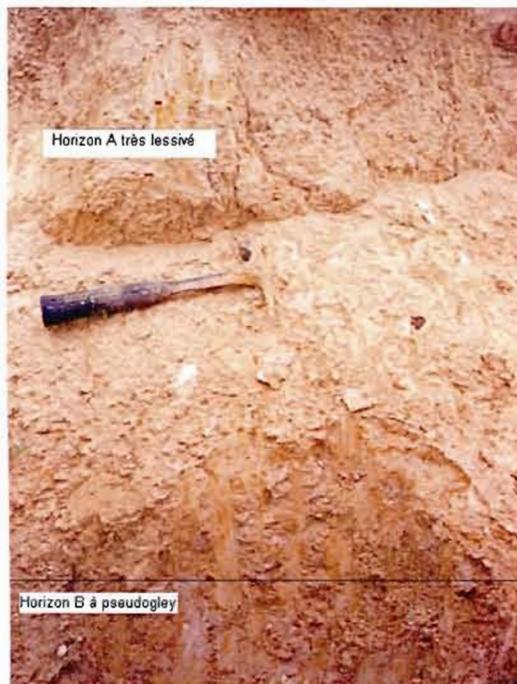


Photo 22: Fiche 13, sol ferrugineux tropical lessivé à concrétions.



Photo 23: PL10 sur le plateau (en jaune) et dans le ravinement le sol est devenu PL11 à environ 300m.

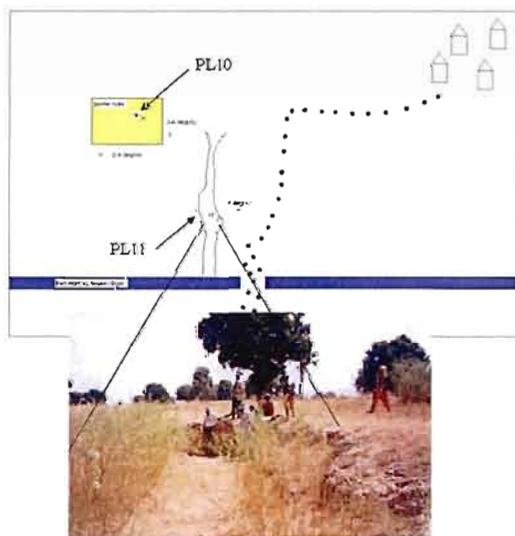


Photo 24: Fiche 2, T14.



Photo 25: Fiche 27, TH3.



Photo 26: Photo satellite de Google Earth, (2005). Le secteur de référence avec les deux grandes dépressions en bleu foncé où l'on retrouve des sols hydromorphes.



APPENDICE G

EXEMPLE D'AMÉNAGEMENT DE LA SURFACE 3 DU SE-I

Si l'on prend des conditions de départ du scénario 1, on trouve à la surface combinatoire 3 du SE-I :

Surface : 69,6 ha

Érosion moy. A = 70 t/ha/an

Perte C : 323 Kg/ha/an

Perte N : 35,63 Kg/ha/an

Perte P : 8,4 Kg/ha/an

Simulation du scénario 2 avec RUSLE2 en cherchant le meilleur aménagement:

Ajustement MO à 7% fait diminuer l'érosion A = 64 t/ha/an.

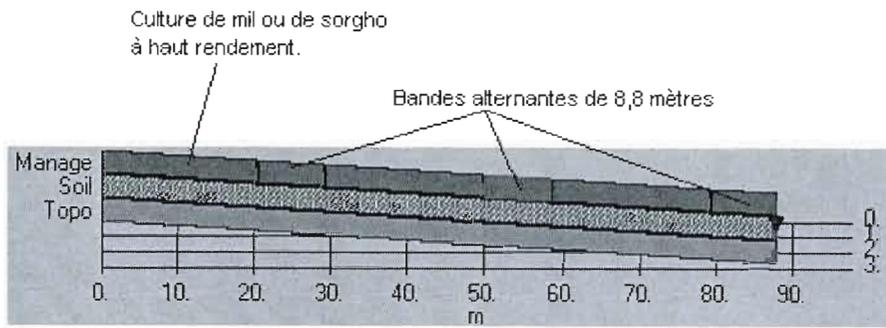
Faire la culture en rotation fait diminuer l'érosion A = 41 t/ha/an.

Faire la culture en billon cloisonné et en courbes de niveau, A= 21 t/ha/an.

Faire bandes alternantes de graminés (3-10%), A = 3,5 t/ha/an.

Avec des structures de diversion (3-0,5%), A = 8,7 t/ha/an.

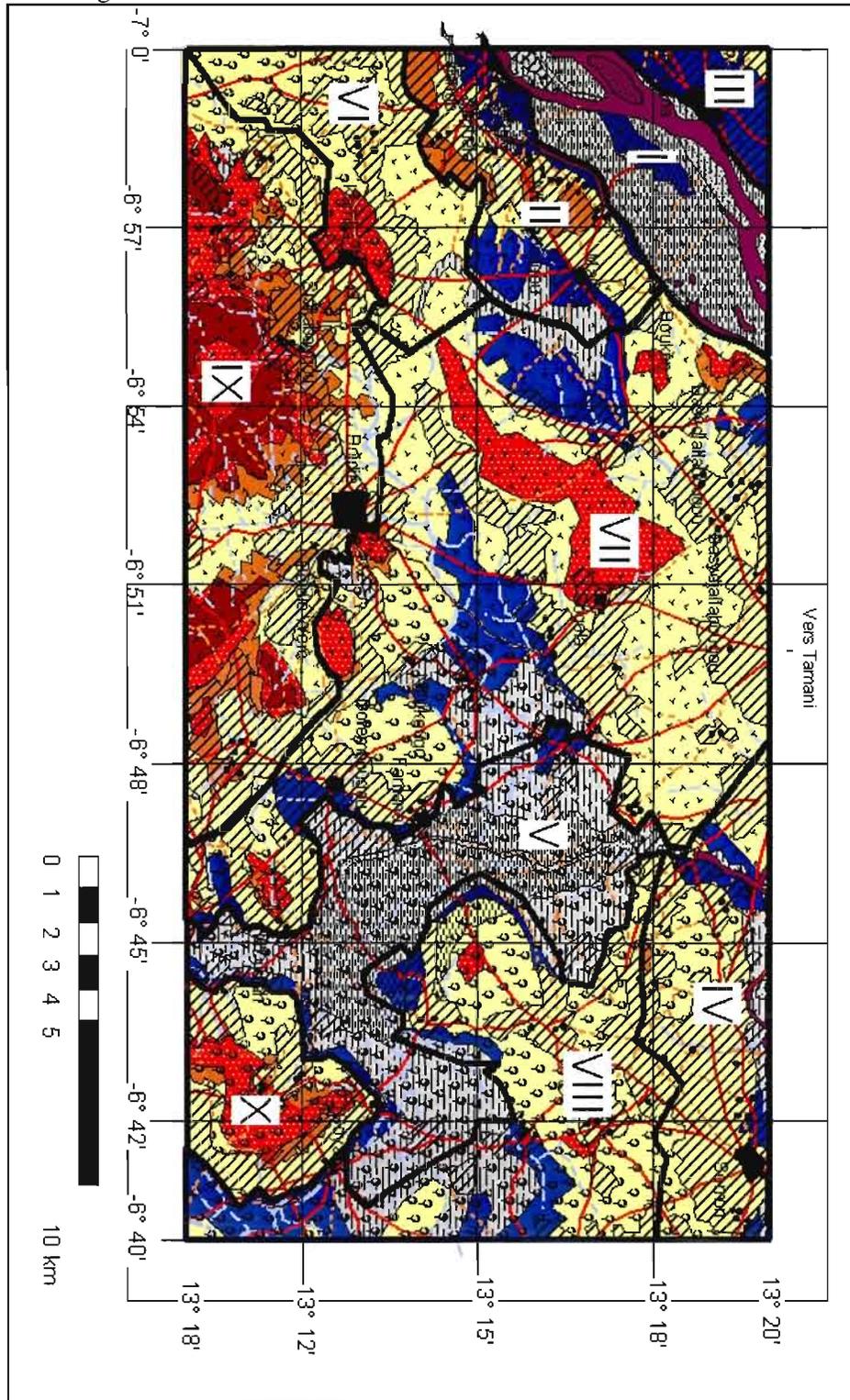
Donc on utilise la méthode M5 qui est représenté par le profil suivant :



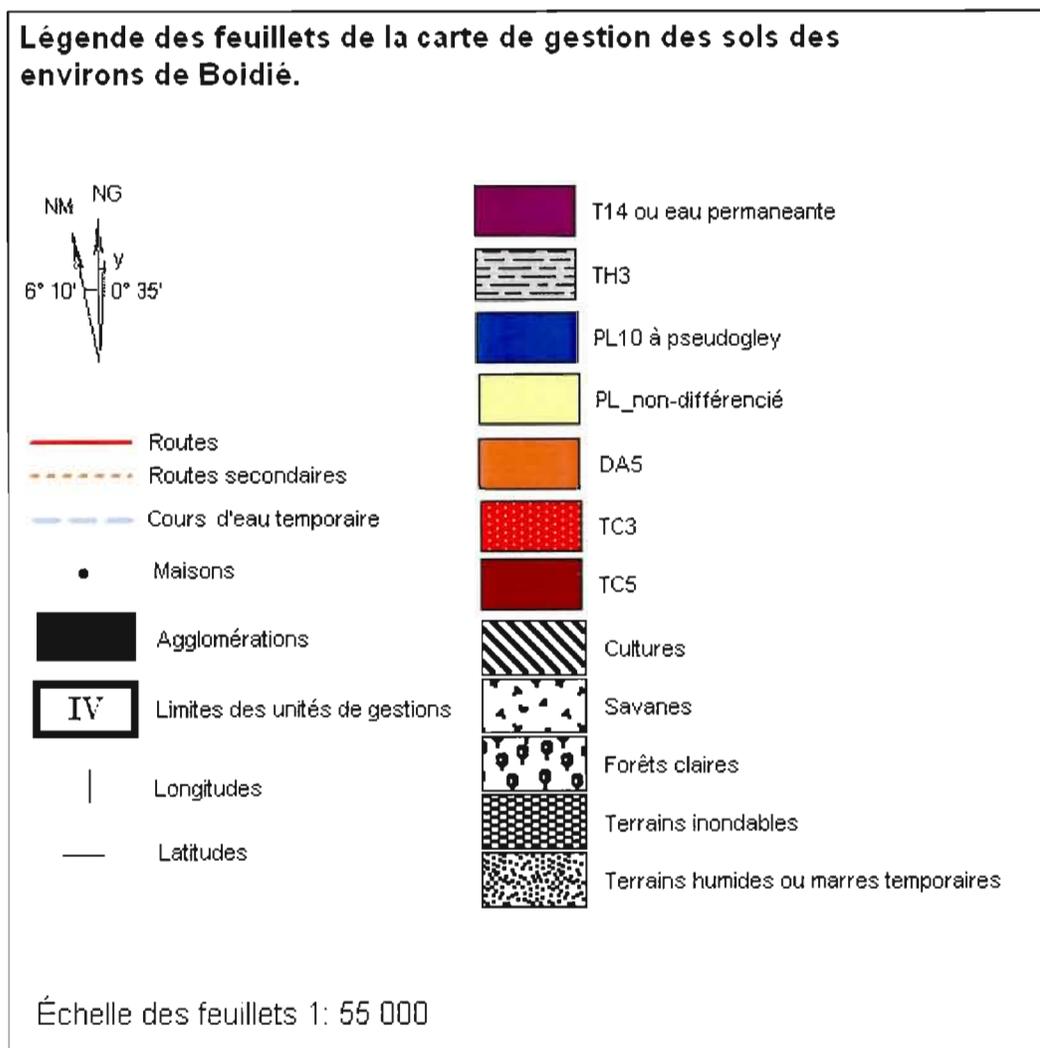
APPENDICE H

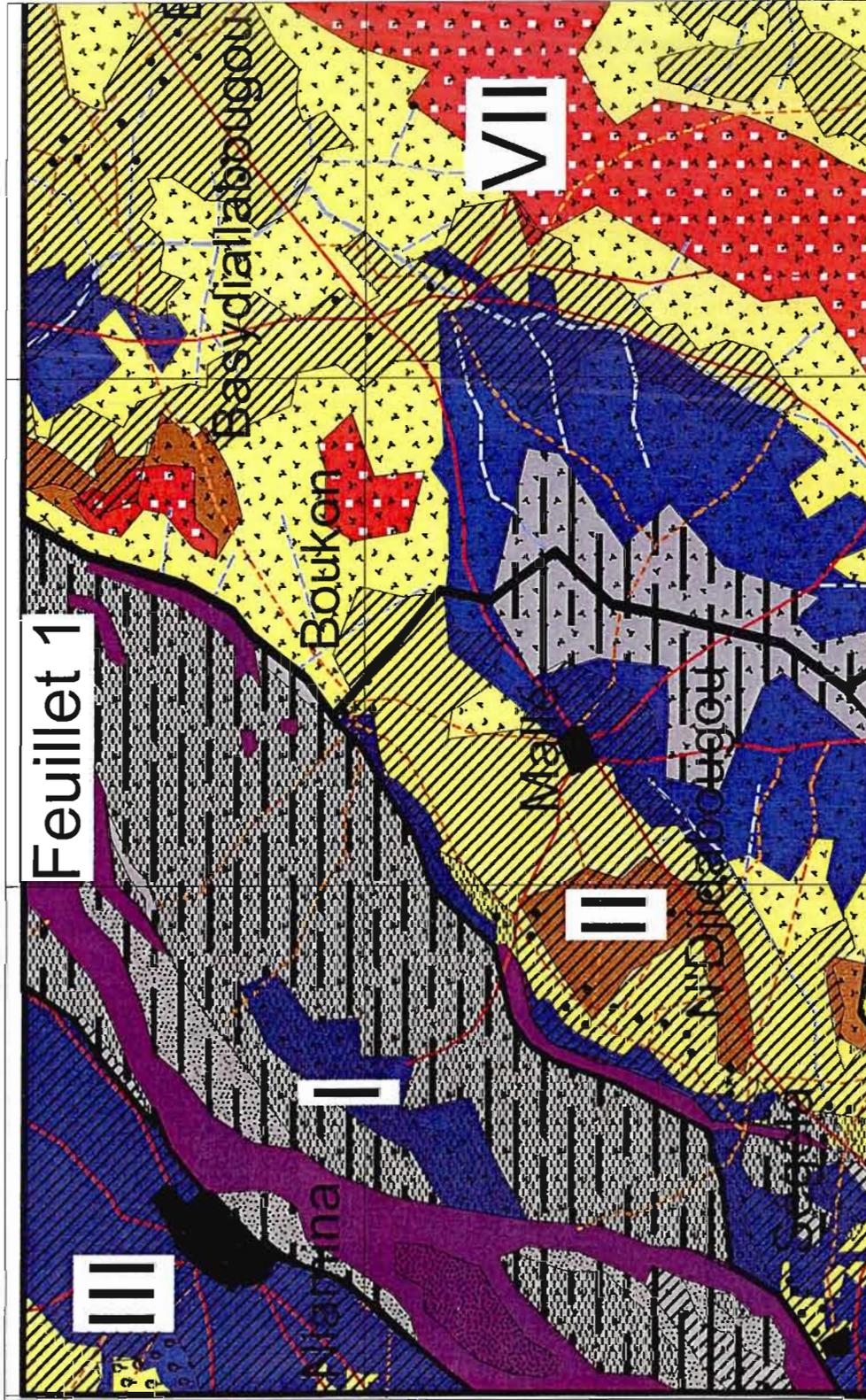
| Appendice | Page |
|---|------|
| H.1 Carte de gestion des sols | 250 |
| H.2 Légende | 251 |
| H.3 Feuille 1 : section nord-ouest | 252 |
| H.4 Feuille 2: section nord-centrale..... | 253 |
| H.5 Feuille 3: section nord-est | 254 |
| H.6 Feuille 4: section sud-ouest | 255 |
| H.7 Feuille 5: section sud-centrale | 256 |
| H.8 Feuille 6 : section sud-est | 257 |

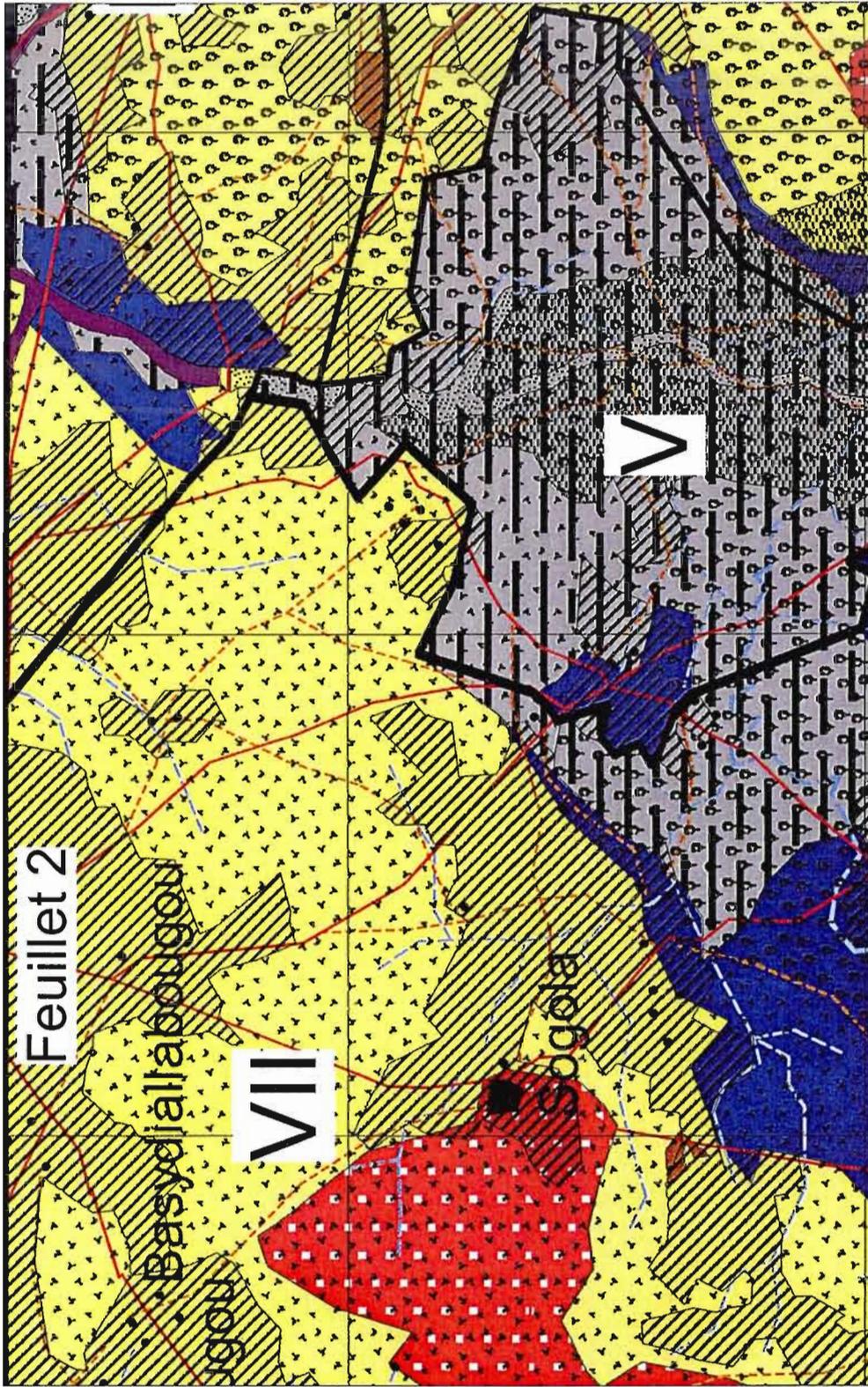
H.1 Carte de gestion des sols



H.2 Légende de la carte de gestion des sols







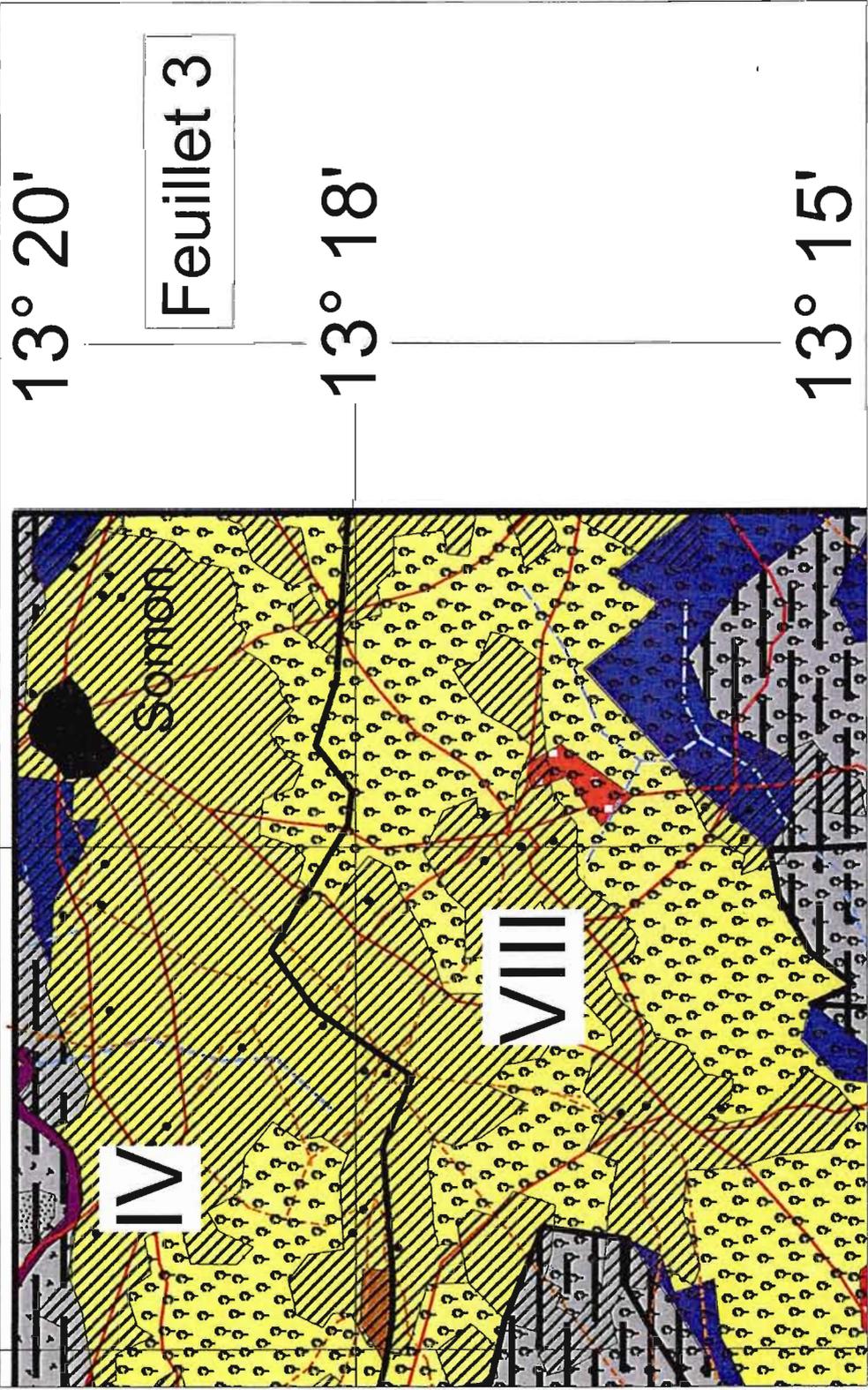
Feuillet 2

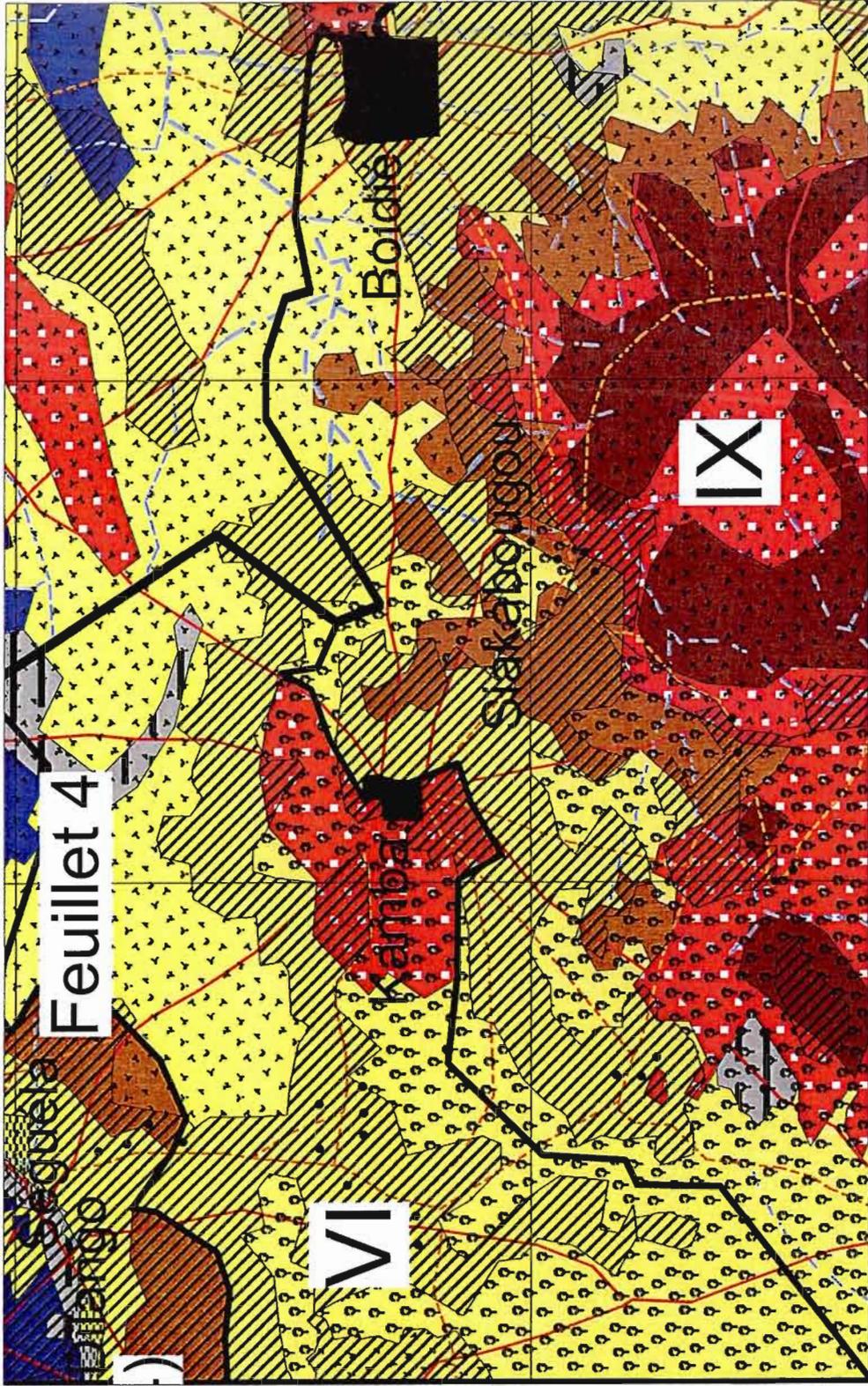
Basyelallabougou

VII

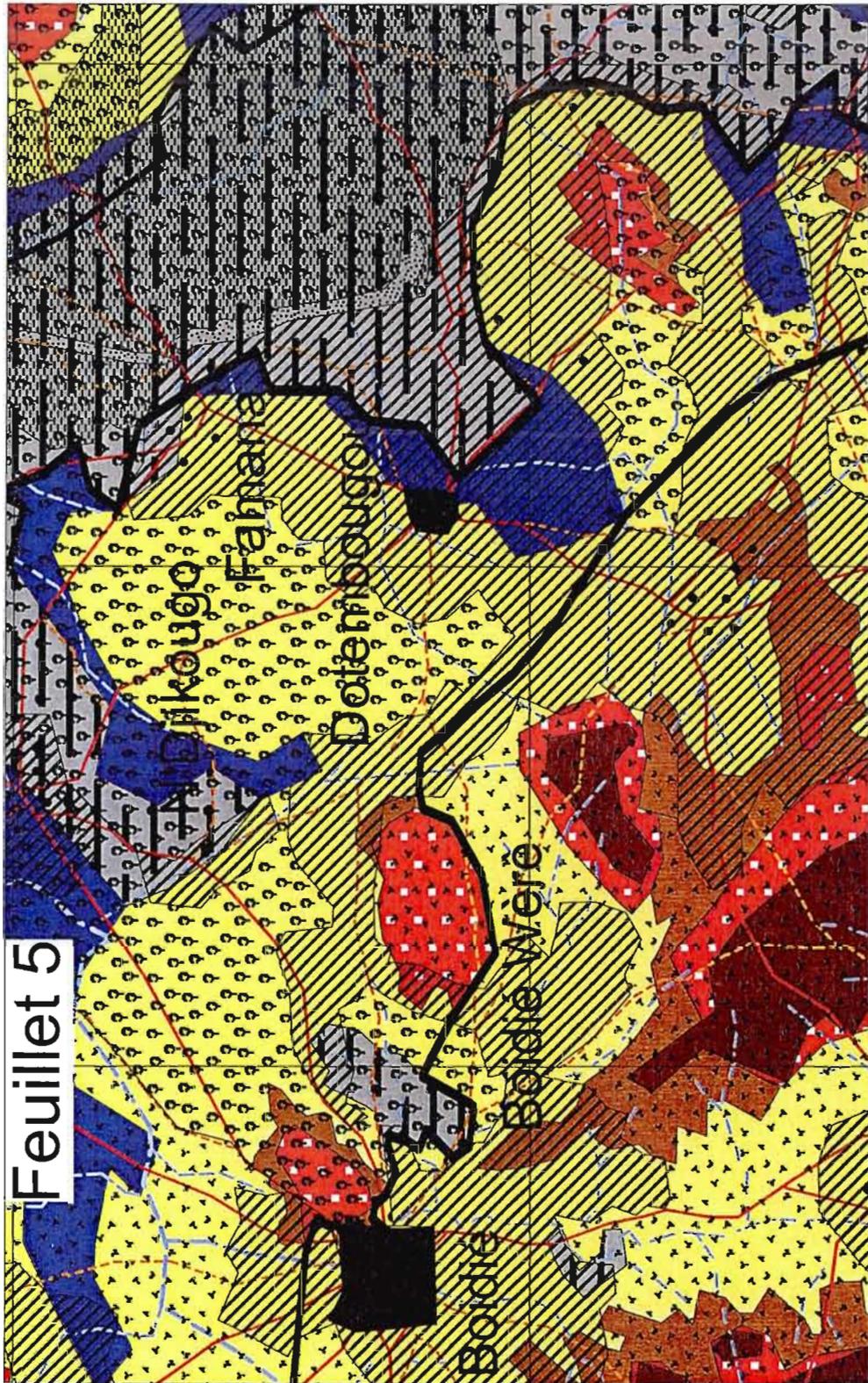
V

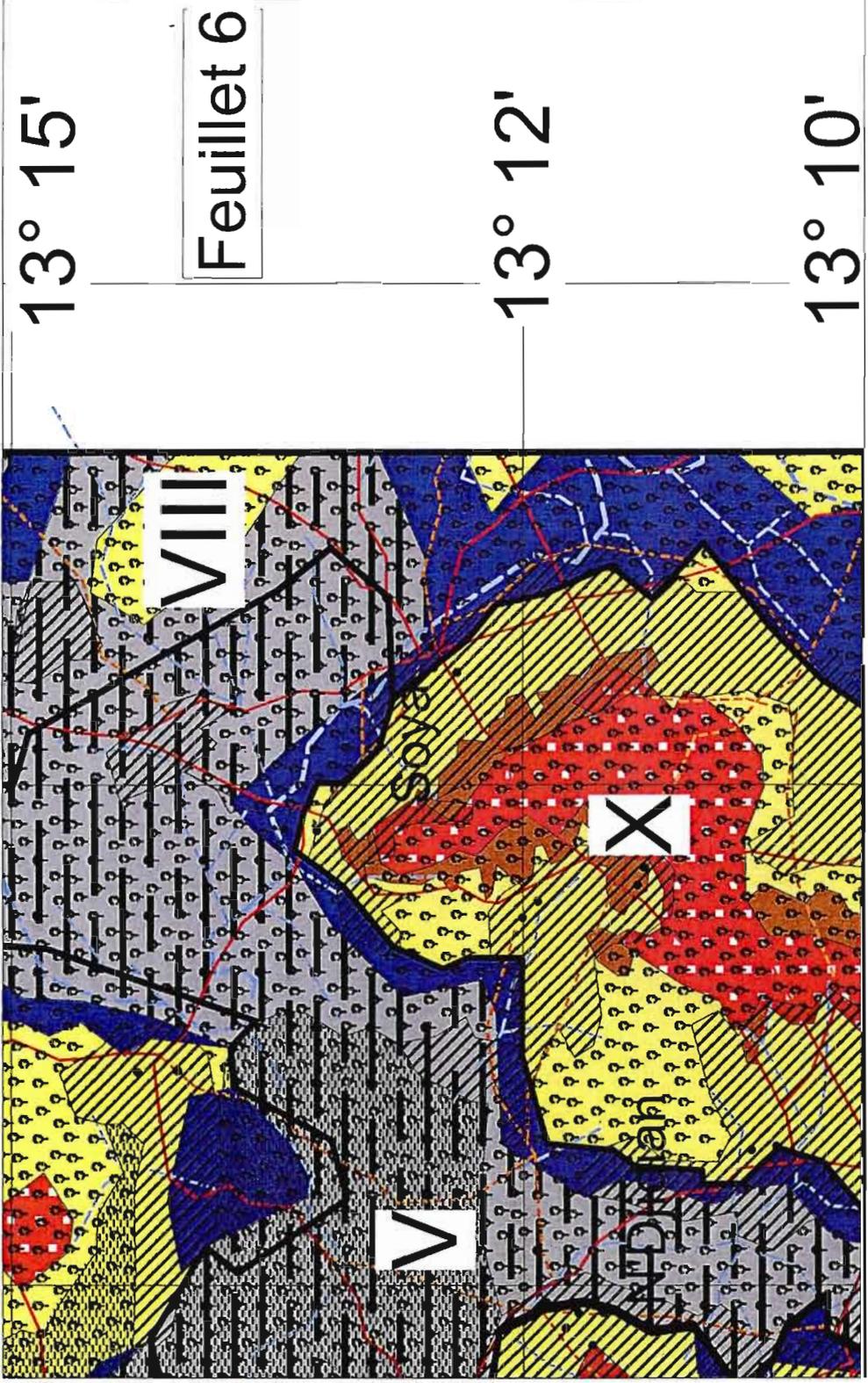
Sogola





Feuillet 5





APPENDICE I

Tableau du scénario 2

| Scénario 2: Simulation de pertes en terres et en nutriments des systèmes d'érosion du secteur de référence après aménagement. | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|------------|--------------|--|---------------------------------------|----------|----------------------------|---|----------|----------------------------|---|-------------|----------------------------------|---|
| Systèmes d'érosion | Sol types | No Surface | Surface (ha) | RUSLE2 Érosion par surface combinatoire (t/ha/an) | Érosions moyennes (t/ha/an) et (t/an) | C Tot. % | perte de C (Kg/ha) par ans | pertes moyennes en C (Kg/ha/an) et (t/an) | N Tot. % | perte de N (Kg/ha) par ans | pertes moyennes en N (Kg/ha/an) et (t/an) | P Tot. g/Kg | pertes de P (Kg/ha/an) et (t/an) | pertes moyennes en P (Kg/ha/an) et (t/an) |
| SE-I | PL10 pg | S1 | 220 | 1,70 | 36 | 0,46 | 8 | 164 | 0,05 | 0,87 | 19 | 0,10 | 0,2 | 4 |
| | | S2 | 15 | 0,11 | | 0,46 | 1 | | 0,05 | 0,06 | | 0,10 | 0,0 | |
| | TH3 | S4 | 2103 | 1,80 | | 0,46 | 8 | | 0,05 | 0,92 | | 0,10 | 0,2 | |
| | | S3 | 70 | 8,70 | | 0,46 | 40 | | 0,05 | 4,43 | | 0,10 | 1,0 | |
| | | S5 | 484 | 0,24 | | 0,46 | 1 | | 0,05 | 0,12 | | 0,10 | 0,0 | |
| | | S6 | 107 | 0,11 | | 0,45 | 0 | | 0,05 | 0,06 | | 0,08 | 0,0 | |
| | | S7 | 823 | 242,00 | | 0,45 | 1088 | | 0,05 | 127,21 | | 0,08 | 24,4 | |
| | Système | SE-I | 3822 | -- | | 139055 | -- | | -- | 626,25 | | -- | -- | |
| SE-IIa | DA5 | S8 | 69 | 1,4 | 5 | 0,17 | 2 | 17 | 0,03 | 0,37 | 2 | 0,06 | 0,1 | 0 |
| | | S9 | 548 | 7,7 | | 0,17 | 13 | | 0,03 | 2,05 | | 0,06 | 0,6 | |
| | PL nd | S10 | 216 | 2,5 | | 0,26 | 7 | | 0,04 | 1,02 | | 0,07 | 0,2 | |
| | | S11 | 1219 | 9,1 | | 0,26 | 24 | | 0,04 | 3,70 | | 0,07 | 0,8 | |
| | | S12 | 15 | 0,11 | | 0,26 | 0 | | 0,04 | 0,04 | | 0,07 | 0,0 | |
| | PL10 pg | S13 | 478 | 1,8 | | 0,46 | 8 | | 0,05 | 0,92 | | 0,10 | 0,2 | |
| | | S14 | 485 | 8,7 | | 0,46 | 40 | | 0,05 | 4,43 | | 0,10 | 1,0 | |
| | TH3 | S15 | 413 | 1,7 | | 0,54 | 9 | | 0,06 | 0,95 | | 0,11 | 0,2 | |
| | | S16 | 81 | 8,5 | | 0,54 | 46 | | 0,06 | 4,75 | | 0,11 | 1,2 | |
| | T14 | S17 | 80 | -- | | 0,45 | -- | | 0,05 | -- | | 0,08 | -- | |
| Système | SE-IIa | 3603 | 41,51 | 16616 | -- | -- | 60,03 | -- | -- | 7,30 | -- | -- | 1,75 | |
| SE-II b | PL nd | S18 | 19 | 0,12 | 5 | 0,26 | 0 | 16 | 0,04 | 0,05 | 2 | 0,07 | 0,0 | 0 |
| | | S19 | 71 | 9,9 | | 0,26 | 26 | | 0,04 | 4,02 | | 0,07 | 0,8 | |
| | PL10 pg | S20 | 30 | 0,13 | | 0,46 | 1 | | 0,05 | 0,07 | | 0,10 | 0,0 | |
| | | S21 | 851 | 8,4 | | 0,46 | 39 | | 0,05 | 4,28 | | 0,10 | 1,0 | |
| | Système | SE-IIb | 972 | 18,55 | | 4505 | -- | | -- | 16 | | -- | -- | |
| SE-II c | DA5 | S22 | 27 | 7,1 | 3 | 0,17 | 12 | 13 | 0,03 | 1,89 | 1 | 0,06 | 0,6 | 0 |
| | | S23 | 929 | 0,098 | | 0,26 | 0 | | 0,04 | 0,04 | | 0,07 | 0,0 | |
| | PL nd | S24 | 178 | 1,8 | | 0,26 | 5 | | 0,04 | 0,73 | | 0,07 | 0,2 | |
| | | S25 | 2650 | 2,7 | | 0,26 | 7 | | 0,04 | 1,10 | | 0,07 | 0,2 | |
| | | S26 | 7 | 0,2 | | 0,26 | 1 | | 0,04 | 0,06 | | 0,07 | 0,0 | |
| | PL10 pg | S27 | 170 | 1,9 | | 0,46 | 9 | | 0,05 | 0,97 | | 0,10 | 0,2 | |
| | | S28 | 251 | 3,2 | | 0,46 | 15 | | 0,05 | 1,63 | | 0,10 | 0,4 | |
| | TH3 | S29 | 261 | 2,1 | | 0,54 | 11 | | 0,06 | 1,17 | | 0,11 | 0,3 | |
| | | S30 | 151 | 10 | | 0,54 | 54 | | 0,06 | 5,59 | | 0,11 | 1,4 | |
| | T14 | S31 | 102 | -- | | 0,45 | -- | | 0,05 | -- | | 0,08 | -- | |
| | Système | SE-IIc | 4726 | 29,098 | | 15279 | -- | | -- | 60 | | -- | -- | |

(suite scénario 2)

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---------|-------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|----|------|-----|---|
| SE-III | PL10 pg | S32 | 253 | 0,14 | 4 | 0,46 | 1 | 20 | 0,05 | 0,07 | 2 | 0,10 | 0,0 | 1 |
| | | S33 | 316 | 7,1 | | 0,46 | 33 | | 0,05 | 3,61 | | 0,10 | 0,8 | |
| | TH3 | S34 | 5742 | 0,12 | | 0,54 | 1 | | 0,06 | 0,07 | | 0,11 | 0,0 | |
| | | S35 | 401 | 1,7 | | 0,54 | 9 | | 0,06 | 0,95 | | 0,11 | 0,2 | |
| | | S36 | 988 | 11 | | 0,54 | 59 | | 0,06 | 6,15 | | 0,11 | 1,5 | |
| Système | SE-III | 7700 | 20,06 | 30892 | -- | -- | 158 | -- | -- | 17 | -- | -- | 4 | |
| SE-IVa | TC3 | S37 | 295 | 0,07 | 2 | 0,48 | 0 | 7 | 0,04 | 0,03 | 1 | 0,07 | 0,0 | 0 |
| | | S38 | 171 | 4,1 | | 0,48 | 20 | | 0,04 | 1,77 | | 0,07 | 0,3 | |
| | PLnd | S39 | 1094 | 0,12 | | 0,26 | 0 | | 0,04 | 0,05 | | 0,07 | 0,0 | |
| | | S40 | 958 | 1,7 | | 0,26 | 4 | | 0,04 | 0,69 | | 0,07 | 0,1 | |
| | | S41 | 1263 | 3,8 | | 0,26 | 10 | | 0,04 | 1,54 | | 0,07 | 0,3 | |
| TH3 | S42 | 136 | 1,9 | 0,54 | 10 | 0,06 | 1,06 | 0,11 | 0,3 | | | | | |
| Système | SE-IVa | 3917 | 11,69 | 7631 | -- | -- | 29 | -- | -- | 3 | -- | -- | 1 | |
| SE-IVb | TC3 | S43 | 152 | 0,092 | 3 | 0,48 | 0 | 9 | 0,04 | 0,04 | 1 | 0,07 | 0,0 | 0 |
| | | S44 | 1867 | 1,5 | | 0,48 | 7 | | 0,04 | 0,65 | | 0,07 | 0,1 | |
| | | S45 | 189 | 2,4 | | 0,48 | 11 | | 0,04 | 1,04 | | 0,07 | 0,2 | |
| | DA5 | S46 | 92 | 0,088 | | 0,17 | 0 | | 0,03 | 0,02 | | 0,06 | 0,0 | |
| | | S47 | 76 | 1,6 | | 0,17 | 3 | | 0,03 | 0,43 | | 0,06 | 0,1 | |
| | | S48 | 82 | 8 | | 0,17 | 14 | | 0,03 | 2,13 | | 0,06 | 0,6 | |
| | PLnd | S49 | 1691 | 0,16 | | 0,26 | 0 | | 0,04 | 0,07 | | 0,07 | 0,0 | |
| | | S50 | 5922 | 1,7 | | 0,26 | 4 | | 0,04 | 0,69 | | 0,07 | 0,1 | |
| | PL10 pg | S51 | 5815 | 7,3 | | 0,26 | 19 | | 0,04 | 2,97 | | 0,07 | 0,6 | |
| | | S52 | 650 | 0,12 | | 0,46 | 1 | | 0,05 | 0,06 | | 0,10 | 0,0 | |
| | | S53 | 1346 | 1,5 | | 0,46 | 7 | | 0,05 | 0,76 | | 0,10 | 0,2 | |
| | TH3 | S54 | 913 | 8,3 | | 0,46 | 38 | | 0,05 | 4,22 | | 0,10 | 1,0 | |
| | | S55 | 1003 | 0,12 | | 0,54 | 1 | | 0,06 | 0,07 | | 0,11 | 0,0 | |
| S56 | | 338 | 1,7 | 0,54 | 9 | 0,06 | 0,95 | 0,11 | 0,2 | | | | | |
| S57 | | 160 | 3,5 | 0,54 | 19 | 0,06 | 1,96 | 0,11 | 0,5 | | | | | |
| Système | SE-IVb | 20296 | 38,08 | 51524 | -- | -- | 182 | -- | -- | 22 | -- | -- | 5 | |
| SE-IVc | TC3 | S58 | 103 | 0,056 | 3 | 0,48 | 0 | 10 | 0,04 | 0,02 | 1 | 0,07 | 0,0 | 0 |
| | | S59 | 8 | 1,6 | | 0,48 | 8 | | 0,04 | 0,69 | | 0,07 | 0,1 | |
| | PLnd | S60 | 3210 | 0,1 | | 0,26 | 0 | | 0,04 | 0,04 | | 0,07 | 0,0 | |
| | | S61 | 1820 | 8,7 | | 0,26 | 23 | | 0,04 | 3,54 | | 0,07 | 0,7 | |
| | PL10 pg | S62 | 1402 | 0,12 | | 0,46 | 1 | | 0,05 | 0,06 | | 0,10 | 0,0 | |
| | | S63 | 235 | 6,9 | | 0,46 | 32 | | 0,05 | 3,51 | | 0,10 | 0,8 | |
| TH3 | S64 | 1287 | 0 | 0,54 | 0 | 0,06 | 0,00 | 0,11 | 0,0 | | | | | |
| S65 | 122 | 3,6 | 0,54 | 19 | 0,06 | 2,01 | 0,11 | 0,5 | | | | | | |
| Système | SE-IVc | 8187 | 21,076 | 21568 | -- | -- | 85 | -- | -- | 10 | -- | -- | 2 | |
| SE-Va | TC5 | S66 | 103 | 0,17 | 3 | 0,48 | 1 | 12 | 0,04 | 0,07 | 1 | 0,07 | 0,0 | 0 |
| | | S67 | 1439 | 1,8 | | 0,48 | 9 | | 0,04 | 0,78 | | 0,07 | 0,2 | |
| | | S68 | 71 | 12 | | 0,48 | 57 | | 0,04 | 5,19 | | 0,07 | 1,0 | |
| | TC3 | S69 | 507 | 0,13 | | 0,48 | 1 | | 0,04 | 0,06 | | 0,07 | 0,0 | |
| | | S70 | 980 | 2,3 | | 0,48 | 11 | | 0,04 | 0,99 | | 0,07 | 0,2 | |
| | DA5 | S71 | 364 | 8,4 | | 0,48 | 40 | | 0,04 | 3,63 | | 0,07 | 0,7 | |
| | | S72 | 235 | 0,078 | | 0,17 | 0 | | 0,03 | 0,02 | | 0,06 | 0,0 | |
| | | S73 | 641 | 1,8 | | 0,17 | 3 | | 0,03 | 0,48 | | 0,06 | 0,1 | |
| | PLnd | S74 | 923 | 8,7 | | 0,17 | 15 | | 0,03 | 2,31 | | 0,06 | 0,7 | |
| | | S75 | 937 | 0,12 | | 0,26 | 0 | | 0,04 | 0,05 | | 0,07 | 0,0 | |
| S76 | | 1319 | 2,2 | 0,26 | 6 | 0,04 | 0,89 | 0,07 | 0,2 | | | | | |
| TH3 | S77 | 2825 | 8 | 0,26 | 21 | 0,04 | 3,25 | 0,07 | 0,7 | | | | | |
| | S78 | 61 | 0,17 | 0,54 | 1 | 0,06 | 0,10 | 0,11 | 0,0 | | | | | |
| S79 | 32 | 0,017 | 0,54 | 0 | 0,06 | 0,01 | 0,11 | 0,0 | | | | | | |
| Système | SE-Va | 10434 | 45,885 | 34198 | -- | -- | 123 | -- | -- | 13 | -- | -- | 3 | |
| SE-Vb | TC3 | S80 | 649 | 0,072 | 4 | 0,48 | 0 | 11 | 0,04 | 0,03 | 1 | 0,07 | 0,0 | 0 |
| | | S81 | 79 | 5,2 | | 0,48 | 25 | | 0,04 | 2,25 | | 0,07 | 0,4 | |
| | DA5 | S82 | 161 | 0,087 | | 0,17 | 0 | | 0,03 | 0,02 | | 0,06 | 0,0 | |
| | | S83 | 152 | 8,5 | | 0,17 | 15 | | 0,03 | 2,26 | | 0,06 | 0,7 | |
| | PLnd | S84 | 543 | 0,13 | | 0,26 | 0 | | 0,04 | 0,05 | | 0,07 | 0,0 | |
| S85 | 1284 | 9,5 | 0,26 | 25 | 0,04 | 3,86 | 0,07 | 0,8 | | | | | | |
| Système | SE-Vb | 2869 | 23,489 | 11230 | -- | -- | 31 | -- | -- | 4 | -- | -- | 1 | |