

UNIVERSITÉ MARIEN NGOUABI



FACULTÉ DES LETTRES ET DES SCIENCES HUMAINES

Année 2016

N° d'ordre : 1176

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat

Formation Doctorale: Géographie

Option: Géographie physique

Spécialité: Géomorphologie

Présentée par :

MAYIMA Brice Anicet

ÉROSION HYDRIQUE SOUS PLANTATION D'EUCALYPTUS DES PLATEAUX COTIERS DE POINTE-NOIRE (SUD DU CONGO)

DIRECTEURS DE THÈSE

SAMBA-KIMBATA Marie Joseph, Professeur, Université Marien Nguabi,

TCHOTSOUA Michel, Professeur, Université de N'Gaoundéré

Soutenue publiquement le 20 février 2016

Jury :

Président: Michel BOKO, Professeur, Université d'Abomey-Calavi, Benin

Directeurs : Marie Joseph SAMBA –KIMBATA, Professeur, Université Marien Nguabi, Congo
Michel TCHOTSOUA, Professeur, Université de N'Gaoundéré, Cameroun

Examineurs : Patrick WASSMER, Maître de conférences, Université Louis Pasteur, France

Jean Joël LOUMETO, Maître de conférences, Université Marien Nguabi, Congo

SOMMAIRE

Fiche présentative de la thèse	3
Cadre de coopération ou soutien	.3
Dédicace	.4
Liste des sigles	5
Résumé	6
Summary	7
Avant-propos et remerciements	..8
Introduction	..11
PREMIERE PARTIE: ORIENTATION DE L'ETUDE ET CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	15
CHAPITRE I. ORIENTATION	16
1.1. Contexte, problématique et justification de l'étude	.....16
1.2. Question de recherche	..17
1.3. Objectifs de recherche	..17
1.4. Hypothèse de recherche	.....18
1.5. Etat de la question	.18
1.6. Intérêt de l'étude et choix de la démarche	.24
1.7. Clarification des termes utilisés	25
CHAPITRE II. UN CADRE PHYSIQUE VULNERABLE	31
2.1. Situation géographique	.31
2.2. Un relief de plateaux tabulaires relativement disséqués	32
2.3. Des roches sédimentaires fragiles	.....37
2.4. Des sols très sensibles aux phénomènes d'érosion	39
2.5. Un climat relativement agressif	.41
2.6. Un bilan hydrique à surplus hydrologique	.47
2.7. Une hydrographie dense et dynamique	.....49
2.8. Une végétation diversifiée	.50
CHAPITRE III. DES PAYSAGES AGRICOLES EN PLEINE MUTATION	..53
3.1. De la démographie	.53
3.2. Des activités économiques dominées par la sylviculture	55
3.3. L'état de l'occupation du sol en 2000 et 2012	60
Conclusion partielle de la première partie	63

DEUXIEME PARTIE. MATERIEL ET METHODES D'APPROCHE	64
CHAPITRE IV. SITES EXPERIMENTAUX ET MATERIEL UTILISE	..65
4.1. Caractérisation des sites expérimentaux	65
4.2. Instruments de mesures	..73
CHAPITRE V. APPROCHE METHODOLOGIQUE	75
5.1. Recherche documentaire	75
5.2. Travail de terrain	75
5.3. Précision et validité des résultats	.....95
5.4. Traitement statistique des données et interprétation	95
Conclusion partielle de la deuxième partie	96
TROISIEME PARTIE. RESULTATS, DISCUSSION ET SUGGESTIONS	97
CHAPITRE VI. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS SOUS PLUIES SIMULEES	..98
6.1. Résultats du ruissellement et de l'érosion sur différents sites	98
6.2. Résultats ruissellement et l'érosion de l'ensemble des sites	116
6.3. Variable inter-sites et extra-sites du ruissellement	117
CHAPITRE VII. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS SOUS PLUIES NATURELLES	.120
7.1. Précipitations	120
7.2. Résultats du ruissellement et l'érosion sur différents sites	121
7.3. Comparaison des résultats à différentes échelles de mesures	128
CHAPITRE VIII. CHAPITRE VIII. L'EROSION HYDRIQUE A L'EXTERIEUR ET AUX ABORDS DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS ET METHODES DE LUTTE ANTIEROSIVE	131
8.1. La dynamique de l'érosion hydrique autour des plantations d'eucalyptus	131
8.2. Suggestion sur les méthodes de lutte contre l'érosion hydrique	139 ..
Conclusion partielle de la troisième partie	144
Conclusion générale et perspectives	148
Références bibliographiques.....	152
Liste des figures	..174
Liste des tableaux	177
Liste des photos	..179
Annexes	..182
Table des matières	192

FICHE PRÉSENTATIVE DE LA THÈSE

Nom et Prénoms de l'auteur : **MAYIMA Brice Anicet**

Intitulé du travail : Erosion hydrique sous plantation d'eucalyptus des plateaux côtiers de Pointe- Noire (sud du Congo).

Encadrant :

Nom, prénoms et grade: **SAMBA-KIMBATA Marie Joseph**, Professeur des Universités, CAMES

Laboratoire et institution : Laboratoire de Géographie physique, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Université Marien Ngouabi (Congo)

Co- encadrant:

Nom, prénoms et grade: **TCHOTSOUA Michel**, Professeur des Universités, N'Gaoundéré (Cameroun)

Laboratoire et institution : Laboratoire de géomatique de la Faculté des Arts, Lettres et Sciences Humaines de l'Université de N'Gaoundéré (Cameroun)

Lieux de réalisation:

Ce travail a été réalisé respectivement au sein de la cellule d'Aménagement de la société gérante du massif E.F.C (Eucalyptus Fibre du Congo) et au Laboratoire de Géographie physique, département de géographie.

Période de réalisation du travail de thèse : Janvier 2011 – Décembre 2016

CADRE DE COOPERATION OU SOUTIEN

*CRDPI : Centre de Recherche sur la Durabilité et la Productivité des Plantations

Industrielles *BCBTP : Bureau d'étude et de Contrôle des Bâtiments et Travaux Publics

DÉDICACE

A la mémoire de notre:

- ✓ *défunt Père Patrice MAYIMA*
- ✓ *défunt fils aîné Jespère MAYIMA BANTSIMBA, mort trop tôt*
- ✓ *défunte tante maternelle Germaine NGOUOMO*

LISTE DES SIGLES

CRDPI ex UR2PI : Centre de Recherche sur la Durabilité et la Productivité des Plantations Industrielles

CIRAD : Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement

CIFOR: Center International Forestry Research

CF: Coupe-feu

DA: Densité apparente

EFC : Eucalyptus Fibre Congo

EVB : Eucalyptus Vieux brûlés

EV : Eucalyptus Vieux

EJ : Eucalyptus Jeunes

EJB : Eucalyptus Jeunes brûlés

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

INRA: Institut National de Recherche Agronomique

FLSH : Faculté des Lettres et des Sciences Humaines

K_{rm} : Coefficient de ruissellement moyen

P : Piste

S : Savane

SB : Savane brûlée

SF : Surface fermée

SO: Surface ouverte

SC: Surface couverte

UAIC : Unité d’Afforestation Industrielle du Congo

RESUMÉ

Autour de Pointe-Noire, en République du Congo, les plateaux côtiers, constitués de sables pauvres et profonds, font l'objet d'un programme d'afforestation intensive par des eucalyptus clonaux. L'objectif visé par cette étude est d'évaluer l'impact de cette afforestation sur la genèse du ruissellement puis de l'érosion mécanique. Ainsi, pour atteindre cet objectif, le ruissellement et l'érosion ont été mesurés sous pluies simulées et sous pluies naturelles sur des parcelles de 1m² et de 90 m². Parallèlement, des états de surface ont été évalués par la méthode de points quadra. Les résultats obtenus indiquent que les taux du ruissellement et de l'érosion varient en fonction des états de surface. Ainsi, les plus importants taux de ruissellement et d'érosion ont été enregistrés sur piste et coupe-feux (75%) maximum et (4t/ha) maximum. Cet important taux de ruissellement et d'érosion s'explique par l'encroutement et le tassement du sol (100% de taux de fermeture et 90% du taux de dénudation). En revanche, quelle que soit l'échelle de mesure considérée, sous plantations d'eucalyptus, les coefficients de ruissellement varient de 8,3 à 40% et sont intimement liés au taux de couverture et de fermeture du sol par la litière. Ce taux de ruissellement important s'accompagne d'une faible érosion mécanique qui varie de 0,02t/ha/an à 0,99t/ha/an. Cette faible érosion mécanique est la preuve que la litière est efficace pour protéger le sol contre l'effet splash. Par ailleurs, sous savane qu'elle soit brûlée ou non, le taux de ruissellement est inférieur à 1% et s'explique respectivement par les activités de mésofaunes très actives dans ces savanes et de la texture du sol très filtrant. A l'extérieur des plantations, les ruissellements se manifestent par un ravinement intense qui affecte les pistes, coupe-feux et redynamise les vieilles formes figées ou en cours de figement. Quelques suggestions de lutte contre l'érosion qui ont pour objectif principal la réduction et la gestion des eaux de ruissellement sont proposées.

Mots clés : Congo, Pointe-Noire, plantation d'eucalyptus, érosion hydrique, ruissellement simulateur de pluie, parcelles d'érosion, lutte contre l'érosion,

SUMMARY

Around Pointe-Noire in the Republic of Congo, coastal plateaus formed of poor and deep sands are part of an intensive afforestation program with clonal eucalyptus. This study aims at assessing the impact of this afforestation on the genesis of the streaming and automatic erosion. Thus to reach that goal the streaming and the erosion have been measured under simulated rains and under natural rains on 1 meter states of the surface have been assessed with the quadra points method. Resultats show that the streaming and erosion rates vary according to the states of the surface. Thus, the most important rates of streaming and erosion have been recorded on track and fire-proof (75%) maximum and (4t/ha) maximum. This important rate streaming and erosion is explained by the soil setting and decline (100% of the closure rate and 90% of the stripping rate). On the other hand, whatever the selected mesure scale under eucalyptus plantations, the streaming margins vary from 8.3 to 40% and are closely linked to the soil coverage and closure rates by the bedding. This important streaming rate goes with a weak automatic erosion which varies from 0, 02 t/ha/year to 0, 99 t/ha/year. This weak automatic erosion proves that the bedding is efficient to protect the soil against the splash effect. In addition, under the savannah, be it burnt or not, the streaming rate is less than 1% and is respectively explained by meso-faune activities very intensive in the savannat and high filtering soil texture. Out of plantations, streamings appear through a high gully erosion which tracks, fire-proofs and revitalize old fixed forms or fixing liabilities. Some to suggestions to stop erosion which mainly aim at reducing and manging streaming waters are proposed.

Key words: Congo, Pointe-Noire, Hydric erosion, rain simulator, eucalyptus plantation, erosion compound stopping, hydric erosion, streaming

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

Les travaux qui font l'objet de cette thèse ont été réalisés respectivement au sein de la cellule d'aménagement de la société Eucalyptus Fibre du Congo, au laboratoire de géographie physique du Département de Géographie, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines (FLSH) et au Centre de Recherche sur la Durabilité et la productivité des Plantations Industrielles (CRDPI) à Pointe-Noire.

Tout d'abord, nous témoignons tout notre respect et notre gratitude à l'égard de mes deux Directeurs de thèse, les Professeurs Marie Joseph SAMBA- KIMBATA et Michel TCHOTSOUA, pour l'aide qu'ils m'ont apportée tout au long des quatre années de ce travail. Leur encadrement scientifique a permis de conduire à terme cette thèse.

Nous remercions très chaleureusement les Professeurs Michel BOKO, Jean Joël LOUMETO et Florent BOUDZOUYOU, pour avoir accepté respectivement de Présider et d'examiner ce travail.

Nous tenons également, à remercier très chaleureusement Monsieur Léonard SITOU, Docteur en géomorphologie, Maître - Assistant au département de géographie pour m'avoir encadré scientifiquement en maîtrise et en DEA. Il m'a accompagné sur le terrain où ses qualités scientifiques ont permis de mener à bien ce travail. Ses conseils et orientations ont contribué à l'amélioration de la rédaction de cette thèse.

Au terme de cette étude, nous tenons aussi à rendre hommage à Monsieur Maurice GOMA, Directeur de l'Aménagement de la société Eucalyptus Fibre du Congo, sans qui ce travail n'aurait pu aboutir. Il a rendu possible la mise en place des parcelles d'érosion à Kondi, en mettant à notre disposition un moyen de transport, du matériel et assuré le suivi à travers son équipe d'incendie, durant les 2 ans de la collecte de données sur le terrain.

Nous remercions Monsieur Dieudonné LOUEMBE, géomorphologue au département de géographie, pour ses orientations et ses critiques très pertinentes. Il a lu et corrigé avec beaucoup de rigueur cette thèse.

Nous remercions par la même occasion monsieur Patrick WASSMER, Géomorphologue, Professeur à l'Université de Strasbourg, Faculté de Géographie et

d'Aménagement, qui malgré ses occupations a disposé d'un peu de temps pour lire et corriger cette thèse.

Nous remercions également le Professeur Bonaventure Maurice MENGHO, pour ses conseils et ses encouragements. Il a lu et corrigé cette thèse avec patience.

Nous exprimons aussi notre profonde reconnaissance à la Professeure Berton OFOUEME, Coordinatrice de la formation doctorale de géographie qui, outre ses conseils et ses encouragements, nous a apporté tout le soutien et l'appui nécessaires pour les démarches administratives.

Nous adressons nos sincères remerciements à monsieur Vincent SIMONNEAUX, Ingénieur de recherche à l'IRD-CESBIO, (France), pour ses conseils et orientations à travers les mails et le téléphone. Cette collaboration a été capitale pour la réussite de l'installation des parcelles expérimentales.

Nos remerciements s'adressent aussi à monsieur Éric ROOSE, Directeur de recherches émérite à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Montpellier France, un des grands spécialistes du phénomène d'érosion hydrique qui, malgré sa retraite, continue de communiquer son expérience à la jeune génération que nous sommes. Qu'il trouve ici, l'expression de notre profonde gratitude pour ses conseils et orientations depuis nos travaux de DEA.

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur Jean de Dieu NZILA, Pédologue à l'Ecole Nationale Supérieure pour avoir lu et corrigé cette thèse.

Au CRDPI, nous remercions très sincèrement le personnel chercheurs pour les échanges fructueux que nous avons eus au cours de nos sorties de terrain. Mention spéciale à :

- Louis MARSCHAL, Pédologue pour avoir lu et corrigé mes manuscrits ;
- Jean Claude BOUZOUMOU, Patrick MISSAMBA Lola, Antoine KINANA, Christ MAYINGUIDI pour leur assistance technique ;
- François Walmar NGANGA, nous a aidé dans la collecte des données de terrain.

Enfin, nous remercions :

- Monsieur Dieudonné TSOKINI, Professeur, Doyen de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines (FLSH), pour son soutien multiforme.
- Madame Clémence DITENGO, Maître-Assistante, ancien Chef de département de géographie, pour ses encouragements et ses conseils.
- Monsieur Jean Luc MOUTHOU, Assistant, au Département de géographie, pour ses encouragements.
- Monsieur Guy Roger APONDZA, Maître-Assistant, Responsable du parcours Sciences du Langage, pour ses conseils et encouragements.
- Monsieur Damase NGOUMA, Maître-Assistant, Responsable du parcours type Géographie, pour ses conseils et encouragements.

Les autres enseignants du Département de géographie à qui nous exprimons ici l'expression de notre profonde reconnaissance, pour tout ce qu'ils ont fait pour nous dans le domaine de la formation scientifique et pédagogique.

Merci à ma femme et mes enfants qui ont toujours été pour moi d'un grand soutien moral (MANGA Fanny, MAYIMA Claude, MAYIMA Clowé, MAYIMA NGOUOMO Stéra Jasmine et BOUSALA Noblesse).

Les collègues et amis qui, de près ou de loin, m'ont apporté un soutien multiforme nécessaire à la réalisation de ce travail: MABONDZO Médard, Hugues GOMA MBOUMBA, Martin MASSOUANGUI, Commandant MOUNGUI GAMBOU et Idriss MBOUKA MILANDOU, chargés de cours au département de géographie (FLSH), Guy Dieudonné MOUKANDI N'KAYA, Assistant à l'ENSEP, Boris OSSOBA, Assistant au Département des Langues Vivantes et Etrangères (LVE), Laurent NGANKAMA, NDOUNIA Amen Krisna et Maxim AKANOKABIA tous Maîtres -assistants au Département de Philosophie (FLSH), Madame OSSETE OGANGNIA , Chef de service de la scolarité à la FLSH, Joseph Moubouilou, ingénieure des eaux et forêts, BOTOMBI Mavie, NGOUASSA MOUSSOUNDA Gérald, KIPOLO NGOMA Serge Patrick étudiants en Master II de Géographie.

INTRODUCTION

Les forêts occupent actuellement 31% de la superficie des terres émergées de la planète et jouent un rôle capital à la fois pour le bien-être de l'humanité et pour l'équilibre terrestre (FAO, 2010). Elles contribuent à conserver l'eau et les sols en favorisant l'infiltration, en réduisant la vitesse du ruissellement et l'érosion des surfaces et en diminuant la sédimentation. Les forêts jouent également un rôle dans la filtration des polluants de l'eau, la régulation du débit des rivières, la réduction des inondations et la production des précipitations (Lavabre & Andreassian, 2000). Enfin, dans la lutte pour la réduction des gaz à effet de serre et contre les conséquences néfastes du changement climatique, les écosystèmes forestiers représentent un enjeu important pour la planète.

C'est en prenant conscience de ces enjeux que les conférences internationales sur l'environnement tenues respectivement à Stockholm en 1972, à Strasbourg en 1990, à Rio de Janeiro en 1992, à Helsinki en 1993 et à Kyoto (1996) et récemment en Johannesburg en 2002, ont forgé le concept de développement durable qui met l'accent sur la protection durable des massifs forestiers du monde.

Seulement, les forêts naturelles font l'objet de pressions importantes qui réduisent leur superficie et leur biodiversité. En effet, au cours du XX^{ème} siècle, la moitié des forêts de la planète a été exploitée à un rythme bien plus rapide que celui de la régénération de celles qui les remplacent. Dans les pays tropicaux, seulement 1 ha en moyenne est replanté pour 10 ha de forêt défrichée (Poore, 2000).

Dans ce contexte de baisse des ressources forestières naturelles, doublé d'une demande croissante en bois combustibles et à usage industriel, notamment dans les pays tropicaux en développement dont la population est en expansion, les plantations d'eucalyptus représentent une option majeure pour satisfaire les besoins en produits ligneux forestiers et, par conséquent, diminuer la pression sur les forêts naturelles. C'est pourquoi, la proportion des plantations industrielles a fortement augmenté ces dernières années. En 1995, elles représentaient environ 63% des surfaces plantées en eucalyptus (Pandey, 1997).

De même, dans les zones péri-urbaines de nombreux pays en développement, le bois d'eucalyptus est très utilisé pour la production de charbon, de bois de feu et de bois ronds pour la construction (Bouvet, 1999).

Aujourd'hui, on peut mesurer la popularité des eucalyptus au fait que plus de 80 pays ont opté pour cette essence de reboisement. Le Congo, bien que possédant des forêts naturelles aux ressources ligneuses importantes, avec environ 20 millions d'hectares de forêts, soit les 3/5 de la superficie du pays (Atlas du Congo, 2001), s'y est intéressé.

En effet, c'est en 1936 que les industriels cherchant à produire de la pâte à papier et du bois de chauffe pour la ville de Pointe-Noire et le chemin de fer Congo-Océan, ont réfléchi sur le remplacement des savanes côtières par des plantations industrielles composées essentiellement des essences à croissance rapide et mono spécifique, notamment les eucalyptus de type local (Groulez, 1964). Ceux-ci présentent des caractères d'adaptation aux conditions climatiques équatoriales pouvant justifier son utilisation pour les reboisements et l'afforestation au Congo (Bouvet, 1999).

C'est ainsi que dans les années 1970, juste après les indépendances, le choix fut porté sur deux hybrides naturels d'eucalyptus (*Eucalyptus PF1* ; *E. tereticornis* x *E. grandis*), remplacés, de plus en plus, par l'hybride artificiel *E. Urophylla* x *E. grandis*, plus productif (Bertaux, 2000, Safou-Matondo *et al.*, 2001).

Après des années d'étude de faisabilité, il fut lancé en 1988 une sylviculture mécanisée d'eucalyptus. Après les savanes péri-urbaines de Pointe-Noire, l'opération s'est étendue au plateau de Kayes, au nord du fleuve Kouilou sur plus de 30.000 hectares (Fig. 1).

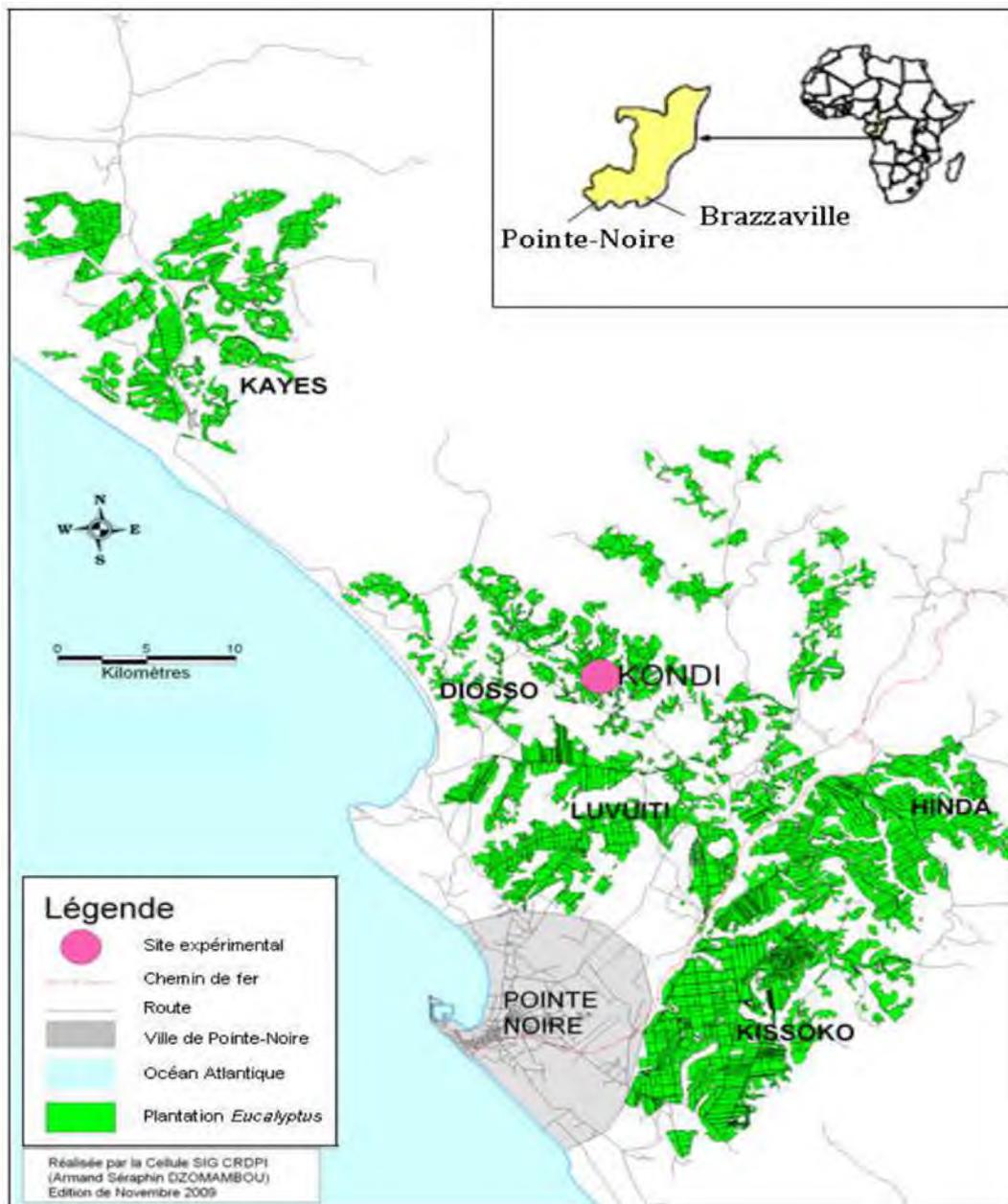


Figure.1 : Localisation des plantations d’eucalyptus de la région de Pointe-Noire et du site expérimental de Kondi

Cependant, ce massif d’eucalyptus aux enjeux multiples est un nouvel écosystème dont l’impact sur l’environnement mérite d’être connu pour garantir, par des mesures appropriées, non seulement la durabilité et la rentabilité du projet mais la préservation de l’équilibre morphogénétique de ces plateaux côtiers.

C'est pour contribuer à la connaissance des impacts de l'exploitation de ce massif forestier d'eucalyptus afin de concilier cette afforestation aux nouvelles exigences du développement durable que cette étude qui porte sur « Erosion hydrique sous plantation d'eucalyptus au sud du Congo », a été initiée. Elle est subdivisée en trois parties :

la première partie est consacrée à l'orientation de l'étude et cadre géographique de la zone d'étude

la deuxième présente le matériel de l'étude, les méthodes adoptées ;

la troisième partie présente et discute les résultats obtenus.

A la suite des conclusions partielles, la conclusion générale fait la synthèse de principaux résultats obtenus au cours de l'étude et présente les perspectives de recherche pouvant être mises en œuvre afin d'enrichir plus encore nos connaissances sur l'érosion hydrique des sols sous plantation d'eucalyptus au Congo.

PREMIÈRE PARTIE: ORIENTATION DE L'ÉTUDE ET CADRE GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

L'érosion hydrique est un processus complexe qui met en interaction plusieurs facteurs tant biophysiques qu'humains. Sur le plateau côtier de Pointe-Noire et sous formations végétales d'eucalyptus et de savane, les facteurs biophysiques jouent un rôle important dans le déclenchement et le maintien de cette dynamique actuelle.

Ainsi, dans la première partie de cette étude, après avoir replacé le sujet dans le contexte plus large des recherches menées sur l'érosion hydrique sous plantation d'eucalyptus et dégagé la problématique dans le chapitre 1, les principales caractéristiques des plateaux côtiers, les facteurs physiques et anthropiques susceptibles d'expliquer sur ces plateaux cette dynamique sont cernés respectivement aux chapitres 2 et 3.

CHAPITRE I

ORIENTATION DE L'ÉTUDE

Le présent chapitre expose le problème à étudier, les questions de recherche soulevées et la justification de l'étude. Il fait aussi l'état des connaissances, dégage les enjeux de l'étude et clarifie les termes utilisés.

1.1. Contexte, problématique et justification de l'étude

Érosion des sols, en particulier l'érosion hydrique est un phénomène naturel qui résulte de trois processus: le détachement des particules du sol, transport solide et sédimentation ou dépôt. Elle concerne la couche arable du sol siège de la vie microbienne et végétale.

La sylviculture développée depuis 1988 sur les plateaux côtiers autour de Pointe-Noire implique plusieurs modifications pouvant avoir des effets sur l'équilibre du milieu. En fait, l'afforestation intensive d'eucalyptus est à l'origine non seulement la destruction de la savane (donc des mises à nu des terrains pentus pour la plupart), mais aussi l'ouverture de nombreuses pistes d'accès au sein du massif. Ces opérations créent des ruptures d'équilibre morphogénétique qui se manifestent par des phénomènes d'érosion hydrique. De ce fait, malgré son rôle important dans le tissu socio-économique et environnemental du pays, cette afforestation, telle que conduite, constitue un véritable problème environnemental.

En effet, sur les plateaux côtiers congolais, la principale menace était constituée jusque-là par la dynamique des cirques d'érosions, phénomène très ancien qui continue d'évoluer de manière spectaculaire en réduisant les surfaces exploitables (Sitou, 1994). Aujourd'hui on observe une dynamique érosive qui commence à se développer au sein et à la périphérie des massifs forestiers d'eucalyptus.

L'encroûtement important des sols ainsi que le réseau de pistes mis en place par l'industriel provoquent des ruissellements importants qui se manifestent par des ravinements de plus en plus marqués. Ces ravinements rendent difficiles les opérations d'exploitation des parcelles, conduisant ainsi l'industriel à abandonner certaines d'entre elles. Les ruissellements ont également pour conséquence, outre l'érosion mécanique, l'appauvrissement des sols par le transfert hors des plantations des nutriments contenus dans les premiers centimètres du sol, éléments très indispensables à la nutrition des végétaux (Roose, 1973).

Des mesures de perte de nutriments par l'érosion et le ruissellement sur les plantations, réalisées par la méthode de simulation des pluies sur parcelles de 1m² ont donné des concentrations de 23,2 ± 13,7 mg/l de carbone moyen dissous dans les eaux de ruissellement et de 1,53 ± 0,68 mg/l d'azote (Sola et *al.*, 2010).

La présente étude cherche ainsi à déterminer le rôle de cette sylviculture et la genèse et l'abondance des ruissellements, responsables de la dégradation des sols par l'érosion hydrique, observées dans le périmètre des parcelles d'eucalyptus.

1.2. Questions de recherche

1.2.1. Question principale

Quel rôle joue l'afforestation des savanes côtières par les eucalyptus dans la dynamique érosive actuelle observée au sein et à la périphérie de ces massifs forestiers ?

1.2.2. Questions secondaires

Les principales questions secondaires suivantes ont orienté nos investigations :

- ✓ quels sont les facteurs qui commandent le ruissellement et l'érosion hydrique dans les plantations d'eucalyptus des plateaux côtiers ?
- ✓ quel est le taux actuel de perte en sol engendrée par ces ruissellements ?
- ✓ quelles sont les conséquences de ces ruissellements à l'intérieur et autour des plantations d'eucalyptus ?
- ✓ quelles sont alors les différentes approches à mener pour lutter contre cette érosion hydrique ?

1.3. Objectifs de recherche

1.3.1. Objectif général

L'objectif général que nous nous sommes fixé en entreprenant cette recherche est d'étudier la dynamique érosive au sein et à la périphérie des massifs forestiers d'eucalyptus des plateaux côtiers du Congo, autour de Pointe-Noire.

1.3.2. Objectifs spécifiques

A travers cet objectif général, nous voudrions de façon spécifique:

- ✓ déterminer les facteurs de risques de ruissellement et d'érosion sous plantations d'eucalyptus ;
- ✓ quantifier le ruissellement et les pertes en terre au sein et à la périphérie des plantations d'eucalyptus ;
- ✓ dégager les conséquences des ruissellements au sein et à la périphérie des plantations d'eucalyptus ;
- ✓ proposer quelques méthodes de lutte contre le ruissellement et l'érosion hydrique des sols dans la zone.

1.4. Hypothèses de recherche

1.4.1. Hypothèse principale

La dynamique récente au sein et aux abords des plantations d'eucalyptus est l'œuvre de la plantation intensive d'eucalyptus.

1.4.2. Hypothèses secondaires

Pour atteindre les objectifs ci-dessus, nous avons émis quatre hypothèses susceptibles d'être confirmées ou infirmées au cours de cette étude :

- ✓ les activités anthropiques liées à cette culture intensive, à travers l'itinéraire sylvicole sont des facteurs des risques de ruissellement et d'érosion hydrique ;
- ✓ l'abondance des ruissellements sous plantations d'eucalyptus s'explique par la composition et l'épaisseur de la litière;
- ✓ les ruissellements abondants sous plantations d'eucalyptus engendrent des phénomènes d'érosion au sein et à la périphérie desdites plantations et redynamise les anciens cirques d'érosion ;
- ✓ quelques méthodes antiérosives développées par l'industriel, demeurent insuffisantes et peuvent être appuyées par d'autres.

1.5. État de la question sur l'érosion hydrique sous plantation d'eucalyptus

Les travaux de recherches sur la question de l'érosion hydrique sous plantations d'eucalyptus dans le contexte d'afforestation sont inexistant à notre connaissance dans le

monde et plus particulièrement en République du Congo. En revanche, plusieurs travaux de recherches ont abordé la question de l'érosion sous cultures (maïs, bananes, arachides, canne à sucre, forêt naturelle, etc.).

Ainsi, les travaux de Roose (1977), Wassmer (1981), Bolline (1982), Jarry (1987), Bouregghda, (1988), Mietton (1988), Moeyerson (1989), Boli *et al.* (1993), Tchotsoua (1994), Simonneaux (1996), El Garouani *et al.* (2005) Cheggour (2008), et Mounirou (2012), sont les principaux que nous avons exploités en raison de leurs thèmes proches du notre. De même, les travaux de Kitsoukou (1992) sur l'érosion marine et de Sitou (1994) sur les cirques d'érosion sur les plateaux côtiers de Pointe-Noire, travaux menés dans le cadre de leurs doctorats, fournissent plusieurs informations scientifiques sur cette région côtière du Congo.

Roose (1977), a quantifié durant vingt années le ruissellement et l'érosion hydrique en petites parcelles expérimentales à Adiopodoumé (Côte-d'Ivoire). L'étude a été réalisée sur des sols ferrallitiques et ferrugineux (à dominance d'argile kaolinitique non gonflante). Elles sont comparées aux études similaires faites en Afrique de l'Ouest utilisant l'équation de Wischmeier et Smith (1960). L'auteur, à travers la parcelle de Wischmeier et Smith, a apprécié l'importance relative de cinq facteurs multiplicatifs de cette équation dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion (pente, sol, couvert végétal, érosivité de pluies et pratique antiérosive). Les résultats obtenus par l'auteur sur parcelles expérimentales sont parmi les premiers dans ce domaine en Afrique. L'importance de ces travaux pour notre étude réside, dans l'approche méthodologique adoptée.

Les travaux de Wassmer (1981), avaient pour objectif, l'élaboration d'une méthode cartographique permettant la spatialisation des risques d'érosion des sols sous culture dans une région montagneuse de la crête Zaïre-Nil au Rwanda.

Les recherches ont été menées conjointement sur parcelles expérimentales de 50 m² de superficie afin de tester, l'efficacité de certaines associations de culture, des façons culturales et des techniques antiérosives biologiques dans la protection des sols contre l'érosion hydrique. La technique antiérosive retenue par l'auteur est le reboisement par des eucalyptus des sites dégradés.

Les résultats obtenus par Wassmer sont intéressants pour notre étude, malgré le contexte morfo-climatique différent de notre zone (fortes pentes supérieures à 60%, indice d'agressivité climatique légèrement supérieur). Par ailleurs, l'auteur a étudié des eucalyptus utilisés dans ce contexte de reboisement pour lutter contre l'érosion hydrique. Ainsi, du point

de vue expérimental, cette étude constitue une référence qui nous a orienté dans l'interprétation et l'analyse de nos propres résultats.

Bolline, A. (1982), au cours de ces travaux est passé en revue tous les facteurs de l'érosion hydrique des sols limoneux : formes, vitesse, conséquences et processus qui interviennent dans cette dynamique érosive. Dans cette étude, le modèle américain de prévision de l'érosion de Wischmeier et Smith (USLE) a été adapté au contexte de la Belgique. Ainsi, des facteurs contrôlant l'érosion ont été quantifiés à partir de mesures effectuées sur parcelles expérimentales. Par ailleurs, l'auteur a fait une description du phénomène de suffosion, lié aux propriétés physiques des limons. Cette étude est particulièrement intéressante pour nous, parce que les travaux ont été menés avec une approche méthodologique similaire au nôtre.

Les travaux de Jarry (1987) en France, avaient pour objectif de quantifier le ruissellement. Pour atteindre cet objectif, l'auteur a privilégié l'approche naturaliste basée sur des relations entre pluie et écoulement sur un bassin versant agricole. Pour l'auteur, le choix de cette approche se justifie du fait que les méthodes basées sur la physiographie des bassins versant n'ont pas abouti.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence d'une part, la grande variabilité des coefficients de ruissellement observés, de 1 à 400 pour la même pluie sur une zone a priori homogène de 80 hectares. A l'échelle du mètre carré, il n'y a pas d'homogénéité. D'autre part, il n'y a pas de relation entre coefficient de ruissellement et humidité de surface. La texture du sol et le type de culture pratiqué sont, d'après l'auteur, des paramètres explicatifs plausibles. Pour nous, l'intérêt des travaux de Jarry par rapport à notre thèse réside dans l'approche méthodologique utilisée pour quantifier le ruissellement.

Les travaux de Bouregghda (1988), avaient pour objectifs, de déterminer l'influence des caractéristiques physiques du sol vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion. Pour atteindre cet objectif, un simulateur de pluie a été utilisé. L'auteur a comparé des sites différents du point de vue des types de sol et du couvert végétal. En Lozère, un sol filtrant et la présence de litière donnent une bonne infiltrabilité. En revanche, les limons argileux de la Sarthe, s'ils permettent une bonne infiltration lorsque la surface est rugueuse (labour, par exemple), se dégradent vite, sous l'effet de la battance des gouttes de pluie. A Orgeval, l'abondance de mottes sur le sol a donné à ce dernier une bonne résistance au ruissellement. L'auteur a conclu en montrant, que

l'état de surface du sol, le traitement du sol et les conditions climatiques sont tous des facteurs de déclenchement du ruissellement et de l'érosion.

Les travaux de Mietton (1988), ont eu comme objectif, l'étude de la dynamique érosive sous savane en milieu tropical sec. Après la description du cadre naturel dans lequel se manifeste cette érosion, l'auteur a dégagé les différents facteurs qui commandent la dynamique des milieux tropicaux en distinguant ceux qui interviennent directement (les pluies, les vents) et indirectement (les sols, les pentes et la végétation) dans le déclenchement de l'érosion. Il a, travers cette étude mis en exergue non seulement le rôle important des classes des hauteurs des pluies et des fréquences des pluies sur l'érosion, mais aussi l'intérêt de prendre en compte la notion de récurrence des précipitations maximales en 30 jours en lieu et place des précipitations mensuelles.

Par ailleurs, l'auteur a montré à travers cette étude que les sols, les pentes et la végétation sont des facteurs qui contrôlent cette dynamique érosive. Au cours de cette étude, la dynamique érosive a été mesurée, les processus et mécanismes de leur évolution ont été mis en évidence à différentes échelles (parcelles expérimentales, bassin-versant).

Au terme de cette étude, l'auteur a montré une grande variabilité entre les taux de ruissellement et les taux de dégradation spécifique. Celle-ci et serait liée à la diversité des paysages concernés (savane naturelle pénestable et des savanes dégradées par les activités anthropiques). Enfin, il a présenté les différentes méthodes de lutte contre l'érosion appliquées par les paysans et a fait un bilan critique de ces méthodes.

L'intérêt de cette étude de Mietton pour notre thèse réside dans les approches adoptées pour quantifier le ruissellement et l'érosion sous savane et dans son analyse qualitative et quantitative de la dynamique érosive sous un climat agressif comme le nôtre dans un environnement de savane.

Les travaux de Moeyerson (1989), ont décrit les processus géomorphologiques qui affectent la colline de Rwaza (Runyingabutare). L'auteur a fait un inventaire exhaustif des types de mouvements de masses. Les mesures de la reptation effectuées sur la colline de Rwaza ont contribué à une meilleure compréhension des mécanismes de ces mouvements de masses.

L'auteur après avoir mis en évidence, l'existence de ravinement et de l'érosion diffuse, a dégagé les causes. Par ailleurs, l'auteur a mesuré le taux de l'érosion diffuse et démontré ses relations avec les saisons et le calendrier agricole. En dépit des fortes pentes de la zone d'étude et des méthodes de lutte mises en œuvre, les travaux de Moeyerson sont une référence pour notre thèse.

Les travaux de Tchotsoua (1994), ont permis à cet auteur à travers la combinaison de deux approches (qualitative et quantitative) de mettre en évidence, les principaux facteurs et processus qui régissent l'érosion hydrique sur le site de la ville de Yaoundé.

Par ailleurs, l'auteur fait une description intéressante du rôle des termites et des vers de terre dans le comportement hydrodynamique des sols de Yaoundé. Pour nous, l'intérêt des travaux de Tchotsoua réside d'une part, dans l'approche qu'il a utilisée pour mesurer l'érosion hydrique et d'autre part, dans la description détaillée des facteurs naturels de cette érosion.

Kitsoukou (1992), dans son étude, a quantifié le recul du trait de côte et a fait une analyse détaillée des processus et mécanismes de l'érosion marine qui affecte la côte ponténégrine. Cette étude nous a permis d'approfondir nos connaissances sur la géomorphologie de notre zone d'étude.

Les travaux de Boli et *al.* (1993), ont montré qu'au nord du Cameroun, les sols ferrugineux sableux de la savane font l'objet d'une intensification des cultures. Cette intensification fait appel au labour à la charrue, aux engrais minéraux, aux herbicides, à la protection phytosanitaire et aux variétés améliorées. Elle conduit à terme à la dégradation des terres par l'érosion quand celle-ci n'est pas suffisamment contrôlée. Cette érosion serait, à l'origine de la baisse de productivité des terres avec pour conséquences la dégradation des propriétés physiques, et finalement la fatigue du sol, incapable de stocker l'eau et les nutriments indispensables à la culture intensive. Les pratiques culturales sont mises en cause, particulièrement le labour qui expose le sol nu à l'agressivité des premiers orages. Les résultats auxquels ces auteurs sont parvenus, nous servent de comparaison car les techniques de culture des eucalyptus et le contexte climatique et pédologique sont plus ou moins identiques à notre zone d'étude.

Sitou (1994), a fait une analyse et une interprétation géomorphologique des cirques d'érosion qui affectent notre zone d'étude. Il a décrit la typologie de ces cirques, leur mode de formation, leur morphologie et leur évolution.

S'appuyant sur la photogrammétrie, l'auteur a quantifié la dynamique actuelle et fait une étude diachronique des cirques de Diosso dont la mise en place remonte, au retour des pluies du kibangien (vers 12.000 ans BP). Outre les données géomorphologiques de notre zone d'étude, cette thèse contient une base bibliographique qui nous a été d'une grande utilité.

Les travaux de Simonneaux (1996), intitulés «Généralisation d'images satellites classées pour leur intégration à un SIG. In Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographiques » avaient pour objectif la constitution d'une base de données dans un SIG consacrée à l'étude de l'état de dégradation des terres au Togo. Pour atteindre cet objectif, l'auteur a adopté deux approches : la première a concerné les classes représentées par des plages de surface faible mais que leur juxtaposition sur de grandes étendues rend significatives (ex : cultures dispersées dans la savane).

La deuxième approche consistait à supprimer les plages en dessous d'une certaine épaisseur, puis à boucher les lacunes obtenues par la classe la plus proche. Au terme de cette étude, l'auteur est parvenu à répondre à quelques-uns des problèmes posés par l'intégration de la télédétection SIG dans une base de données en permettant, sans intervention manuelle fastidieuse, d'incorporer les résultats de télédétection à une base de données vectorielle constituée. Cette étude a un intérêt pour notre thèse, car elle a aidé à terme pour constituer une base de données SIG dans la perspective d'analyser le milieu naturel et l'érosion.

El Garouani et *al.* (2005) a montré que le comportement hydrodynamique des sols est, fonction des états de surface et des types de sols, dans un bassin versant. Selon ces auteurs, l'étude des processus d'érosion présente un intérêt considérable pour l'utilisation optimale et durable des sols. A cet effet, que pour évaluer l'érosion hydrique et l'infiltration dans le bassin versant de l'oued Jamaa dans le Pré-Rif Marocain, ils ont utilisé l'approche par télédétection spatiale et le système d'information géographique (SIG). Les résultats qu'ils ont obtenus montrent que l'infiltration et l'érosion varient en fonction du type d'occupation de sols, de la structure du sol, et ont des conséquences sur le transfert solide. Les expérimentations sur le

terrain (mesure d'infiltration) confirment les estimations des pertes en sol données par le modèle USLE (équation universelle de perte de sol de Wischmeier).

Les travaux de Cheggour (2008) avaient pour but, quantification de l'érosion hydrique dans un bassin versant montagneux semi-aride de la Rhéraya au Maroc. Pour atteindre cet objectif, l'auteur a sélectionné trois types d'occupation de sols (site de plantation de pins, site de parcours et site de ravine). L'auteur a adopté l'approche expérimentale basée sur l'utilisation des tests d'infiltrométrie sur parcelle de 1m² et sur parcelles d'érosion de 120 m² sous pluies naturelles.

L'intérêt des travaux de Cheggour par rapport à notre thèse réside tout particulièrement sur la thématique abordée, l'approche expérimentale par simulation des pluies et sous pluie naturelle pour les mesures du ruissellement et de l'érosion à des échelles multiples.

Mounirou (2012), au cours de ces travaux a cherché à comprendre les processus de ruissellement et de l'érosion dans différents environnements et à différentes échelles spatiales. Pour atteindre cet objectif, l'auteur a adopté une approche expérimentale *in situ* sur des parcelles de quelques dizaines de m². L'intérêt de cette étude réside dans la méthode adoptée par l'auteur.

Ainsi, comme on peut le constater, plusieurs études existent sur l'évaluation de l'impact de la couverture végétale sur l'érosion des sols. Mais, sur les plateaux côtiers autour de Pointe-Noire, nos travaux sont les premiers sous massif forestiers d'eucalyptus issus d'une afforestation.

1.6. Intérêt de l'étude et choix de la démarche

L'intérêt de cette étude réside à deux niveaux : sur le plan socio-économique et scientifique. Sur le plan socio-économique, la culture intensive d'eucalyptus procure des emplois aux populations et constitue une source d'entrée de devises pour l'économie nationale. Les résidus d'exploitation sont utilisés comme bois de chauffe et pour la fabrication du charbon de bois, réduisant ainsi de façon significative, la pression qu'exercent les populations sur les forêts naturelles existantes dans la zone (Hamel et Laclau, 1996 et Bouvet, 1999). Il importe donc de cerner le phénomène du ruissellement et de l'érosion générés dans ces massifs forestiers et éventuellement proposer des mesures et des actions de lutte, ceci dans le but de pérenniser l'activité.

Sur le plan scientifique, les résultats escomptés sont d'une grande importance pour la communauté scientifique qui doit, non seulement conserver les sols comme support, mais aussi et surtout concilier la rentabilité de l'entreprise aux nouvelles exigences du développement durable qui vise le maintien de l'équilibre morphogénétique des écosystèmes en place.

Par ailleurs, ce massif forestier joue un rôle important dans la séquestration du carbone (gaz à effet de serre), contribuant de ce fait à la lutte contre le réchauffement climatique (Poore et Fries, 1986 ; Abbasi et Vinithan, 1997, Nouvellon et *al.*, 2001 et Saint-André et *al.*, 2005). On comprend dès lors l'intérêt de la conservation de ces forêts d'eucalyptus sur le plan écologique.

Enfin, cette recherche constitue une première approche qui nous permettra, à terme, d'affiner nos connaissances sur la dynamique actuelle du ruissellement et de l'érosion en liaison avec les plantations d'eucalyptus dans un contexte d'afforestation où aucune mesure de terrain n'était disponible.

Afin de mieux répondre, d'une part aux multiples questions de recherche que nous nous sommes posées, et d'autre part, vérifier nos hypothèses de recherche, l'approche adoptée est expérimentale et basée sur la simulation de pluie sur parcelle de 1m² et sous pluie naturelle sur des parcelles de 90 m². Le choix de la méthode expérimentale nous est apparue adaptée, voire indispensable, pour tester l'aptitude des différents sites à générer le ruissellement et pour étudier les modalités de l'érosion hydrique sous plantation d'eucalyptus dans une perspective de cartographie des risques.

1.7. Clarification des termes utilisés

Il s'agit, ici, de définir chaque concept et terme que nous avons utilisés dans ce travail, en donnant une connotation spécifique qui tienne compte du contexte local où la recherche est a été menée.

1.7.1. Eucalyptus

Le nom eucalyptus d'après Laclau (2001) provient du grec *eu* (bien) et *kaliptos* (couvert). Il évoque l'opercule recouvrant étamines et pistil, dont les variations au sein du genre permettent de classer les espèces. L'eucalyptus est l'une des essences forestières de la famille des Myrtacées originaire d'Australie et des îles de la Sonde. Le genre *eucalyptus* comprend 7 sous-genres et environ 700 espèces. Leur nombre précis évolue au fil des études taxonomiques. Les

eucalyptus ont été introduits dans des latitudes et des conditions pédoclimatiques très diverses (Bouvet, 1999).

La plupart des espèces utilisées en plantation appartiennent au sous genre *Symphyomyrthus* qui est le plus contrasté par la diversité des formes ainsi que par la variété des habitats (Cossalter *et al.*, 1999). Depuis plusieurs années, des travaux de recherche forestière entrepris au CRDPI en matière d'amélioration génétique et bouturage de l'eucalyptus ont débouché sur la création des clones d'eucalyptus hybrides issus de l'hybride artificiel (hybride E. *Urophylla* x E. *grandis* et E.*urophylla* x E.*pellita*) Saya *et al.*, (2008).

Dans le cadre de cette étude, nos expériences ont été réalisées sur les clones 1-41, l'un des plus productifs de l'hybride eucalyptus (Hermeline, 1985). Il est aussi l'un des plus représentatifs des eucalyptus avec 16 % de la superficie totale des plantations au monde.

1.7.2. Simulateur de pluie

Le simulateur de pluie est un dispositif ou appareil qui permet de simuler des pluies artificielles (pluie standard approchant les caractéristiques d'une pluie naturelle) sur une parcelle, afin de mesurer le ruissellement et les pertes en terre induits (Barthes, 1998). A leur création, ces simulateurs furent de gros appareillages, d'environ dix à trente mètres de hauteur, et pouvant arroser des surfaces approchant une cinquantaine de mètre carré.

En 1975, pour des raisons de maniabilité, les hydrologues et pédologues ont mis au point aux Etats-Unis, un mini-simulateur de pluies permettant d'étudier sur quelques mètres carré les réactions du sol aux précipitations en fonction de ses caractéristiques et de la nature de la végétation. En Afrique francophone, l'ex ORSTOM (IDR) dans le cadre de ses travaux de recherche a également mis au point un infiltromètre à aspersion, type ORSTOM Asseline et Valentin (1978), constitué d'un système d'arrosage fixé au sommet d'une tour pyramidale de 3.7 mètres de haut.

Une fois de plus pour des raisons pratiques, Roose et Smolikowski (1997) mettent au point un irrigateur manuel à rampe qui en réalité représente la version très simplifiée du mini simulateur d'Asseline et Valentin (1978). Le principal avantage de cet irrigateur est qu'il est plus facile à transporter et ne nécessite que 60 litres d'eau par test, contrairement aux 600 litres de la version initiale. Cet appareil s'adapte mieux aux différents sites contrairement aux

simulateurs traditionnels. Dans le cadre de cette étude, nous avons eu recours à cet irrigateur dont la présentation et le fonctionnement sont faits au chapitre consacré à la méthodologie.

1.7.3. Parcelle expérimentale d'érosion

La parcelle d'érosion est un espace bien délimité et isolé par des objets qui empêchent les ruissellements extérieurs de pénétrer à l'intérieur. La parcelle est fermée et débouche à l'aval sur des cuves aménagées pour le stockage de l'eau et des sédiments. Ceci permet de quantifier le ruissellement et l'érosion produits au sein de parcelle.

Ce dispositif est adapté pour comparer des situations standardisées afin de connaître la dynamique de l'infiltration et les risques de ruissellement et d'érosion. Les dispositifs utilisés sont décrits dans de nombreuses études (Wischmeier et Smith, 1958-1978 ; Roose, 1981 ; Rishirumuhirwa, 1997). Le type de parcelle le plus utilisé est le type Wischmeier (Wischmeier et Smith, 1960).

Les premiers travaux sont, en effet, l'œuvre de Wischmeier et Smith (1960) aux USA, puis de Masson (1971) en Tunisie. Dans le domaine méditerranéen et dans la zone tropicale, les travaux sur parcelles se sont vite multipliés (Gabert, 1964 ; Clauzon et Vaudour, 1971 ; Descroix, 1989 ; Arabi et Roose, 1989 ; Lecompte et *al.*, 1996). Dans le cadre de cette étude, les parcelles utilisées ont (15 m de longueur x 6 m de largeur) soit 90 m², ce qui est proche de celles utilisées par Wischmeier et Smith (1960) (22 m de longueur pour 5 m de largeur soit 110 m²).

1.7.4. Érosion hydrique

D'après Roose (1994), le terme érosion vient de "*ERODERE*", verbe latin qui signifie "ronger". Une définition plus globalisante assez intéressante d'ailleurs, est donnée par Delcaillau (2011) qui définit l'érosion comme l'ensemble des processus physiques et chimiques assurant les transferts de matières à la surface des continents. Les processus d'érosion assurent le fonctionnement des systèmes morpho-dynamiques dans lesquels interagissent la mobilisation des particules, le transport et le dépôt.

Selon Poesen et Govers, (1994), l'érosion du sol est un processus au cours duquel des particules de sol sont détachées et déplacées par un vecteur (eau, vent, travail du sol) pour être

déposées en bas d'un versant. En fonction des agents causals, deux grands types d'érosion sont identifiables : l'érosion hydrique, l'érosion éolienne.

Pour Sauchere (1995), l'érosion hydrique est un phénomène complexe qui résulte de divers processus (détachement, transport et dépôt) causés en général par l'action conjuguée de la pluie et du ruissellement, et dont l'expression varie en fonction de la résistance du milieu (sol, couvert végétal, techniques culturales) et de la topographie.

Rousseva *et al.* (2002) et Hénensal, (1986), définissent l'érosion hydrique comme étant l'ensemble des processus liés à la déstructuration des surfaces par arrachement et déplacement des particules d'un sol ou d'une roche sous l'action de l'eau. Lorsque les gouttes de pluie arrivent sur le sol, elles créent une force tangentielle d'arrachement proportionnelle à leur énergie cinétique, brisent les mottes et les agrégats et projettent les particules arrachées. Ce phénomène de rejaillissement sous l'impact, ou «splash» en anglais, déplace les particules sur quelques dizaines de cm, la distance dépendant de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluie par rapport à la surface.

Les particules fines déplacées sont piégées entre les éléments plus grossiers et ferment les pores : la surface du sol connaît une réduction de sa capacité d'infiltration. Sur certains sols, les particules argileuses mouillées finissent par se souder les unes aux autres pour former une pellicule ou une mince croûte superficielle, continue et consistante dite croûte de battance.

L'érosion hydrique, comme nous le verrons dans la suite de ce travail, se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre.

Ainsi, tenant compte de toutes ces définitions, retenons simplement qu'au cours de cette étude, l'érosion hydrique est définie comme la quantité solide provenant de la désagrégation mécanique (splash) des sols par l'eau et pris en charge par le ruissellement sur les parcelles aménagées pour cette circonstance.

Par ailleurs, il importe de noter que l'érosion chimique qui correspond aux fractions de matière entraînées en solution dans les eaux de ruissellement et de drainage vertical est exclue de cette définition et ne sera pas traitée au cours de cette étude, compte tenu de la nécessité d'un dispositif expérimental supplémentaire pour leur évaluation.

1.7.5. Ruissellement

Le ruissellement représente la lame d'eau qui échappe à l'infiltration et à l'évaporation. Il est l'un des principaux agents responsables du transport sur de longues distances. Le ruissellement permet le transport de particules détachées par le splash. La charge en terre des eaux de ruissellement provient également des éléments prélevés par décapage du sol. Le rôle du ruissellement dans le déclenchement de l'érosion est tout à fait fondamental. Le ruissellement superficiel se déclenche dans deux cas, lorsqu'il y a saturation du sol (ruissellement par saturation) sous climats humides où les pluies sont fréquentes et lorsque la capacité d'infiltration du sol est insuffisante vis-à-vis de l'intensité de la pluie (mécanisme de Horton, 1933).

D'après Gimenez et *al.* (2002), la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement sont les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules.

Selon Guiton (1998), le ruissellement désigne le phénomène d'écoulement des eaux de pluie à la surface des sols. Ce ruissellement, d'abord pelliculaire, se partage en un écoulement diffus en petits filets d'eau anastomosés (c'est-à-dire interconnectés) qui circulent entre les obstacles et un écoulement aréolaire (de forme circulaire) en nappes formées de lames d'eau qui suivent plus ou moins la topographie. Ces filets et ces lames d'eau peuvent exercer une force de cisaillement qui arrache des particules de sol. La battance des gouttes détache des particules du sol et les transporte dans une faible proportion tandis que le ruissellement transporte les particules de sol libres et en le détachant dans une faible proportion (Bradford et Blanchard, 1999).

D'après Missié (1986) le ruissellement est défini comme un mouvement latéral du surplus d'eau que le sol ne parvient pas à absorber dans l'immédiat. Selon l'auteur, ce ruissellement est égal à la quantité d'eau tombée moins celle qui percole à travers le sol. Roose (1986) également le définit comme étant la fraction des pluies qui ne peut s'infiltrer à l'intérieur du sol pour des raisons diverses et échappe au bas d'une parcelle expérimentale entièrement isolée (case d'érosion). Le ruissellement ici, d'après l'auteur, se traduit par le rapport entre la lame d'eau ruisselée et la lame précipitée : rapport considéré en année moyenne appelé coefficient du ruissellement annuel moyen en pourcentage de précipitation (KRAM).

Au cours de cette étude, le ruissellement est défini comme la quantité d'eau de pluie qui, ne pouvant s'infiltrer pour des raisons diverses et variées, va couler en surface le long de la parcelle expérimentale (Roose, 1986). Dans cette définition, seul le ruissellement diffus est pris en compte.

CHAPITRE II

UN CADRE PHYSIQUE VULNERABLE

Ce chapitre présente le plateau côtier et ses environs à travers les fondements physiques (topographie, géomorphologie, sols, formations végétales, climat, et hydrologie etc.) qui montrent la vulnérabilité de ce plateau aux risques de ruissellement et d'érosion hydrique.

2.1. Situation géographique

Les expérimentations ou mesures ont été effectuées dans deux zones d'études, Kondi et Kissoko, situées respectivement à une trentaine de km au nord et à une vingtaine de km à l'est de la ville de Pointe-Noire, localisée elle, dans la partie Sud-Ouest de la République du Congo. Les sites expérimentaux sont localisés entre les latitudes 4°30' et 4°40' sud et les longitudes 11°50' et 12°00' est (figure. 2). Ces sites ont été choisis parce qu'ils sont représentatifs de l'écosystème dans lequel s'effectue cette étude.

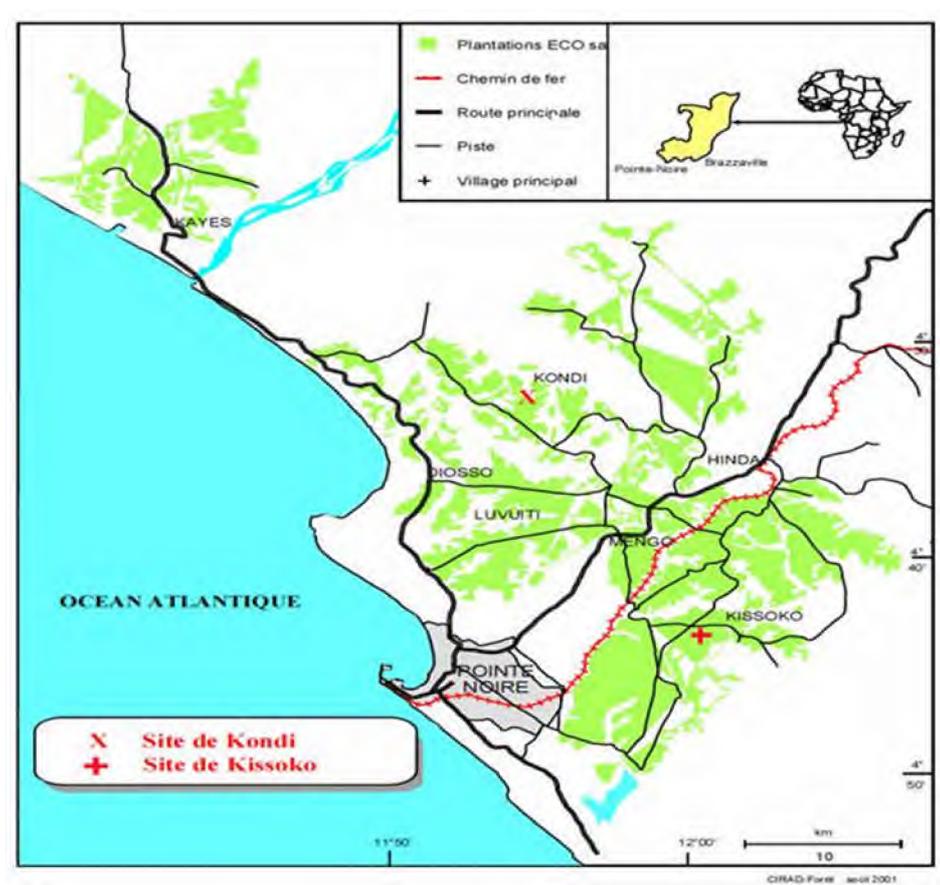


Figure 2 : Localisation de la zone d'étude

2.2. Un relief de plateaux tabulaires relativement disséqués

La région côtière comprend deux domaines totalement différents dans leur structure et leur morphologie: le bassin sédimentaire au relief de collines et de plateaux bordés par une plaine littorale, et le Mayombe, massif montagneux aux altitudes modérées, mais aux formes très heurtées, édifié sur un vieux géosynclinal (Vennetier , 1968).

Le bassin sédimentaire comprend, sans tenir compte des zones basses alluviales marécageuses lacustres ou lagunaires, trois types de paysages : la plaine littorale, les bas plateaux et la zone des collines prémayombiennes (Vennetier, 1968). (figure.3)

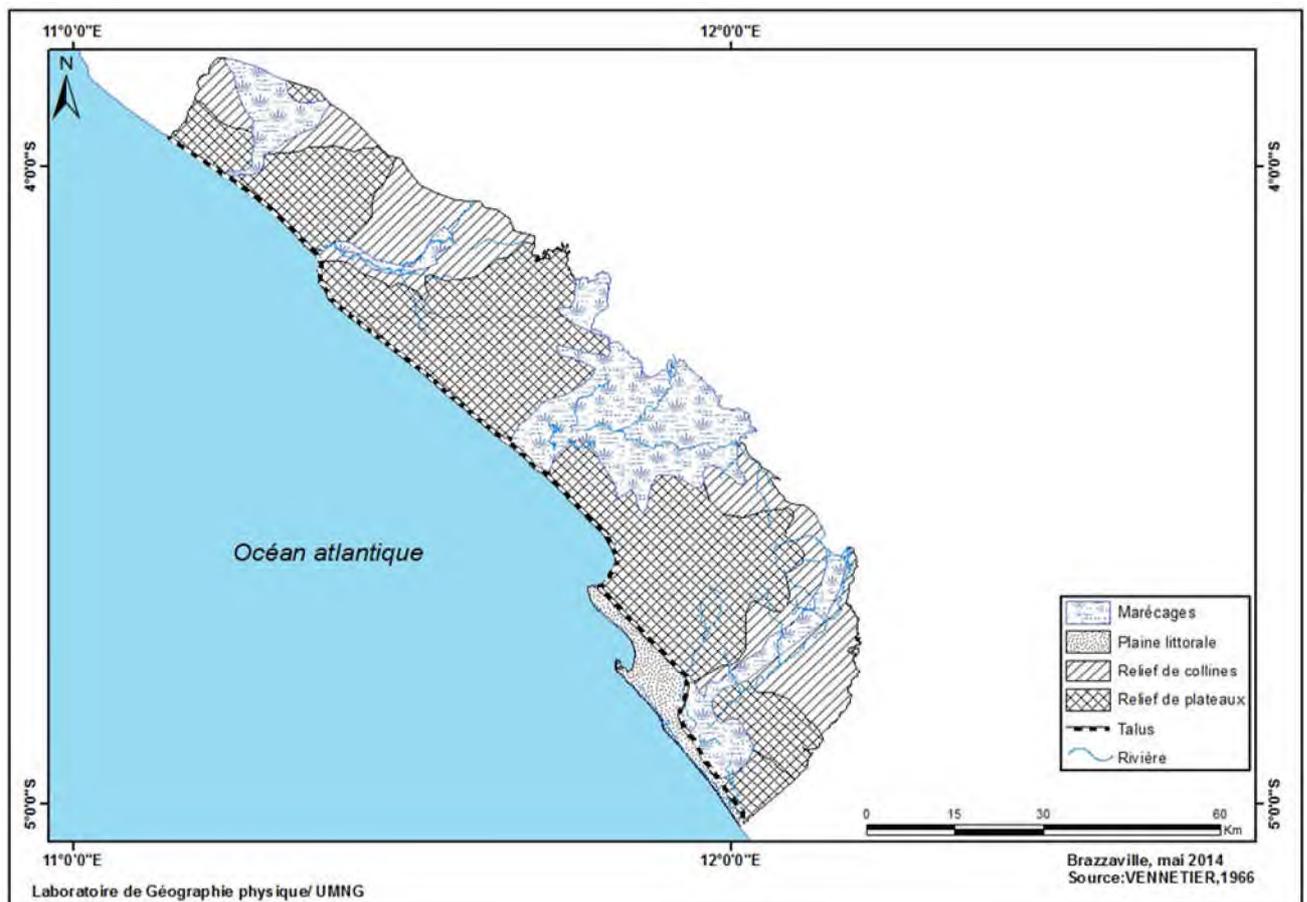


Figure. 3. : Grandes unités topographiques de la région côtière du Congo

2.2.1. Une plaine littorale légèrement ondulée

La plaine littorale commence au pied d'un talus important qui délimite à l'est les plateaux côtiers. Elle est très basse (environ 6 mètres d'altitude moyenne) et se compose d'une surface très calme au pied du talus et des cordons sableux à l'approche de l'océan (Cf. figure. 3). (Sitou, 1994)

Les cordons sableux sont disposés en deux ou trois séries parallèles les unes des autres et au trait de côte. La première série, la plus proche de l'Océan, culmine à 10 m, la suivante à 15 m et la dernière à 21 m. La première est aujourd'hui largement érodée par l'érosion côtière et n'existe presque plus partout. Les cordons forment parfois de lourdes croupes aux sommets aplatis, séparées les unes des autres par des lagunes et des dépressions souvent marécageuses. Ils sont coupés, par endroits, par les cours d'eau qui descendent du plateau et se jettent dans l'Océan (Sitou,1994).

C'est sur cette plaine littorale aux cordons sableux particulièrement monotones que s'est développée la ville de Pointe-Noire. La plaine est large au sud de Pointe-Noire où elle atteint 4km entre Ngoyo et Côte-Matêve.

A Pointe-Noire, l'enfoncement de la rivière Songolo et de ses affluents qui drainent la ville, a engendré progressivement un vallonnement qui donne à cette plaine l'allure d'un bas plateau mollement ondulé, s'étendant aujourd'hui sur environ 23 km² au centre de la ville (Sitou ,1994).

2.2.2. Des bas plateaux tabulaires assez disséqués

Vers l'intérieur des terres, la plaine littorale est dominée par une zone de plateaux dont la transition se fait par un talus à profil redressé, d'une hauteur de commandement dépassant en moyenne 50 m d'altitude pour atteindre par endroits près de 100 m (95m à Madingo-Kayes), (Vennetier, 1968). Dans l'ensemble, ces plateaux ont des altitudes très basses ne dépassant pas 150 m comme le montre la figure. 4.

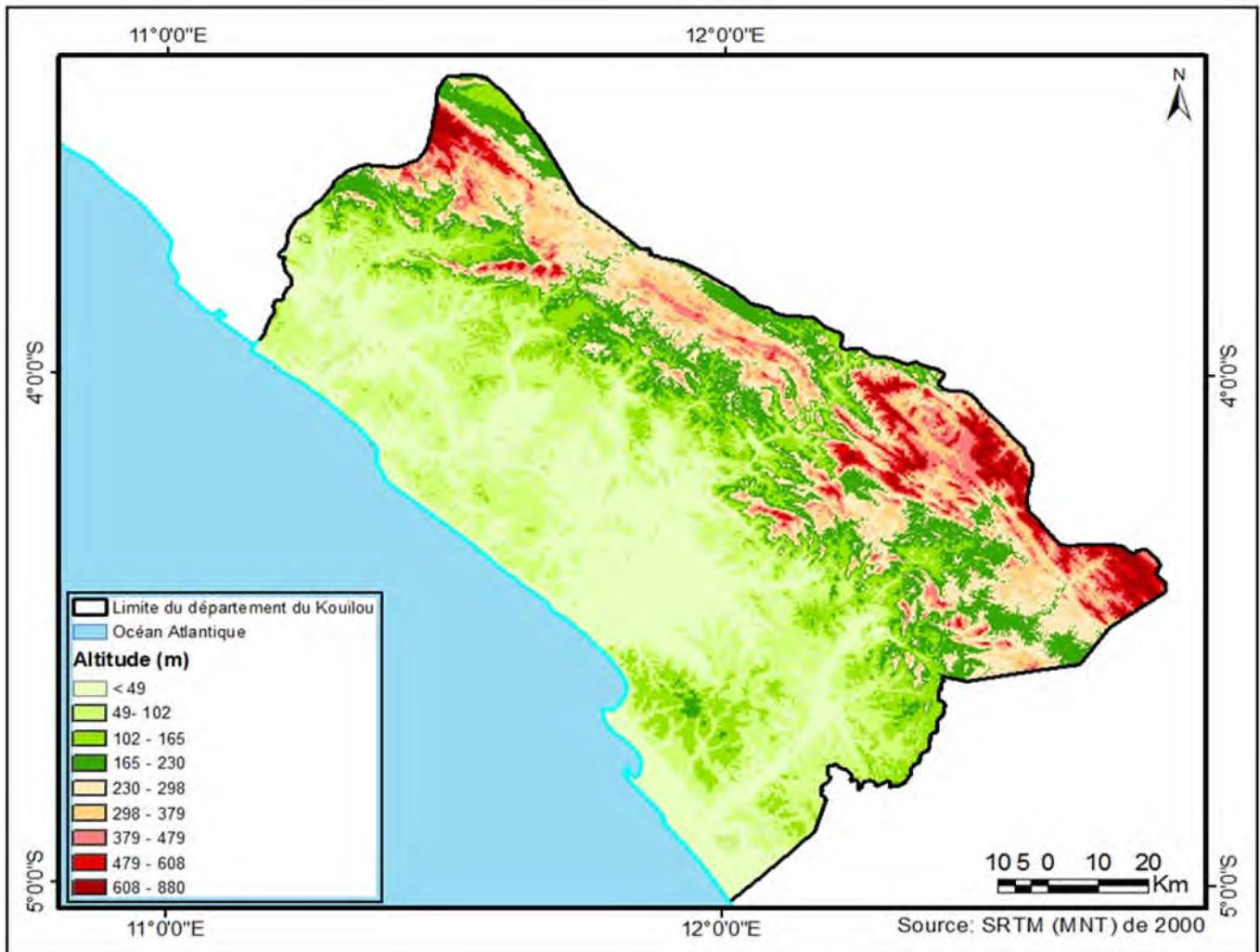


Figure. 4. : Altitudes des plateaux côtiers et chaines prémayombiennes

Du nord au sud, on distingue le plateau de Kayes et celui de Diosso-Hinda.

Le plateau de Kayes moins étendu est situé entre les vallées des rivières Noubi et Kouilou, avec des altitudes généralement inférieures à 130 m. La surface de ce plateau est mollement ondulée et parsemée de dépressions fermées, de formes de ravinement prolongeant les têtes de vallées et des vallées sèches assez ramifiées aux versants raides. La présence à la surface de ce plateau des dépressions fermées sèches fait penser à une origine liée à l'érosion par soutirage des matériaux ou par dissolution, dont l'origine a fait l'objet de plusieurs travaux sur les plateaux Batékés et en RDC (Bocquier et Boissezon, 1959 ; Cahen et Mortelmans, 1973 ; Schwartz et Lanfranchi, 1990).

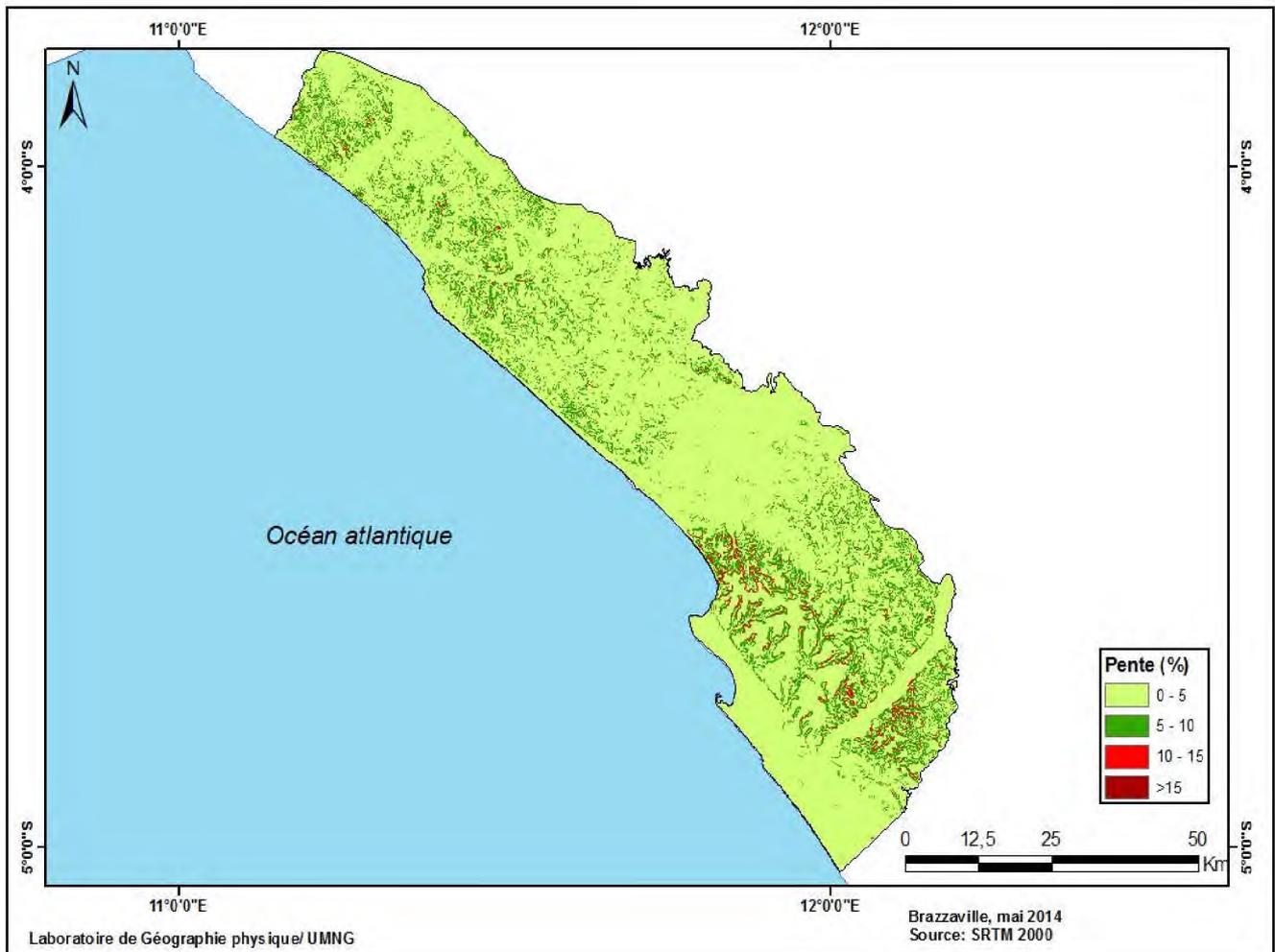


Figure 5. : Carte de pentes des plateaux côtiers

Le plateau de Diosso-Hinda est caractérisé par des surfaces à pentes faibles (inférieures à 5%). En revanche, les vallées qui l’incisent ont des versants de pente comprises entre 10 et 20%. (Vennetier, 1968) (Figure. 5)

Ce plateau s’étend entre la vallée du Kouilou au Nord et celle de la Loémé au sud. C’est sur ce plateau que se localise notre zone d’étude. Situé entre les deux grands couloirs naturels que sont les vallées du Kouilou et de la Loémé, le plateau de Diosso-Hinda forme un large interfluve dont le sommet forme une ligne de partage des eaux orientées d’Est en Ouest, axée sur Diosso et délimitée par deux surfaces inégales et opposées.

L’une des surfaces s’incline en pente douce vers le Sud et l’autre vers le Nord. Le versant Nord, moins étendu (9 à 10 km de large) correspond au versant Sud de la vallée du

Kouilou. L'allure redressée de ce versant lui confère l'aspect d'un talus. De celui-ci, partent plusieurs ravins aux rebords abrupts qui le découpent profondément par érosion régressive (Sitou, 1994).

La partie sud du plateau de Diosso-Hinda est plus vaste et s'étend à perte de vue. Sa surface est assez monotone, mais accidentée d'une part, par de petites ondulations et, d'autre part, par des vallées et des vallons secs, et par quelques dépressions fermées,

Par ailleurs, les plateaux côtiers dans leur ensemble, sont affectés par une autre forme d'érosion spectaculaire qui a donné son nom à une série géologique: «les cirques ». Ceux-ci sont généralement localisés en bordure du plateau, et ils constituent de vastes excavations aux parois raides. Les cirques les plus spectaculaires sont ceux de Diosso, plus connus sous le nom des « gorges de Diosso » dont la dénivellation atteint 80 à 100 m et ayant fait l'objet d'une étude détaillée par Sitou (1994). Ces diverses formes érosives du relief des plateaux demeurent très actives : certaines sont sèches, d'autres sont occupées par une source au milieu d'une savane totalement nue et dont le fond est occupé par une végétation arborée (Photo 1).



Photo 1 : Cirque à source à Kondi (Cliché Mayima, 2012)

L'examen de cette photo montre qu'il s'agit d'une forme semi-figée. En effet, en amont nous observons des parois abruptes croulantes dont le recul détruit la végétation, tandis qu'en aval le fond est occupé par une végétation qui permet la stabilisation des parois. Nous verrons

plus loin que cette redynamisation des formes anciennes serait favorisée par les actions d'afforestation menées dans la zone.

D'après de nombreuses études (Devigne, 1959 ; Babet, 1928 ; Lebedeff, 1929, Logaret *al.* 1983 et Sitou, 1994), les grands traits de l'évolution des reliefs décrits plus haut, doivent être rattachés aux évènements morpho-tectoniques et aux différentes variations climatiques du Quaternaire ayant affecté l'ensemble de ce bassin sédimentaire.

2.3. Des roches sédimentaires fragiles

Le substratum géologique du Congo méridional se scinde en deux ensembles structuraux : la structure du massif montagneux du Mayombe, constituée de roches éruptives et métamorphiques précambriennes, actuellement en pleine destruction par l'érosion, et la structure du bassin côtier constituée d'une couverture sédimentaire mésozoïque et cénozoïque (figure. 6).

Le bassin côtier, sur lequel se développent les plantations d'eucalyptus est un ensemble géologique constitué par une succession de roches sédimentaires de plus de 4000 mètres d'épaisseur, dont l'histoire géologique est marquée par deux grandes périodes séparées par un épisode salifère (Logar *et al.* 1983).

La première période, l'Antésalifère, correspond aux premiers dépôts qui ont lieu au Crétacé inférieur (du Néocomien à l'Aptien inférieur). Ce sont des dépôts de milieu continental (Dadet, 1969). C'est dans cet Antésalifère que se trouvent les poches d'hydrocarbures répandues dans cette région.

L'épisode salifère (sel de Loémé) a lieu à l'Aptien supérieur. Il s'agit de dépôts de mer confinée dont le mode de mise en place demeure sujet à controverse (Logar *et al.* 1983).

Les formations post salifères sont mieux connues à cause des nombreux restes de faunes marines qu'elles renferment. Elles se terminent au sommet par 150 à 200 m de dépôts gravelo-sableux cartographiés sous le vocable de série des cirques à cause des énormes excavations qui s'y sont creusées (Cosson, 1955 ; Vennetier, 1968 ; Massengo, 1970). La série des cirques est constituée par plusieurs couches qu'on regroupe souvent en trois grands niveaux. Il s'agit, dans la région étudiée, de haut en bas :

- ✓ d'une couverture gris jaunâtre à ocre jaune;
- ✓ d'un horizon cuirassé;
- ✓ d'une succession de strates d'épaisseur, de couleur et de texture variables.

La couche supérieure a une épaisseur qui varie entre 3 et 10 m en moyenne. Elle est très homogène avec une absence totale de variation de couleur et de stratification. Sa texture est globalement sableuse à sablo-argileuse avec une absence quasi absolue de sable grossier. Les analyses granulométriques effectuées par Sitou (1994) indiquent un taux moyen de 10% pour les particules inférieures à 50 microns et une teneur moyenne en argile de 5,4%. Les analyses de Jamet (1975) sur les formations du plateau qui domine la ville de Pointe-Noire à l'est ont donné une teneur en argile de 1 à 4,5% entre les 0-30 cm de surface. En profondeur (plus de 1 m), ce taux oscille, selon la même étude, entre 5,8 et 10,7% soit une moyenne de 9% environ, tandis qu'à la profondeur de 1m cette moyenne est de 6% avec des valeurs extrêmes de 1,5 et 9,8%.

La couche supérieure repose sur un horizon cuirassé qui est un épais lit de blocs hétérométriques qui, en raison de son perpétuel démantèlement ne joue aucun rôle géomorphologique dans la protection des formations face aux phénomènes d'érosion (Sitou, 1994). Quoi qu'il en soit, l'horizon cuirassé marque une rupture lithologique entre le niveau sablo-argileux supérieur et les formations sous-jacentes. Une étude approfondie de ce niveau donnerait des indications utiles à la clarification de l'histoire géologique de ce bassin côtier.

Sous l'horizon cuirassé se superposent plusieurs strates d'épaisseurs variables et de textures tantôt sablo-argileuse tantôt argilo-sableuse, très tendre.

Ainsi, le substratum géologique sur lequel se développe cette activité sylvicole est d'une très grande fragilité. Les cirques d'érosion qui l'entaillent à sa surface ont des profondeurs qui

atteignent 100 mètres dans certains cas comme ceux de Diosso. Ceci montre bien la fragilité de ces formations géologiques.

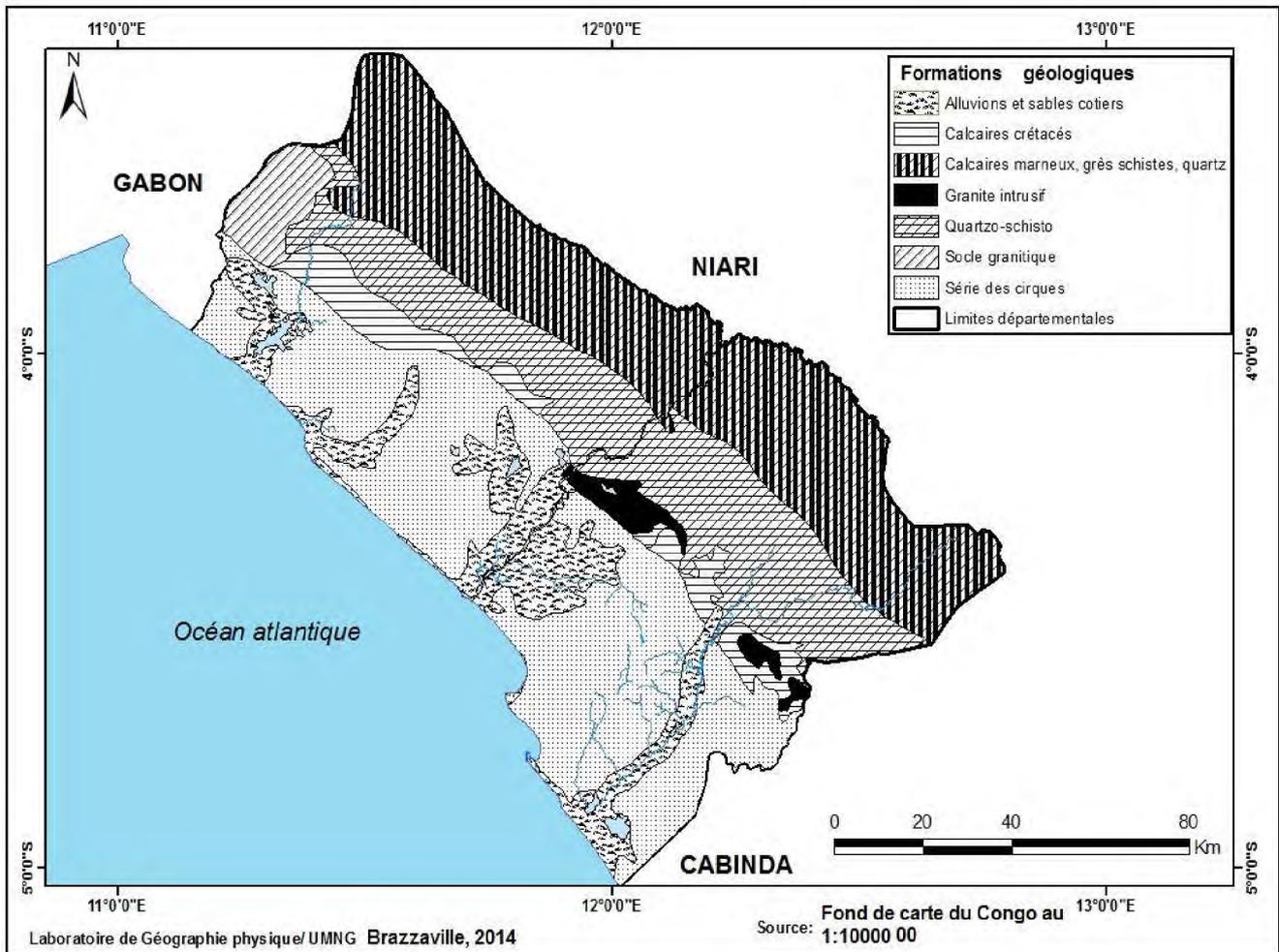


Figure. 6 : Formations géologiques du bassin côtier et chaînes prémayombiennes

2.4. Des sols très sensibles aux phénomènes d'érosion hydrique

Les sols du Congo en général et ceux de la zone d'étude en particulier sont acides, très désaturés et de structure fragile (Atlas du Congo, 2001). Ils sont répartis en deux classes principales : les sols hydromorphes et les sols jaunes sur matériau sableux (figure. 7).

~ Les sols hydromorphes sont des sols tourbeux ou semi-tourbeux, engorgés d'eau. Ils se localisent sous les faibles étendues des lacs et lagunes du littoral. Ils sont très acides (pH entre 3 et 4) et se caractérisent par une hydromorphie totale permanente et une accumulation importante de matière organique (20 à 40% et plus).

~ Les sols jaunes sur matériau sableux : ce sont des sols ferrallitiques ou Ferralic Arenosol, occupent la quasi-totalité du bassin côtier. Ils appartiennent à la sous classe des sols ferrallitiques appauvris (FAO, 1998 ; Nzila, 2001). Leur texture est de 82 à 90 % constituée de sable grossier et moyen (Jamet, 1975).

Dans ces formations on trouve du quartz dans les fractions grossières et de la kaolinite dans les fractions fines, avec une faible teneur d'éléments nutritifs susceptibles d'être libérés par altération au sein de ces minéraux (Mareschal et al., 2011).

La minéralogie détaillée des différentes fractions granulométriques a été identifiée à partir d'échantillons de sol prélevés jusqu'à 5 m de profondeur sur le site de Kondi (Mareschal et al., 2011). Leur capacité d'échange cationique très faible, dépend essentiellement du taux de matière organique qui est supérieur ou égal à 1%. Leur teneur en argile est en moyenne 6,3% dans les 30 premiers centimètres et augmente faiblement en profondeur (Tableau I).

Tableau I : Caractéristiques du sol dans une plantation d'eucalyptus de 6 ans à Kondi.

Horizons (cm)	Argile %	Limon %	Sable %	Matière organique	C/N	PH (H ₂ O)
A ₁₁ 0 -5	6,6	2,0	88,6	1,14	14,0	4,8
A ₁₂ 5 - 55	6,0	1,7	90,5	0,66	12,3	4,7
B ₁ 55 - 80	9,3	1,9	86,7	0,36	11,7	4,9
B ₂₁ 80 -200	9,9	2,1	86,9	0,19	11,0	5,2
B ₂₂ 200 -600	10,6	3,2	85,0	0,16	7,4	5,1

Source: Laclau (2001)

Ces sols sont très homogènes et présentent un rapport C/N variant de 7,4 à 14, un taux d'humification faible généralement inférieur à 10 % et un degré de saturation en eau de l'ordre de 20 à 30 % (Jamet, 1969). En raison de leur texture sableuse et de la faible proportion de Matières Organiques (Laclau, 2001), ces sols sont peu cohérents, très sensibles à la battance ainsi qu'aux phénomènes de ravinement puisque la roche mère est le produit de l'altération (quartz, kaolinite et quelques micas résiduels). Par ailleurs, de nombreuses études de sols menées sous savanes reboisées au tour de Pointe- Noire montrent que les propriétés physico-

chimiques varient peu (Nzila, 1996 ; Jamet, 1975 ; Malvos et Ranger, 1983; Barthes, 1995 et Trouve, 1992).

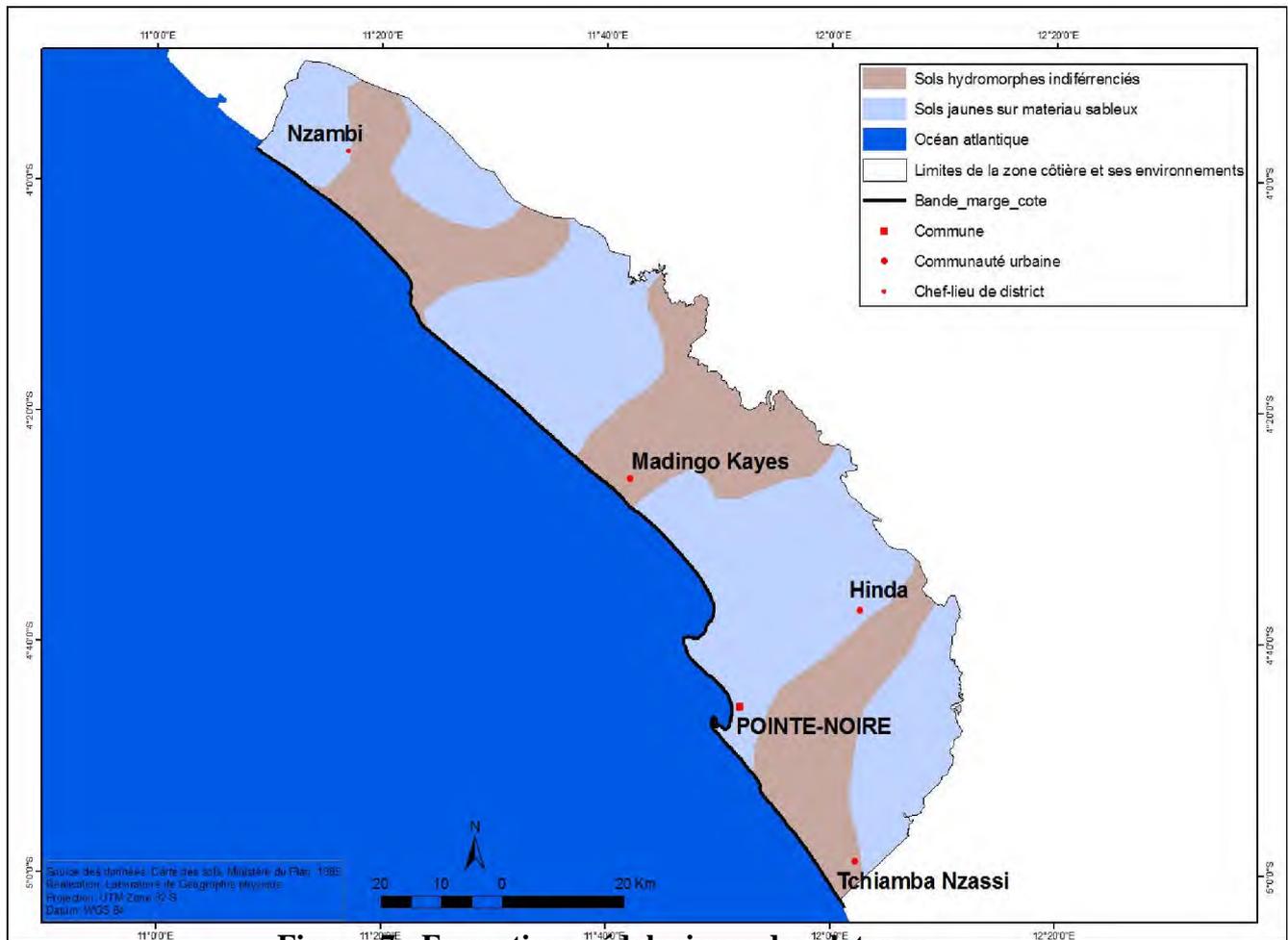


Figure. 7 : Formations pédologiques des plateaux

côtiers 2.5. Un climat agressif

Le climat de la région côtière est de type tropical humide. Il a été largement décrit dans ses mécanismes et sa dynamique par de nombreux chercheurs (Leroux, 1975 ; Jamet et Rieffel, 1976 ; Samba-Kimbata, 1978 ; Molinier, 1979 ; Peyrot, 1983 ; Mpounza et *al.*, 1990 et Bigot, 1997). Il se caractérise, par l'alternance de deux saisons bien tranchées : la saison des pluies et la saison sèche. La saison des pluies dure de 7 à 8 mois (octobre-mai) et la saison sèche, de 4 à 5 mois (mai- septembre) avec une recrudescence des pluies entre février-avril (Figure. 8).

La saison des pluies est aussi la saison chaude, dont les températures mensuelles moyennes sont de l'ordre de 25°C, avec des variations saisonnières de faible amplitude (< 5

°C) et très peu de variations inter annuelles ; ce qui ne permet pas au sol de se ressuyer rapidement entre les averses.

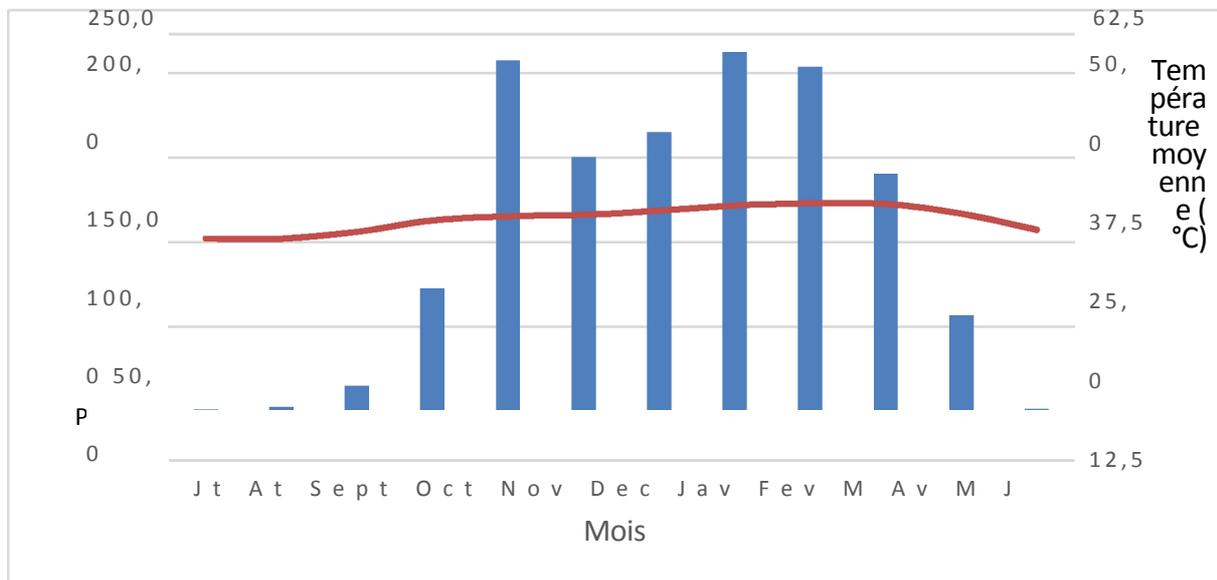


Figure 8 : Diagramme ombrothermique de la zone de Pointe-Noire construit selon BIROT (P= 4T) correspondant à la période 1983-2013. (Source : Données ASECNA Pointe- Noire).

2.5.1. Une pluviométrie abondante

La pluie commande directement ou indirectement le ruissellement, sans lequel on ne parlerait pas de l'érosion hydrique. Son action est influencée par plusieurs paramètres (hauteurs, intensités, fréquences et nombre de jours de pluies).

Sur le site de Kondi, un réseau de pluviomètres a été installé et ceux-ci ont permis de collecter des données de manière continue au cours de la période allant de 2004 à 2013 travaux interne au CRDPI. La pluviométrie moyenne annuelle sur ce site expérimental durant les 10 dernières années est de 1400 mm d'eau. Le minimum relevé est de 976 mm en 2012 et le maximum est de 1500 mm d'eau enregistré en 2010 (figure. 9).

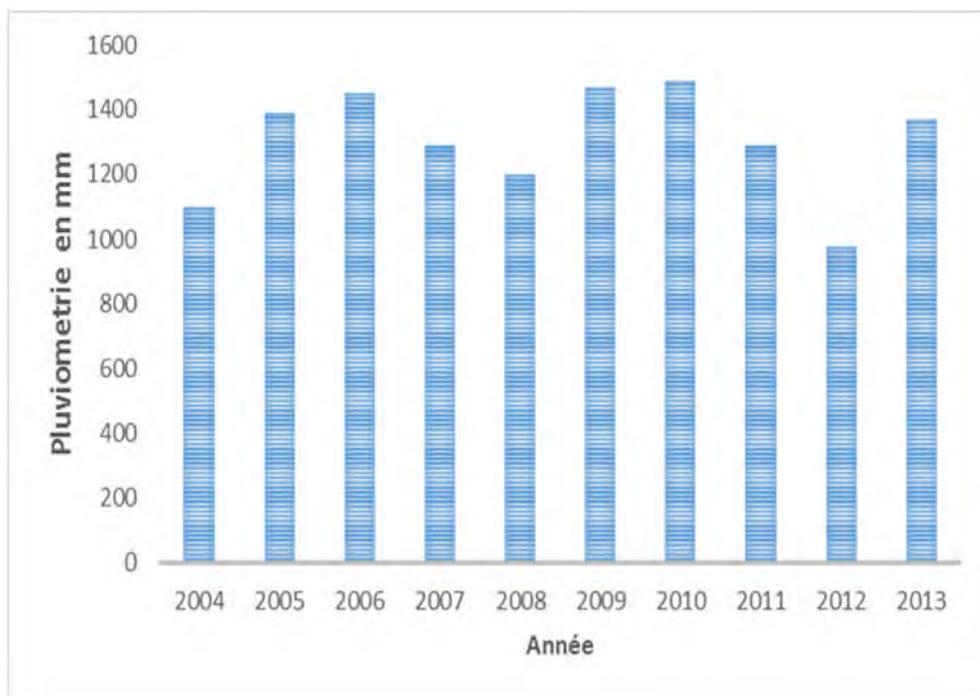


Figure 9 : Variation annuelle de la pluviométrie à Kondi (2004-2013)

La pluviométrie annuelle dans le site de Kondi comme dans toute la région côtière, n'est pas uniforme. Elle présente des variations d'une année sur l'autre (CV de 15 % sur 9 ans) comme le témoigne la figure 9. Au pas de temps mensuel, l'analyse des pluies dégage la même tendance observée au niveau des totaux annuels (Figure.10).

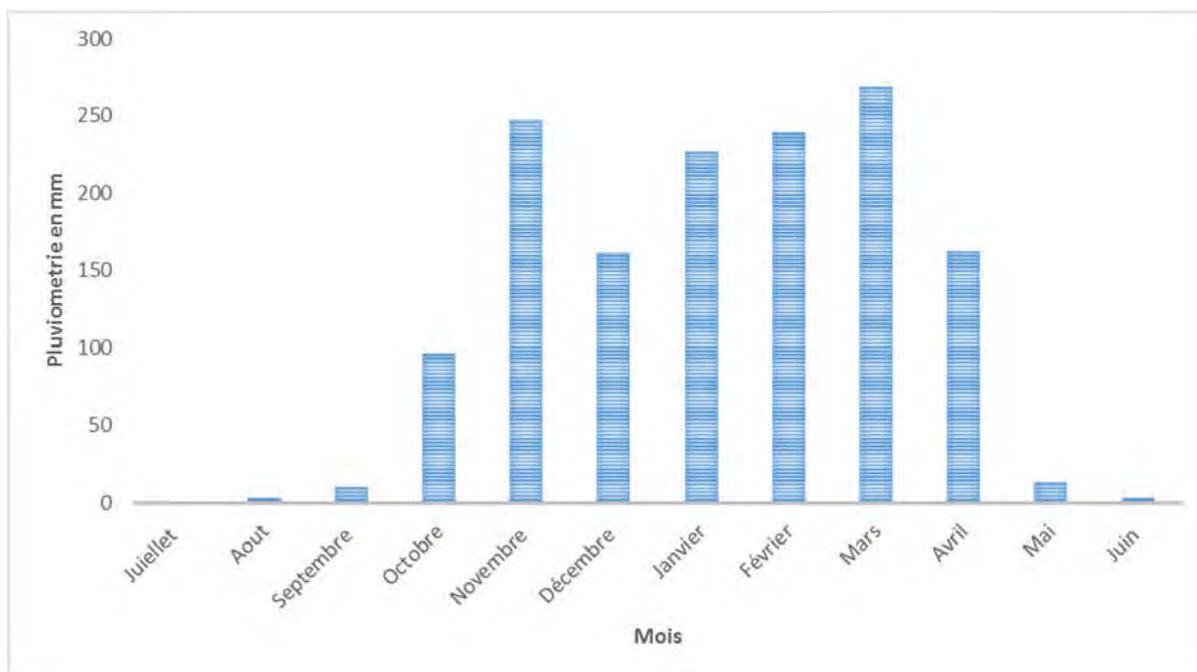


Figure 10 : Moyennes mensuelles de la pluviométrie à Kondi (2004-2013)

Le mois de mars reste le mois le plus arrosé avec 260 mm en moyenne. Plus de 32% des pluies sont tombées entre novembre et décembre au cours de la même période. Cette variabilité tant annuelle que mensuelle avait déjà été observée à Kondi par Laclau (2001).

En revanche, la présence de pluies sectorielles, semble avoir une incidence sur la variation spatiale qu'on observe dans le bassin côtier. Ainsi, le coefficient de corrélation que nous avons calculé à partir des totaux annuels (2004 -2013) entre les stations de Pointe-Noire et Kondi distantes de 25 km environ, donne une valeur de 0,45 et exprime, de ce fait, une très mauvaise corrélation entre les deux stations (Figure.11).

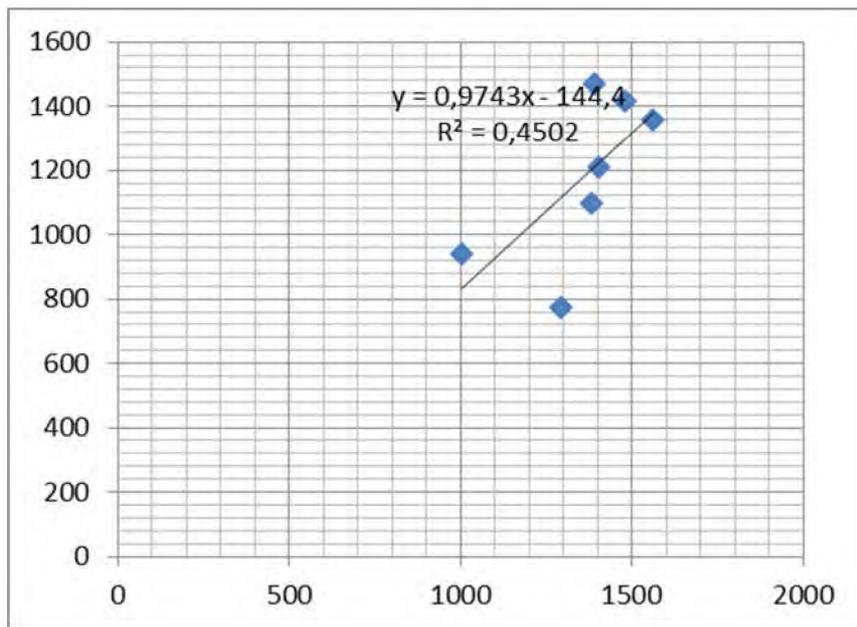


Figure.11 : Corrélation de la pluviosité annuelle entre Pointe Noire et Kondi distant de 25 km

Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Sitou (1994) et Kirsch (2010) entre les stations de Pointe-Noire et Loango située à 25 km environ, l'une de l'autre.

2.5.2. Des intensités et fréquences des pluies assez remarquables

Les pluies qui tombent dans le bassin côtier, sont de deux natures. Il s'agit respectivement des pluies de front d'est et des pluies thermo convectives. La première catégorie apporte les hauteurs d'eau les plus importantes. Les pluies qui durent longtemps, sont les plus représentatives et varient entre 66,2 à 72,8% d'après Samba-Kimbata (1978). Ces types de pluies ont un pouvoir érosif qui se manifeste pendant les 30 premières minutes durant lesquelles elles sont plus intenses (Mietton, 1988).

A titre indicatif, dans le bassin côtier, d'après le dépouillement effectué par Sitou (1994) dont les résultats sont consignés à la page 130 Tableau V, les pluies d'onde d'est apportent plus de 80% de la hauteur d'eau en 30 minutes, ce qui donne des intensités souvent supérieures à 1 mm/mn. A la lumière des résultats obtenus par Roose, (1977) ; Mietton (1988) et Wassmer (1981), les intensités des pluies restent le paramètre le mieux corrélé à l'érosion hydrique.

L'analyse des enregistrements récemment réalisée par le CRDPI en 2007 montre que les pluies journalières maximales (fréquence 1/1) atteignent chaque année 100 mm et tous les dix ans 140 mm/jour et leur intensité maximale en 30 minutes atteint 70 mm/heure chaque année et 80 mm/h lors des pluies décennales (Tableau II).

Tableau II : Pluviosité horaire et semi-horaire annuelle maximale (mm/heure)

Station	Année	1/2 heure	1heure
Hinda	2001	75,8	47,3
Hinda	2002	77,2	60,7
Hinda	2003	65	40,4
Kissoko	2005	70,6	46,3
Kissoko	2006	80,8	75,9
Kondi	2008	99,2	77,2
Maximum		99,2	77,2
Médiane		77,2	59,3
Moyenne		79,82	58,15
Ecart Type		11,63	14,48
1/10 estimé		93	77

Source: (CRDPI, complété par Mayima, 2013)

Ces intensités sont largement au-dessus de ce qui est considéré comme seuil (12 mm en 24 heures) à partir duquel, une pluie devient érosive d'après Roose (1978) pour des études réalisées en Afrique de l'ouest dans le même contexte climatique. En milieu tropical humide, les averses exceptionnelles ne sont pas les seuls facteurs qui déterminent le niveau de l'érosion.

En plus des intensités, il faut ajouter la fréquence des pluies qui ne laisse pas souvent au sol le temps de se ressuyer. Les résultats obtenus par Roose (1973 et 1977), ont montré que les pertes en terre et les ruissellements les plus élevés ont lieu à un moment où le sol est déjà humide et soumis à rythme de précipitation élevé.

L'humidité du sol avant la pluie est un facteur important de régulation, car au fur et à mesure que le sol se ré humidifie, la vitesse d'infiltration baisse et le ruissellement augmente.

Ainsi, des précipitations même faibles peuvent facilement engendrer un ruissellement et avoir un effet érosif important.

Sur le site expérimental, ce paramètre est aggravé par le nombre important de jours de pluie. Il est en moyenne un jour sur deux est pluvieux durant la saison des pluies. De 2004 à 2013, il a plu en moyenne 120 jours par an, soit plus d'1 jour sur 2. Si on ne considère que les mois pluvieux dont le nombre est de 8 sur 12 mois de l'année. Ce rapport est souvent dépassé durant certains mois où la succession de pluies atteint et dépasse le rythme de 4 à 5 jours par semaine.

2.5.3. Indices d'agressivité des pluies

Les indices d'érosivité des pluies permettent de se rendre compte du pouvoir érosif des pluies vis à vis du sol. Dans le cadre de notre étude, les indices de Fournier (1962) et celui de Wischmeier et Smith (1959) ont été appliqués.

2.5.3.1. Indice de Fournier

$I = \frac{p}{P}$ Avec p = pluviométrie du mois le plus humide

P = pluviométrie annuelle

Tableau III: Indice annuel de Fournier sur le site de Kondi

Année	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Moyenne
p (mm)	241	329	277	266	265	231	245	247	201	254	255,6
P (mm)	1007	1385	1482	1289,4	1197,5	1472,2	1488,9	1290	976,7	1370	1295,87
I	57,67	78,15	51,77	54,87	58,64	36,24	40,31	47,29	41,36	47,09	50,41

L'indice moyen d'agressivité climatique calculé durant la période allant de 2004 à 2013 selon la formule de Fournier proposée en 1968 est de 50,41 à Kondi. Cet indice est proche de ceux trouvés respectivement par Tchotsoua (1996) à Yaoundé au Cameroun et Mietton (1980) à Po Tibelé dans l'actuel Burkina-Faso.

Pour Roose (1981), cet indice est peu satisfaisant en comparaison à celui de Wischmeier et Smith qui prend en compte la somme de l'énergie cinétique apportée par les gouttes de pluies.

Ce paramètre est très important, car cette énergie donne la force à la goutte de pluie de désagréger les agrégats du sol à travers l'effet splash.

2.5.3.2. Indice de Wischmeier et Smith

Deux paramètres retenus par Wischmeier et Smith permettent de calculer l'érosivité des pluies selon la formule suivante : $R = \sum E_c \cdot I_{30}$ avec E_c (énergie cinétique) et I_{30} = Intensité maximale en 30 mn (mm/h). Cet indice se calcule pluie par pluie, en découpant les enregistrements pluviographiques en segments d'intensité constante en 30 minutes. Les analyses des enregistrements de pluies durant 10 ans sur 20 postes en Afrique ont permis de simplifier la démarche. R annuel moyen sur dix ans = H_{am} 10 ans x A.

L'érosivité des pluies est donc égale à la hauteur de pluie annuelle moyenne durant la même période multiplié par le facteur A qui varie autour de 0.5 en milieu tropical à l'exception de la côte et des zones montagneuses. Ainsi, à Kondi, $R_{am} = H_{am}$ (1295,87 mm) x 0.5 = 647,93 en situation moyenne. Cette valeur est comprise entre 200 et 650, valeurs de l'indice trouvées en Haute-Volta par Roose (1974). En revanche, la valeur de l'indice trouvée dans notre zone est légèrement inférieure à 860 l'indice trouvé à Yaoundé en 1978, rapporté par Tchotsoua (1996).

2.6. Un bilan hydrique à surplus hydrologique

La notion du bilan hydrique intègre une combinaison de données climatiques, pédologiques et agronomiques. Il permet de déterminer la période (mois) à partir de laquelle le sol est saturé (surplus hydrologique) et est favorable aux ruissellements et à l'érosion. C'est un paramètre important surtout pour les mesures à prendre contre le phénomène d'érosion. Ici, nous avons eu recours à un bilan hydrique simplifié du sol d'une savane et d'une plantation d'eucalyptus dressé par Nizinski et *al.* (2008) qui s'écrit sous la forme suivante :

$$P_i = ETR + D \frac{\pm \Delta \sim}{\Delta \sim} \quad (1).$$

$$\text{Où } ETR = T + I_n + E_s \quad (2)$$

$$\text{Et } I_n = P_i - (P_s + E_c) \quad (3)$$

Les besoins hydriques ou déficits sont d'autant plus importants que les pluies mensuelles sont inférieures aux ETP (Evapotranspiration potentielle). Si par contre les pluies mensuelles sont supérieures aux ETP, il y aura une disponibilité d'eau qui servira à reconstituer les réserves d'eau dans le terrain et le surplus ruissellera.

Dans ce bilan hydrique simplifié, nous nous intéressons plus aux paramètres comme: surplus hydrologique, précipitations au sol, interception nette, évapotranspiration potentielle et réelle. Durant la période de saison de pluie, sous plantation d'eucalyptus, les précipitations au sol et l'interception nette s'élèvent à 867 et 112 mm (89 et 11% de la précipitation incidente et à 878 et 101 mm (90% et 10% de la précipitation incidente) pour la savane tableau IV. Ces résultats montrent que les plantations d'eucalyptus à travers leur canopée ou houppier n'interceptent qu'une infime partie des précipitations qui rejoint par la suite le sol le long des troncs (écoulement des troncs). La grande partie qui tombe directement sans être interceptée peut causer une érosion sous l'effet du splash sur un sol non protégé. Effet, l'égouttage le long des feuilles produits des gouttes plus grosses que celles de la pluie car elles tombent d'une hauteur inférieure à la hauteur nécessaire pour atteindre leur vitesse limite de chute et ne sont par conséquent pas calibrées par la résistance de l'air, d'où un impact au sol souvent fort.

L'analyse de ce bilan hydrique montre que pendant la saison des pluies 1996-1997, sur 459mm de précipitation incidente enregistrée, la plantation d'eucalyptus a transpiré 740mm. Cette hauteur d'eau correspond à la totalité des précipitations incidentes tombées lors de cette saison des pluies, à laquelle il faut ajouter 281 mm d'eau qui ont été prélevés dans la zone racinaire (de 5 m de profondeur), desséchant ainsi cette zone racinaire vers la fin de la saison sèche 1997 (septembre). Dans la même période la savane a transpiré 473 mm, ce qui correspond à seulement 14 mm prélevé dans la zone racinaire.

A la fin de la saison sèche, le sol est au point de flétrissement permanent dans la plantation alors que dans la savane, il subsiste encore dans le sol une quantité d'eau qui représente 15% de la réserve utile (Ru), soit 27 mm (pour la même profondeur). La plantation d'eucalyptus est un écosystème artificiel qui absorbe, transpire toute l'année et qui consomme toute l'eau disponible dans les autres peuplements dans la nature.

Ce fait montre qu'il est difficile sous plantation d'eucalyptus d'avoir un ruissellement qui se déclenche suite à une saturation des horizons jusqu'à 3 mètres de profondeur. Par contre, sous savane, la réserve utile qui subsiste jusqu' en septembre est à l'origine des ruissellements par saturation dès les premières pluies abondantes.

Sous savane, on enregistre un drainage cumulé de 827mm en dehors de la zone racinaire lors de la saison de pluies, alors qu'il est seulement de 470 mm sous plantation d'eucalyptus. Cette situation doit avoir des effets sur le ruissellement hypodermique.

Tableau IV : Variation des paramètres du bilan hydrique d'une savane et d'une plantation d'eucalyptus à Kondi

	Nov - Avril Saisons des pluies						Juin - Sept Saisons sèches			
	1996		1997		1998		1999			
	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane
Rn (Wm ⁻²)	416,9	345,5	441,9	366,6	435,5	359,8	272,4	223,2	290,3	238,1
ETP (mm)	780,5	717,2	851,5	779,2	856,7	785	373,9	347,8	402,4	
Pi (mm)	459,3	459,3	1338,5	1338,5	1139,9	1139,9	15,5	15,5	63,5	63,5
Ps (mm)	412,3	422,5	1198	1198	991	1005,5	9,8	13,5	39,9	47,1
Ps %	89,8	92	89,5	90,1	86,9	88,2	63,1	86,6	62,9	74,2
EC (mm)	9,2		26,8		22,8		0,3		1,3	
% Pi	2		2		2		2		2	
In (mm)	47	36,8	140,2	132,2	148,9	134,4	5,7	2,1	23,6	16,4
% Pi	10,2	8	10,5	9,9	13,1	11,8	36,9	13,4	37,1	25,8
ETR (mm)	740,2	473	848,3	716,9	713,6	547,1	99,7	114,3	266,4	128,6
Drainage	0	0	376,4	489,4	300,2	458,4	225,6	315,9	0	0

Source: Nizinski et al ; 2008

Rn (Rayonnement net) ; Pi (Précipitation incidentes) ; Ps (Précipitation au sol) EC (écoulement le long de troncs) ; In (Interception nette) ; ETP (évapotranspiration potentielle) ; ETR (évapotranspiration réelle).

2.7. Une hydrographie dense et dynamique

Toutes les zones de plantations sont situées dans le bassin versant du fleuve Kouilou-Niari dont le débit est supérieur à 900 m³/s dans sa partie inférieure (dans la région côtière). Les autres bassins versants de la zone d'étude sont constitués de petites rivières peu importantes et de nombreux lacs, lagunes et marécages qui parsèment le territoire et dont le fleuve Kouilou sert d'exutoire à certaines rivières (figure. 12).

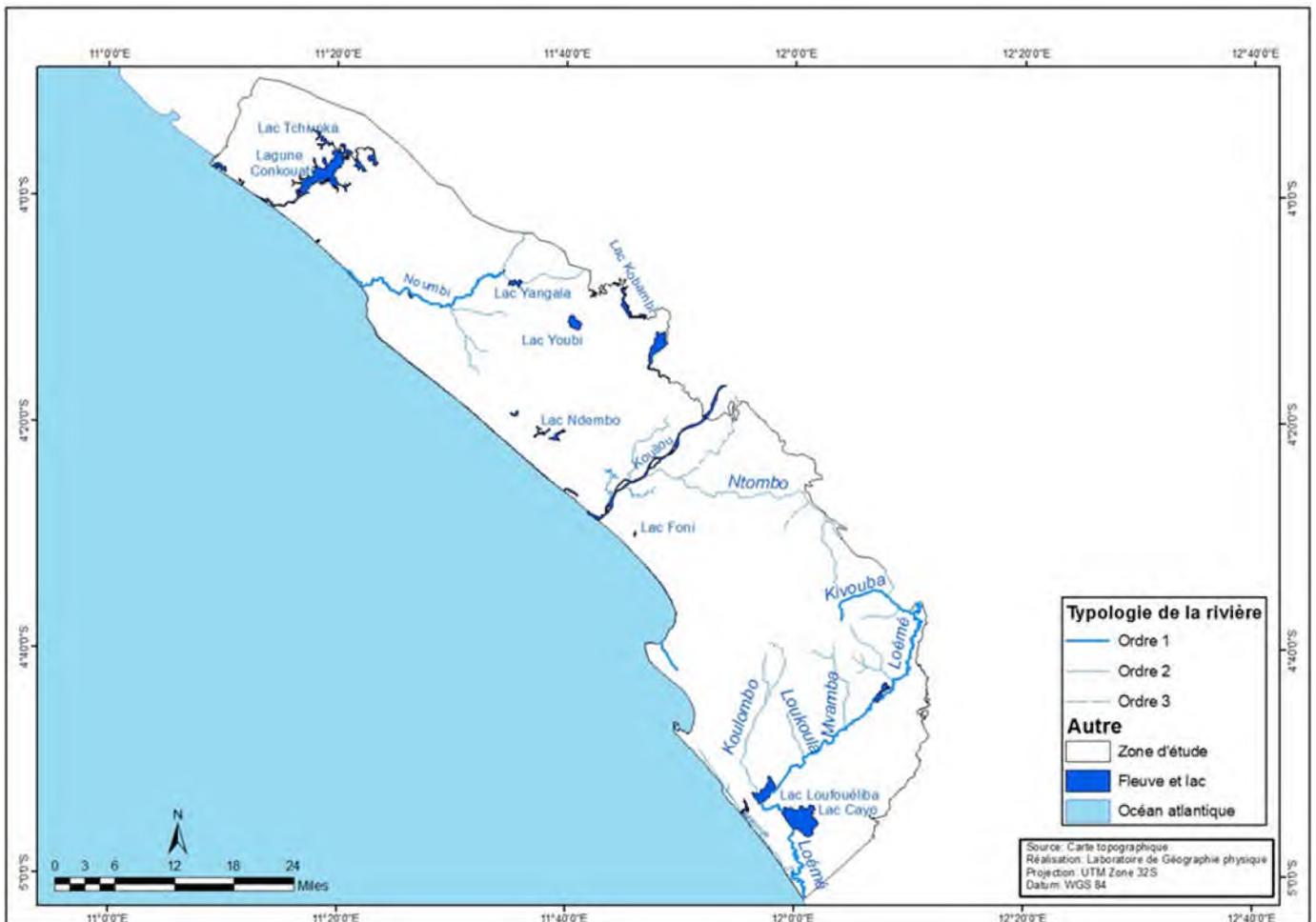


Figure. 12: Réseau hydrographique sur les plateaux côtiers

Les observations de terrain ont permis de constater que les sources de plusieurs cours d'eau se situent directement dans les cirques d'érosion. Les travaux de Sitou (1994) montrent que ces cours d'eau influencent considérablement la dynamique des cirques sur les plateaux côtiers. Par ailleurs, l'absence d'épandages au fond des vallées drainées dans la zone d'étude témoigne de la dynamique de ces cours d'eau, qui évacuent vers l'Océan les alluvions qu'ils arrachent sur les versants.

2.8. Une végétation diversifiée

Le paysage de la zone d'étude est en constante évolution du fait de la pression démographique exercée sur la forêt dans la zone. Ce paysage est donc composé d'une mosaïque de forêt naturelle-forêt artificielle (d'eucalyptus) et de savane, (Photo 2



Photo 2 : Mosaïque forêt naturelle- forêt artificielle -savane sur le plateau côtier entre les villages Toumbi et Kondi. (Cliché Mayima, 2012)

La photo 2 montre la présence d'une vallée dissymétrique dont le fond est drainé par un cours d'eau colonisé par une forêt naturelle. En arrière-plan, c'est-à-dire au sommet du versant droit se localisent des plantations d'eucalyptus et le versant gauche est occupé par la savane herbeuse.

La forêt naturelle, est de type équatorial sempervirent. Elle colonise surtout le fond des cirques, les bas-fonds, les vallées humides et les berges des cours d'eau. Elle existe sous forme de galeries forestières anthropisées et comprend entre autres des espèces comme *Symphonia globulifera*, *Manilka abovata*, *Piptademastrum africanum* (Cusset, 1989; Dowsett, et al 1991).

Les observations de terrain couplées à la carte de l'occupation du sol montrent que la savane a fait place, à plus de 80%, à un massif forestier artificiel composé en grande majorité d'eucalyptus et secondairement de pins et d'acacias.

La zone d'étude est occupée par une savane installée vers 3000 BP (Caratini et Giresse, 1990 ; Schwartz et al., 1990), entretenue par les feux annuels d'origine anthropique et par un processus de recul de la forêt (Schwartz, 1991). La savane est soit herbacée dominée par *Loudetia* et *Hypparhenia*, soit arbustive dominée par *Annona Senegalensis*, peuplements de

taille réduite (0,5 à 1,5 m de hauteur) et couvrant mal le sol (Kœchlin, 1961 ; Makany, 1963 ; Vennetier, 1968 ; Descoings, 1975 ; Loubelo, 1990 ; Dowsett et Lemaire, 1991 ; Loumeto et Huttel, 1997) (photo 3). La macrofaune du sol est peu diversifiée et peu abondante (3.3 g/m²) (Mboukou-Kimbatsa *et al.* 1998).



Photo 4 : Etat de couverture du sol par des graminées à Kondi ; cette savane est représentative de l'ensemble des savanes côtières (Cliché Mayima, 2012)

La photo 3 illustre parfaitement l'état de recouvrement lâche du sol par des touffes d'herbes. Les graminées laissent ici, plus de 60% d'espaces dénudés entre elles. Nous verrons plus loin que c'est à travers ce réseau de touffes d'herbes que s'organise le ruissellement responsable soit du décapage superficiel, soit du ravinement profond. Par ailleurs, l'état de pauvreté actuel de la partie aérienne de ces touffes comme le montre la photo, ne permet plus à cette dernière de jouer son rôle d'écran, en interceptant des gouttes de pluie, ce qui expose le sol à l'énergie des gouttes de pluie par effet splash.

CHAPITRE III

DES PAYSAGES AGRICOLES EN PLEINE MUTATION

Sur le plateau côtier, l'action anthropique occupe une place importante dans le déclenchement et le maintien de la dynamique actuelle. En effet, les populations à travers les différentes activités qu'elles mènent (agriculture) et les feux de brousse accidentels ou volontaires constituent un facteur de risque de ruissellement et de l'érosion hydrique. Ainsi, ce chapitre est consacré à la description des activités humaines, menées dans le cadre de cette afforestation susceptibles de nous aider à comprendre à terme la dynamique actuelle sur ce plateau.

3.1. De la démographie

La population de la région côtière est de 807.289 habitants dont 715.334, soit 89 % de cette population, se concentrent à Pointe-Noire (CNSEE, 2007), alors qu'elle était en 1990 estimée à 443.000 habitants dont environ 300 .000 habitants, soit près de 70%, vivaient dans la ville de Pointe-Noire (Oyomba, 1991).

La population résidant à Pointe-Noire connaît une augmentation considérable liée vraisemblablement au phénomène d'exode rural que connaissent la plupart de nos villes. En effet, cette population a été multipliée par 16 entre 1949 et 1990 et doublée entre 1990 et 2007. La proximité des plantations d'eucalyptus de la ville de Pointe-Noire provoque l'augmentation de l'activité agricole dans les villages environnants, par conséquent, une pression supplémentaire sur cet écosystème. En effet, sur un rayon de plus de 25 km les activités économiques sont soutenues par des allochtones qui viennent de Pointe-Noire.

Une étude socio-économique menée dans le massif d'eucalyptus par Bikouta (2011) montre que plus de 33 villages et campements sont directement concernés par le projet d'afforestation d'eucalyptus (Figure. 13.)



Figure 13. : Répartition des villages du massif d'eucalyptus du Kouilou (Source : Bikouta, 2011)

Les estimations de la population vivant dans les villages concernés par les plantations d'eucalyptus (hors de la ville de Pointe-Noire) en 2007 étaient de 32.995 habitants, pour le district de Hinda et de 13.290 habitants pour le district de Madingo-Kayes, qui ensemble représentent 11% de la population totale de la région côtière. Signalons, qu'entre 1992 et 2007, cette population rurale était passée du simple au double voire au triple pour les deux grandes localités : 7.500 habitants pour le district de Hinda et 2.000 habitants pour le district de Madingo-Kayes. Cette augmentation de la population rurale a des conséquences sur le défrichage des îlots forestiers occupant les fonds des vallées et cirques pour des raisons socio-économiques.

3.2. Des activités économiques dominées par la sylviculture

Deux types d'activités menées par l'Homme dans la zone d'étude peuvent potentiellement générer ou accroître les phénomènes de ruissellement et d'érosion. Il s'agit de l'agriculture sur brûlis et la culture intensive d'eucalyptus.

Les forêts galeries sont depuis de nombreuses années utilisées pour l'agriculture sur brûlis. Cette technique consiste à pratiquer un assolement sur une superficie définie. Les opérations commencent par le défrichage, l'abattage et le brûlage de la biomasse séchée. Une préparation manuelle est alors faite et le terrain planté avec une association manioc – maïs arachides.

L'agriculture pratiquée sur les plateaux côtiers se concentre sur les sols forestiers, alors que les savanes, pour des raisons de fertilité sont très peu utilisées. Ainsi, les populations préfèrent les sols forestiers auxquels ils attribuent une plus grande fertilité.

Cette agriculture traditionnelle itinérante sur brûlis, bien que peu productive est réalisée sans intrants ni machines et comporte un certain nombre de risques sur le déclenchement des ruissellements et d'érosions. En effet, la technique sur brûlis pratiqué durant la saison sèche, détruit respectivement la couverture forestière protectrice du sol en le laissant ainsi, exposée à l'énergie cinétique des gouttes de pluie et des éléments minéraux et organiques qui assurent au sol sa stabilité structurale.

Le binage qui suit, modifie, à travers le retournement des mottes de terre, la structure du sol et mettent en place une formation très affouillable. Enfin, le buttage et le billonnage créent, à travers les couloirs laissés entre les monticules qui portent les cultures, des espèces des rigoles empruntées par des eaux de ruissellement.

La deuxième activité agricole est la sylviculture d'eucalyptus. Le projet d'afforestation des plateaux côtiers par des plantations industrielles d'eucalyptus a commencé en 1951 à Pointe-Noire par des études de faisabilité.

Les peuplements actuels ont été pérennisés en 2.000 avec eucalyptus du Congo SA. ([ECO.SA](#)) ex l'Unité d'Afforestation Industrielle du Congo (UAIC) et occupaient une superficie de plus de 40.000 ha de plantations clonales réparties en deux blocs. Un bloc

d'environ 32.000 ha dans les environs de Pointe-Noire et l'autre de 8.000 ha située au nord de la ville après la traversée du fleuve Kouilou à Madingo Kayes Cf .figure1.

L'activité a été rachetée en 1988 par la Congolaise de Développement Forestier (CDF) , une participation à parts égales entre Shell Holdings Bermuda Ltd et l'UAIC, une société à capitaux 100% de l'Etat congolais, UAIC étant opérateur.

Par ailleurs, entre 1999 et 2005 la société ([ECO.SA](#)) est confrontée à des problèmes de trésorerie et se voit rachetée en 2005 par eucalyptus Fibre du Congo (EFC) filiale du groupe canadien Mag Industries, société de droit congolais gérant plus de 30.000 ha des clones d'eucalyptus

Depuis 2.000, cette activité est menée selon les techniques de sylviculture intensive mises au point par le Centre de Recherche sur la Productivité des Plantations Industrielles (CRDPI).

3.2.1. Description des activités de plantation d'eucalyptus

Deux activités concernent cette sylviculture intensive liée aux plantations d'eucalyptus dont le mode de gestion peut créer des conditions d'instabilité géomorphologique. Il s'agit des activités de plantations et de replantation.

3.2.1.1. Les opérations de plantation des eucalyptus

Les travaux de plantation dans une savane commencent d'abord par la phase de préparation du terrain. Auparavant la savane était détruite par le feu. Actuellement, la savane est défrichée à l'herbicide (glyphosate 3 litres/ha) puis on procède à un labour profond généralisé à la charrue à disques (8 à 16 disques de 35 cm de diamètre) quelques semaines avant la plantation (Photo 4).



Photo4 : Engin utilisé pour labourer le sol (Cliché Mayima, 2012)

La photo 4 montre l'engin de marque italienne « Landini » utilisé lors des opérations de plantation, de trouaison et de replantation pour effectuer un labour généralisé et profond. Il est équipé d'une charrue composée de 18 disques de 35 cm chacun. L'usage de cet engin lourd, très efficace pour labourer le sol en l'émiettant fortement. Cette façon de procéder constitue malheureusement une des causes de l'accélération de la sensibilité des sols à l'érosion.

Dans la phase de trouaison, les jeunes (plants) d'eucalyptus sont plantés dans les trous de 4 x 3,7 m avec une densité de 800 à 1.000 pieds /ha. Par ailleurs, on irrigue ces trous et on ajoute les engrais (NPK ou ammo- urée-nitrates). Cette opération a lieu en début de saison des pluies (en général entre novembre et décembre).

Cette étape se caractérise par un émiettement du sol et constitue une cause de l'accélération de la sensibilité des sols à l'érosion. Ainsi, après la plantation, l'état de surface fermé se met rapidement en place : croûte de battance qui caractérise un état des sols peu perméable à l'eau favorisant le ruissellement (Girault et *al.* 2000).

Les observations de terrain ont montré que la disposition parcellaire constituée en blocs, occupant parfois les versants aux pentes supérieures à 25% sans méthode antiérosive particulière, constitue un facteur de risque aggravant. En effet, sur les pentes généralement

supérieures à un seuil de 3%, des aménagements antiérosifs sont nécessaires pour permettre une cultu



Photo 5 : Exemple d'un parcellaire à Yoka Ngassi localisé sur un versant à pente supérieure à 25%, sans méthode antiérosive particulière (Cliché Mayima, 2010)

Les parcellaires sont séparés par un intense réseau de pistes d'exploitation (plus de 1.000 mille km de long et 6 à 7 m de large, orientées dans le sens de la pente) et de coupe-feux (3.000 mille km de long et plus de 4m de large). Leur maintien à nu lors des entretiens à la niveleuse pendant la saison sèche pour prévenir les feux de brousse qui parcourent régulièrement les plateaux côtiers, aggrave le risque de ravinement au niveau de ces pistes et coupe-feux. A peine quelques dizaines de mm d'eau tombée et le sol sableux se retrouve tassé et battu par les pluies puisqu'il n'y a pratiquement pas d'agrégats.

3.2.1.2. Les opérations d'exploitation des eucalyptus

La phase d'exploitation intervient 6 ans après la phase de plantation et dure toute l'année. Elle se caractérise par une coupe à blanc exécutée manuellement à l'aide des scies à moteurs. Une fois coupés, les eucalyptus sont extraits des parcelles par des engins lourds qui exploitent les pistes de débardage et les interligne. La première année après l'exploitation constitue une phase très sensible au phénomène du ruissellement et de l'érosion hydrique. En effet, la végétation est presque inexistante, les arbustes de la savane initiale ont été défrichés, les sols sont remués et ensuite compactés par des engins chargés d'évacuer les rondins. Toutefois, on observe la présence d'une litière assez abondante susceptible de protéger le sol contre l'action mécanique des gouttes de pluies.

3.2.1.3. Les opérations de (ré)- plantation des eucalyptus

Après la phase d'exploitation, intervient une replantation qui s'effectue sur les premières parcelles exploitées (plantation) qui, dans la réalité, créent les mêmes conditions de mise à nu des sols que la phase de plantation. Cette phase peut intervenir après 1, 2 ou 3 rotation et se caractérise par les opérations suivantes :

- ✓ la dévitalisation des souches après la coupe à blanc. Cette opération permet de tuer les souches des arbres précédents pour éviter qu'ils rejettent. On badigeonne les souches d'une solution contenant un herbicide (glyphosate, 3 ml par souche) immédiatement après la coupe;
- ✓ et un nettoyage aux disques et /ou traitement chimique (glyphosate) qui permet d'éliminer les adventices (Bouvet, 1999).

Au cours de cette phase, une partie du sol est protégée par les tiges mortes de la première plantation mais l'expose quand même au bombardement des gouttes de pluies. Les effets et risques d'érosion liés aux trois principales activités sont résumés dans le tableau (V).

Tableau V: Opérations sylvicoles et risques éventuels de ruissellement et de l'érosion hydrique

type d'opération	Matériels utilisés	Etat du couvert végétal	Etat de surface	Effets		Risques
				Saison sèche	Saison de pluie	
Plantation	Charrue à disque relativement lourd	Sol nu (savane détruite à l'herbicide)	Labour généralisé (destruction de la structure du sol avec croute sédimentaire remaniée)	Sol aéré et taux d'ouverture important	Compactage du sol avec un degré de ferme important	Risque élevé du ruissellement
Exploitation	Tracteurs	Coupe à blanc suivie d'une destruction du couvert végétal	Tassement du sol suite au passage répété d'engins	Ravinement et ensablement		Risque très élevé du ruissellement et d'érosion au niveau des pistes et coupe feux
Ré plantation	Charrue à disque relativement lourd	Sol couvert (rémanents détruite à l'herbicide)	Sol fermé suite aux opérations d'exploitation	Caractère instantané de ruissellement		Risque élevé du ruissellement

3.2.1.4. Les risques liés aux feux de brousse

Les feux de brousse constituent une des plus grandes menaces pour l'intégrité des écosystèmes de savanes et de plantations. Traditionnellement pratiqués en saison sèche, les feux sont généralement des feux courants. Ils sont d'origine volontaire ou involontaire. Leur intensité et leurs conséquences dépendent directement de la quantité de combustible disponible et des conditions météorologiques. Pendant la saison de pluie, le sol ayant subi l'action du feu est relativement dénudé, exposé à l'agressivité des pluies et du ruissellement jusqu'au moment où la strate de sous-bois reprend le dessus.

3.3. L'état de l'occupation du sol en 2000 et 2012

L'état de l'occupation du sol dans la région côtière et ses environs s'appuie sur une analyse diachronique des images satellites des années 2000 et 2012.

L'analyse diachronique de l'emprise des eucalyptus et des autres strates a été réalisée à partir des données de la télédétection, notamment les images satellites de la base de données cartographiques du Laboratoire de Géographie physique. Le plateau côtier et ses environs sont couverts par plusieurs scènes dont la plus ancienne date de l'année 2000 et la plus récente de 2012. Pour cela, cette analyse diachronique aura pour référence l'année 2000.

Entre 2000 et 2012, les modifications les plus importantes concernent les plantations d'eucalyptus et la zone périurbaine de Pointe-Noire (figures.14 et 15).

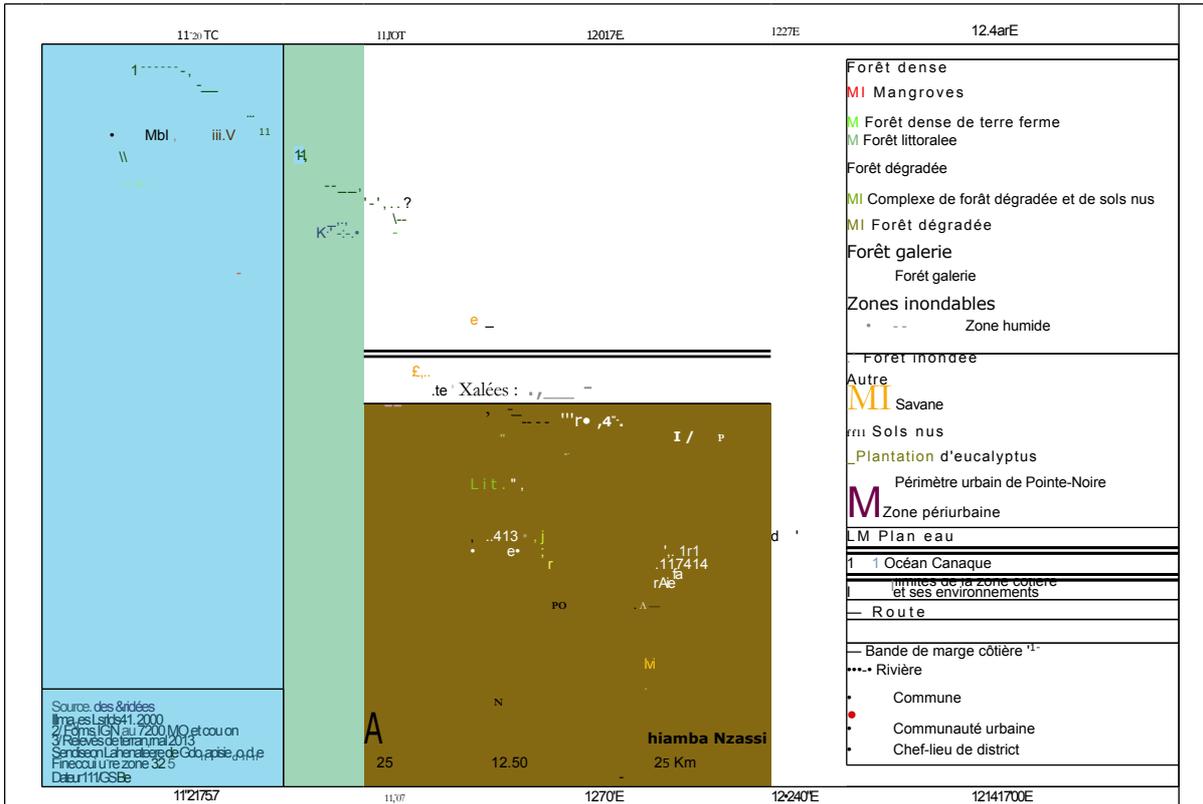


Figure 14 : Occupation des sols des plateaux côtiers et leurs environs en 2000

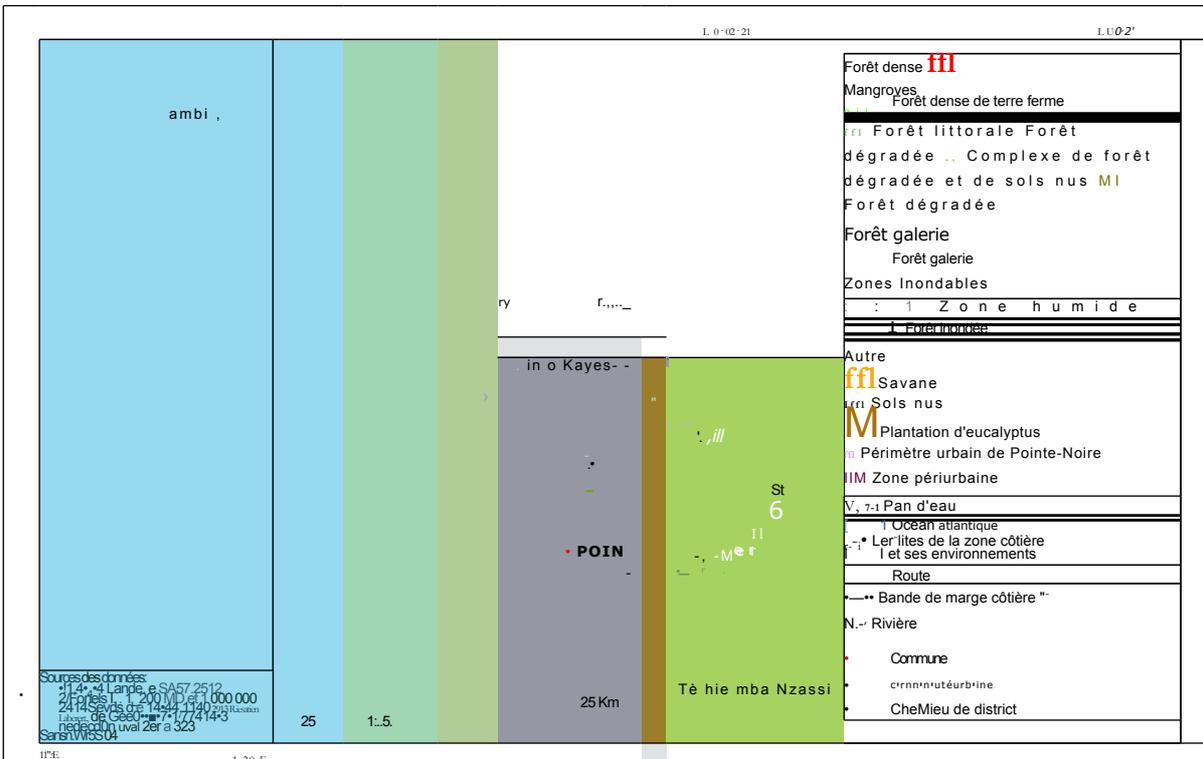


Figure 15 : Occupation des sols des plateaux côtiers et leurs environs en 2012

Tableau VI: Evolution de la superficie des différentes strates dans les plateaux côtiers de 2000 à 2012

Unités d'occupation du sol	Année 2000		Année 2012		Changement annuel en ha 2000-2012
	Superficie en (ha)	Pourcentage	Superficie en (ha)	Pourcentage	
Mangroves	8.055	1,87	7.468	1,2	- 587
Forêt dense de terre ferme	96.687	22,5	96.906	15,5	219
Forêt littorale	7.922	1,8	7.666	1,2	-256
Complexe de forêt dégradée et de sols nus	60.059	13,9	60.062	9.6	3
Forêt dégradée	20.381	4,7	198.234	31,7	177.853
Forêt galerie	12.935	3	11.935	1,9	1.000
Zone humide	18.833	4,4	35.891	5,7	17.058
Forêt inondée	58.971	13,7	59.289	9,5	318
Savane	87.850	20,5	88.053	14	203
Sols nus	149	0,03	66	0,01	-83
Plantation d'eucalyptus	40.367	9,4	36.941	5,9	-3.426
Zone périurbaine	16.979	3,9	23.278	3,7	6.299
Total	429.188	100	625.789	100	

Source : Données de laboratoire

De l'analyse des figures 14 et 15 et du tableau VI, il ressort de manière générale que les différentes strates naturelles d'occupation du sol du plateau côtier connaissent une régression assez marquée. Les eucalyptus, les sols nus, les forêts littorales et les mangroves ont vu leurs superficies régresser sensiblement, passant respectivement de 40.367 hectares en 2000 à 36.941 hectares en 2012, soit un taux de régression de 3,5 % en 12 ans.

Les sols nus, les forêts littorales et les mangroves ont aussi, durant la même période vu leurs superficies passer respectivement de 149 hectares à 66 hectares, soit 0,02 % ; 7.922 hectares à 7.666 hectares soit un taux de régression de 0,6 % et 8.055 hectares à 7.468 hectares soit 0,7 % pour les trois formations végétales. En revanche, une augmentation de la superficie a été observée pour la même période au niveau des savanes, des forêts dégradées, des forêts denses de terre ferme et de la zone périurbaine, passant de 87.850 hectares à 88.053 hectares soit un taux de progression de 6,4% en 12 ans pour la savane et 16979 hectares à 23.278 hectares soit une augmentation de 6.299 hectares en 12 ans pour la zone périurbaine.

Cet étalement de la ville a eu pour conséquence directe, non seulement la création de deux arrondissements en sus de (04) quatre existants, mais aussi, la dégradation des écosystèmes forestiers en général et en particulier les eucalyptus, se manifestant par un recul de ces derniers. Le recul de la superficie des formations végétales (forêts naturelles et eucalyptus) augmente le

degré de vulnérabilité de ce plateau vis-à-vis de l'effet splash des gouttes de pluies. En effet, le couvert végétal permet de lutter contre la dégradation des sols par l'érosion hydrique.

Conclusion partielle de la première partie

Le paysage de la région côtière est caractérisé par un étagement des surfaces de la plaine côtière, aux plateaux côtiers et aux collines pré mayombiennes. Les plateaux sont dans l'ensemble à pentes faibles (inférieure à 5%). Le long des versants convexes et à certains endroits. Les pentes peuvent atteindre et dépasser 20% le long des versants concaves. Les vallées qui les incisent prennent l'allure de ravins, surcreusés par des rivières. Les pluies qui tombent dans la zone sont très agressives, à la lumière des résultats que nous avons obtenus en calculant les indices d'agressivité climatique de Fournier, Wischmeier et Smith. Les sols sont ferrallitiques, très sableux avec les fractions argileuses plus limoneuses qui sont inférieures à 7%. La faible présence de matières organiques dans ces sols, les rend peu cohérents, donc très sensibles au phénomène de battance puis aux ravinements. Les activités anthropiques menées dans le cadre d'afforestation, notamment les techniques sylvicoles utilisées : labour profond à disque, mise en place des coupe-feux, sont les facteurs anthropiques qui accentuent la sensibilité du site vis-à-vis de l'érosion. Par ailleurs ; certaines modifications du sol sont introduites par les eucalyptus eux-mêmes: l'abondance de la litière peut s'avérer un facteur de la dynamique actuelle du ruissellement. Nous allons maintenant, dans la deuxième partie, caractériser le site expérimentale et de décrire la méthodologie d'approche.

DEUXIEME PARTIE

MATERIEL ET METHODES D'APPROCHE

Cette deuxième partie décrit les différents sites sélectionnés pour abriter les dispositifs des mesures de ruissellement et des érosions (chapitre 4) et dans le chapitre 5, le fonctionnement et les limites dudit dispositif ainsi que la méthodologie d'ensemble utilisée pour quantification desdits ruissellements et des dits érosions sous pluies simulées et sous pluies naturelles.

CHAPITRE IV

SITES EXPÉRIMENTAUX ET MATERIEL UTILISÉ

L'étude a été effectuée dans des sites expérimentaux sous forêt d'eucalyptus, sous savane, sur pistes et coupe-feux. Dans ce chapitre, nous caractérisons et présentons respectivement les différents sites ayant fait l'objet de nos expériences et les instruments de mesures. En revanche, pour des raisons de clarté, le matériel lié au dispositif de mesure de ruissellement (infiltromètre et case d'érosion) sont exposés au chapitre suivant.

4.1. Caractérisation des sites expérimentaux

4.1.1. Critères de choix des sites

La phase de travaux sur le terrain a commencé par une prospection de l'ensemble du massif d'eucalyptus avec une carte topographique au 1/100.000, afin d'identifier les sites propices à deux types de mesures, notamment les mesures sur mini parcelle d'érosion sous pluies simulées et les mesures sur parcelles d'érosion sous pluies naturelles.

A cet effet, les sites de Kondi et Kissoko ont été retenus pour la réalisation des simulations de pluie. Ils répondent aux critères arrêtés pour les types de mesures que nous avons à y effectuer. Il s'agit de :

- ✓ l'existence de plusieurs classes de pente : < 5%, 5-10%, 10-15% et > 15% ;
 - ✓ la diversité de mode d'occupation du sol : savane non brûlée, savane brûlée, plantations d'eucalyptus brûlées et non brûlées, piste, coupe- feux ;
 - ✓ l'existence de plusieurs générations et âges de plantations.
- Par ailleurs, les critères suivants ont guidé le choix des sites des mesures d'érosion

sous pluies naturelles :

- ✓ la nature de la végétation (eucalyptus jeune et adulte);
- ✓ le type de traitement correspondant à la pratique de l'entreprise EFC;
- ✓ la présence d'une station météorologique à proximité des sites au village pouvant permettre de recruter un observateur pour le gardiennage et la collecte des échantillons. L'âge de la plantation influence directement le taux de recouvrement du sol par la litière (effectif après 2 ans) et l'épaisseur de celle-ci. La litière forme une couche protectrice qui est

en mesure d'influencer le ruissellement et l'érosion. Ainsi, la classification utilisée est inspirée des travaux de Laclau et *al.* (2003) et se présente comme suit :

- ✓ de 0 à 2 ans : plantation jeune;
- ✓ de 2 ans à 7 ans : plantation adulte ;
- ✓ de 7 ans et plus : plantation vieille.

Les premières mesures sous pluie simulée obtenues par Mayima (2009) sur piste et coupe-feux, montrent que ces sites par essence sont de grands sites pourvoyeurs des ruissellements et d'érosion hydrique importants. Pour ne pas voir le dispositif de mesure obstrué ou simplement évasé par des transports solides importants, au cours de grosses averses, il ne nous a pas paru opportun d'installer des parcelles de mesures sur ces types de sites.

Ainsi, au total quatre (04) parcelles d'érosion ont été installées dont (03) dans la plantation d'eucalyptus et une (01) parcelle sous savane naturelle.

Le site de Kondi, étant le seul site remplissant les conditions citées ci- dessus, il a été retenu pour des mesures sous pluie naturelle.

4.1.2. Caractéristiques des sites expérimentaux

Il s'agit, ici, de caractériser les sites faisant aussi bien l'objet des mesures sous pluies simulées que sous pluies naturelles. Ainsi, les sites suivants ont été retenus :

- ✓ site de savane ;
- ✓ site de vieille plantation d'eucalyptus 7ans et plus;
- ✓ site de jeune plantation d'eucalyptus replantée 2 ans ;
- ✓ site de taillis adulte 3 ans ;
- ✓ zone de coupe-feux ;
- ✓ zone de piste.

4.1.2.1. Site de savane

Le premier site est situé dans le village Kondi, à plus de 2 km de la station météorologique du site expérimental du CRDPI. La savane sélectionnée pour abriter cette parcelle expérimentale est représentative de la majorité des savanes qui couvraient les plateaux côtiers avant la plantation d'eucalyptus. L'espèce de graminée dominante est *Loudetia arundinacea* (Hochst) Stend. Et la seule espèce arbustive (*Anona arenaria* Thorp) présente une densité très faible (<10 individus ha^{-1}) d'après Laclau (2001). La parcelle expérimentale de 90 m² de superficie a été installée sur un versant dont la pente est de 25% (photo 6).



Photo 6 : site expérimental de savane à *Loudetia* à Kondi : Latitude 4°55'48,6''S, Longitude 11°91'36,8''E, Altitude 27 m, et N- 265° Exposition (Cliché Mayima, 2012)

La savane à *Loudetia arundinacea* représente ici environ 80% de la matière sèche aérienne tout au long de l'année. Sur ce site, le système racinaire de cette espèce a été observé sur quelques individus : il est noduleux et représente environ 75% de la matière sèche totale. La biomasse totale de cette espèce peut atteindre environ 0,8 à 1 Mg ha^{-1} en fin de saison des pluies (Laclau, 2001), ce qui naturellement devrait avoir un effet d'atténuation sur l'énergie cinétique des gouttes de pluies (effet splash) si la savane reste intacte, c'est-à-dire sans feu de

brousse : situation impossible sur les plateaux côtiers congolais où les savanes sont annuellement brûlées pour diverses raisons.

4.1.2.2. Site de vieille plantation d'eucalyptus non brûlée

La deuxième parcelle de 90 m² de superficie a été installée dans une vieille plantation d'eucalyptus de plus de 10 ans, sur un versant ayant une pente de 7% (photo 7). Le site abritait l'essai CIFOR mis en place par le CRDPI en 1998 dont le but est d'étudier l'influence des résidus d'exploitation sur la fertilité du sol et la croissance des arbres. Ce site est recouvert par une importante quantité de litière fixée par un mat racinaire et conservée, depuis plus de 10 ans (Laclau, 2001).



Photo 7 : Plantation d'eucalyptus âgée de plus de 10 ans à Kondi Latitude 4°57'91,6''S m, Longitude 11°90'57,8''E m, Altitude 98 m et N-264° Exposition (Cliché Mayima, 2012)

Cette litière, d'après les observations de terrain couplées aux travaux de Safou-Matondo et *al.*, (2001) est constituée des feuilles mortes et d'un réseau important de branchettes et d'écorces sèches qui tombent des eucalyptus (photo 8). L'absence de sable délié sur ce site, tend à confirmer qu'il n'y a pas eu de transport. Mais ces observations seront confirmées par des expérimentations dont les résultats sont présentés et discutés dans la troisième partie de ce travail.



Photo 8 : Branchettes et écorces qui enrichissent la litière sur clone 1-41 à Kondi (Cliché Mayima, 2012)

Ce clone est caractérisé par la présence d'un mat racinaire dense situé au-dessus du sol, au contact des fragments de litière en cours de décomposition et mesure à certains endroits plus de 4 cm d'épaisseur dans la plantation d'eucalyptus (photo 9).



Photo 9 : Système racinaire superficiel sous litière, clone 1-41 à Kondi (Cliché Mayima, 2012)

Au-delà de 3 ans, ce clone voit sa canopée s'éloigner du sol à une hauteur de plus de 25 m (photo10). En conséquence, les gouttes de pluies qui sont interceptées et relâchées après, redoublent d'intensité et deviennent très agressives entre la distance qui sépare la canopée et le sol



Photo 10 : Canopée du clone 1-41 dans la parcelle CIFOR à Kondi (Cliché Mayima, 2012)

4.1.2.3. Site de jeune plantation d'eucalyptus

Il s'agit d'une jeune plantation replantée sur un site de 8% de pente, il y a deux ans. Cet hybride (PF1) est le plus couramment planté dans les plateaux côtiers en raison de ses performances industrielles pour la production de pâte à papier. La préparation de la parcelle s'est faite en dégageant manuellement du bois de chauffe. L'épandage d'herbicide s'est fait aussi manuellement. En revanche, plantation manuelle de 800 plants ha⁻¹ la fertilisation de la parcelle se fait uniquement sous la forme d'ammonitrate, à raison de 43, 2 kg Nha⁻¹, déposé à 5 cm de profondeur dans trois emplacements autour du jeune pied d'eucalyptus (Laclau, 2001).



Photo 11 : Jeune eucalyptus de 3 ans replanté à Kondi Longitude 11°90'40,2''E, Latitude 4°58'01''S, Altitude 114 m et N- 264° Exposition (Cliché Mayima, 2012)

Les observations, sur ce type de site, montrent que la quasi-totalité de la surface est occupée par les sédiments sableux, signe d'une dynamique érosive lors de la première année. Par ailleurs, on remarque que la canopée est encore très ouverte et peu élevée, la litière et le mat racinaire sont encore absents. Ceci expose encore le sol à l'énergie cinétique des gouttes de pluie.

4.1.2.4. Site d'eucalyptus en taillis

Le taillis consiste à couper quelques rejets qui poussent autour de la souche après la coupe à blanc et à conserver d'autres qui doivent atteindre la maturité (Laclau, 2001). Cette opération est réalisée manuellement une année après la coupe. Après deux ans, on observe encore la présence de rémanents de la première coupe et la présence non négligeable de la litière et du mat racinaire qui couvrent et protègent le sol contre l'effet splash. Il faut signaler qu'au cours de cette action, le sol reste relativement intact, car toutes les opérations y relatives sont menées manuellement.



Photo 12 : Site de taillis de 3 ans à Kondi longitude 11°90'50,6''E, latitude 4°57'92''S, altitude 103 m et N- 264° l'exposition (Cliché Mayima, 2012)

4.1.2.5. Zones de coupe-feu et piste

Les coupe-feux et pistes sont mis en place par l'industriel respectivement, afin de lutter activement contre les feux de brousse qui sévissent dans la zone durant la saison sèche (juin-sept) et de permettre la circulation des engins lors des opérations d'exploitation. Les coupe-feux et pistes constituent un réseau dense de zones dénudées sous plantation. Les mesures de terrain montrent que ces coupe-feux et pistes mesurent en moyenne 12 mètres de largeur et font l'objet d'un entretien à la charrue à disque en saison sèche qui remue le sol, dont les caractéristiques sont décrites dans la première partie de ce travail

Les observations de terrain, nous ont amené à constater que ces coupe-feux sont mis en place sans tenir compte du sens des pentes et sans mesures antiérosives particulières (photo13). Les pistes d'accès dans les plantations d'eucalyptus par contre sont moins nombreuses. Elles mesurent en moyenne 6 mètres de large et ne sont entretenues que pendant la période d'exploitation qui généralement intervient après 6 ans (photo14).

Par ailleurs, nous verrons plus loin que pendant la saison des pluies, ces sites se transforment en véritables collecteurs d'eau de ruissellement en provenance des champs d'eucalyptus.



. **Photo 13 & 14 : Coupe-feu à Kissoko et piste à Kondi (Cliché Mayima, 2013)**

4.2. Instruments de mesures

Les instruments de mesures suivants ont été utilisés pour évaluer un certain nombre de variables sur le terrain:

- ✓ un chronomètre pour la prise de temps ;
- ✓ une balance mécanique pour mesurer le poids des sédiments;
- ✓ un clinomètre Suunto pour relever les valeurs des pentes en pourcentage ;
- ✓ un GPS pour prendre des coordonnées géographiques ;
- ✓ (Carte topographique) SB-32-VI, Pointe-Noire Fond IGN WGS_1984_UTM_zone 32S, 1/200.000 (2014)
- ✓ (Carte topographique) SA-32-XXIV, Coukouati Fond IGN WGS_1984_UTM_zone 32S, 1/200.000 (2014)
- ✓ SB-33-I Dolisie, WGS_1984_UTM_zone 33S, 1/200.000 (2014)
- ✓ Esquisse de schéma directeur de Pointe-Noire, WGS_1984_UTM_zone 32S ;
- ✓ Carte générale du Congo, WGS_1984_UTM_zone 33S, 1/1 000 000(1993) ;
- ✓ une carte topographique au 1/100.000 pour repérer les classes de pente ;

- ✓ un SRTM (P184r063) de résolution 30 m prise en 2000 est ortho-rectifiées et projetées dans le système cartographique de coordonnées projetées WGS 1984 UTM 32S. Il a permis d'acquérir une connaissance fine du relief, de créer la carte de classes de pentes, de corriger le réseau hydrographique.
- ✓ Images SPOT 5 prises en 2010, résolution spectrale (2,5 m), couvrant la plaine côtière et ses marges sur 180 km. Ces images nous ont permis d'élaborer la cartographie des changements d'usage des sols.
- ✓ Images LANDSAT couvrant Pointe-Noire et ses environs (P184r063) dont les dates de prise de vue sont 2000 et 2012 ont été utilisées. Ces images de haute résolution spatiale (30 m), nous ont permis de faire l'analyse diachronique du couvert végétal.
- ✓ Un orthophotographie 2012, gratuitement acquise sur Google Earth en mode infrarouge couleur de haute résolution spatiale couvrant Pointe-Noire et ses environs. Elle a également contribué à l'élaboration des cartes de l'occupation du sol.

CHAPITRE V

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'approche méthodologique a constitué la phase essentielle de notre travail de recherche. Elle se résume en trois grandes étapes suivantes : la recherche documentaire, le travail de terrain et de laboratoire.

5.1. Recherche documentaire

La recherche documentaire a constitué la première étape de notre travail ; elle nous a permis non seulement de faire l'état des lieux sur ce qui a été fait en matière d'érosion sous plantation et d'orienter notre propre étude, mais aussi de préparer le travail de terrain proprement dit. A cet effet, nous avons exploité respectivement des thèses, mémoires, articles, traités, précis, rapports et certains documents iconographiques et images. La recherche documentaire a été aussi pour nous tout au long de la période d'investigation, un exercice continu et riche d'enseignements. La recherche sur le web a été également bénéfique.

5.2. Travail de terrain

Le travail sur le terrain a constitué la deuxième étape de notre étude. Il a concerné : les mesures de terrain et l'observation. Les mesures de terrain ont porté respectivement sur le ruissellement puis l'érosion à partir de mini-parcelles expérimentales sous pluie simulée et de parcelles expérimentales sous pluie naturelle. Pour permettre la recherche des indices pouvant nous aider à interpréter et comprendre la dynamique actuelle, les observations de terrain ont été menées de façon continue sur les plateaux côtiers.

Par ailleurs, une série d'entretiens a été aussi menée avec les agents et cadres de la cellule d'aménagement de l'entreprise E.F.C chargés de gérer ces plantations d'eucalyptus. Ces entretiens avaient pour objectif de recueillir certaines informations susceptibles de nous aider dans la compréhension de la dynamique actuelle en cours sur ces plateaux.

5.2.1. Détermination et évaluation des variables explicatives de la dynamique érosive

Il s'agit de la détermination et de l'évaluation d'un certain nombre de facteurs ou variables qui vont nous permettre d'expliquer la genèse du ruissellement et de l'érosion au sein

et à la périphérie des plantations d'eucalyptus. Ces variables ont été évaluées indépendamment des expérimentations concernées par la quantification du ruissellement et de l'érosion. Elles ont été évaluées respectivement sur le terrain et au laboratoire. Il s'agit entre autres de la pente, des états de surface, de la densité apparente et de la texture du sol.

5.2.1.1. Détermination des pentes des parcelles expérimentales

La pente est un paramètre fondamental qui influence ou explique considérablement la dynamique du ruissellement et de l'érosion par sa forme, son inclinaison et sa longueur. Plusieurs mesures aux champs ont permis de mettre en évidence son rôle dans le déclenchement de l'érosion (Batti et *al*, 2007) et (Duley et Hays, 1933 ; Zingg, 1940 ; Borst et Woudburn, 1949), tous cités par Roose (1977). Tricart (1974) et Riou (1990) ont observé également le même phénomène en Amérique latine.

Dans le cadre de cette étude, les valeurs des pentes des parcelles expérimentales ont été mesurées sur le terrain à l'aide du clinomètre de poche comme suit : sur le versant, un piquet est planté dans le sol ; un repère y est fixé à la hauteur des yeux de l'opérateur qui se positionne en aval, à 10 mètres du piquet.

La pente est obtenue à partir d'une simple lecture faite sur l'orifice du clinomètre où il est inscrit deux graduations. La première est à gauche qui indique l'angle en degré et la deuxième est à droite qui donne l'angle en pourcentage (%), ceci par rapport au plan horizontal. Nous avons utilisé les graduations en pourcentage.

5.2.1.2. Évaluation des états de surface

Les états de surface sont des variables qui permettent d'apprécier le comportement hydrodynamique des sols vis-à-vis de l'érosion (Casenave et Valentin, 1992 ; Augéard et *al* ; 2005). Notre étude s'est focalisée sur quatre paramètres explicatifs d'entre eux, plus pertinents dans notre contexte: les surfaces nues (%), couvertes (%), ouvertes (%) et fermées (%). Le sol est considéré comme nu lorsqu'aucun élément ne le couvre, lorsque sa surface n'est effectivement pas protégée par une feuille ou un autre objet contre les gouttes de pluie. Le sol est considéré comme couvert lorsque sa surface est effectivement couverte par un tapis de feuilles mortes ou d'autres objets pouvant empêcher les gouttes d'eau de pluie d'atterrir directement sur le sol. Sur les surfaces couvertes, les processus de détachement de sol, par effet Splash, seront réduits voire inexistantes. Un sol ouvert est dans l'ensemble meuble et aéré du

point de vue structure. Sur un sol ouvert l'eau s'infiltré facilement. Le sol est considéré comme fermé s'il est cohérent ou très peu meuble en surface. Dans ces conditions, l'infiltration est réduite voire inexistante. En effet, sur un sol fermé la pluie peut rapidement produire une nappe d'eau libre à la surface du sol qui finira par ruisseler.

Ces variables facilement mesurables et observables sur le terrain constituent des indicateurs de risque de ruissellement et d'érosion dans la zone d'étude.

Les états de surfaces ont été évalués par la méthode dite des points quadrats (Roose, 1996). Cette méthode consiste à effectuer 30 mesures environ des quatre paramètres ci-dessus énumérés, sur une distance de 3 m à raison d'une mesure tous les 2 cm pour le test de simulation et tous les 20 cm pour les parcelles d'érosion. Les chiffres un (1) et zéro (0) ont été utilisés pour exprimer l'existence ou l'inexistence de la variable en ce point de lecture.

Le degré d'ouverture et de fermeture du sol s'apprécie à l'aide d'une tige qu'on enfonce dans le sol. Le sol est dit ouvert (SO) quand la tige s'y enfonce librement et fermé (SF) lorsque la pointe de la tige s'y enfonce difficilement (présence d'une croûte de battance, zones de tassement du sol et la présence de cailloux dans la masse du sol). Ainsi ces appréciations rapportées dans un tableau (cf. tableaux annexe), ont été transformées en pourcentage pour chaque type d'état de surface rencontré selon la formule suivante :

- ✓ %
$$\frac{\text{le nombre de points dont le sol est nu}}{\text{le nombre total des points observés le long de deux diagonales}}$$
 du sol nu
- ✓ % de la surface couverte = 100% - % du sol nu
- ✓ % du sol ouvert =
$$\frac{\text{le nombre de points dont le sol est ouvert}}{\text{le nombre total des points observés le long de deux diagonales}}$$
- ✓ % de la surface couverte = 100% - % du sol fermé

5.2.2. Approche par simulation de pluie

La simulation de pluie consiste à produire des averses artificielles proches de la réalité contrôlée sur des surfaces limitées (de l'ordre du mètre carré) à l'aide d'un dispositif d'aspersion appelé simulateur de pluies, afin de mesurer le ruissellement et les pertes en terre (Barthes, 1998). Dans le cadre de cette étude, un irrigateur à rampe conçu selon le modèle Asseline et Valentin (1978) a été utilisé.

5.2.2.1. Simulateur de pluie : dispositif et fonctionnement

Les simulations ont porté sur des surfaces de 1m^2 , soit des espaces de 1,66 m de long sur 0,61 m de large. Ce simulateur simplifié apporte peu d'énergie mais distribue régulièrement les gouttes (diamètres 3 mm) et permet de mesurer, la pluie d'imbibition (P_i mm) et l'infiltration à l'équilibre, dite infiltration finale (I_f mm/h) sur un sol remanié et de pentes fortes (25%). Les intensités de pluies simulées se situent entre 60 et 80 mm/h avec 50 mm de hauteur.

Le simulateur de pluie est constitué du matériel suivant :

- ✓ une rampe d'arrosage de 50 cm ;
- ✓ un tuyau souple de 10 mètres de long;
- ✓ une cuve d'eau d'une contenance de 200 litres ;
- ✓ un tabouret métallique de 1mètre de hauteur;
- ✓ un cadre métallique de 1,66 m de long sur 0,60 m de large, soit 1m^2 de superficie (photo 15)



Photo 15 : Simulateur de pluie installé sur une piste à Kondi (Cliché Mayima, 2012)

Pour recueillir les eaux de ruissellement, nous avons conçu un dispositif de réception situé à l'aval de la parcelle expérimentale. Pour cela, il a été nécessaire de bien nettoyer la partie

inférieure de la parcelle et creuser à moins de 5 cm le long de la limite et horizontalement. Une quantité suffisante de plâtre, malaxée au préalable dans un seau en plastique, est appliquée le long de la limite jusqu'à la petite fosse servant d'exutoire.

Cet irrigateur simule des pluies qui produisent des ruissellements qui sont mesurés par le biais d'un dispositif de réception que nous avons conçu à l'aval de la parcelle expérimentale.

Une bâche adhérente au plâtre, a été mise dessus. Une conduite de collecte a été ensuite conçue à l'aide d'un tuyau PVC de 15 cm de long et 8 cm de diamètre pour rassembler l'eau de ruissellement ainsi que les sédiments érodés. Ces eaux ont été recueillies dans un récipient d'un litre, installé en dessous du partiteur dans un trou d'environ 40 cm (photo16).



Photo 16 : Dispositif de réception des eaux du ruissellement (Cliché Mayima, 2012)

Les expérimentations proprement dites passent par les opérations et étapes suivantes :

1°/ - La cuve est remplie par 150 litres d'eau ou plus de façon à limiter toute diminution de débit liée à la perte d'énergie potentielle relative elle-même à la réduction de la hauteur d'eau ; l'expérience ne nécessitant que 60 à 80 litres ;

2°/ - Une intensité dite de départ de 60 mm/h, soit (11 /min) est calée en amont, avant l'expérience, à l'aide d'une éprouvette d'un litre graduée après plusieurs essais en jouant sur

l'ouverture du robinet. Sans toucher au robinet, en conservant le même jet d'eau, une autre intensité dite de départ est mesurée en aval de la parcelle de la même manière ;

3°/ - Sans toucher une fois de plus au robinet, un opérateur commence tout de suite à simuler la pluie sur la parcelle expérimentale pendant trente minutes en arrosant à l'état naturel le plus régulièrement possible à la hauteur de plus ou moins 80 cm par plusieurs mouvements aller et retour ;

4°/ - Un autre opérateur mesure le ruissellement au bas de la parcelle à partir du dispositif de réception ;

5°/ - Après les trente minutes les intensités dites d'arrivée sont mesurées en amont puis en aval, avec le même jet d'eau, dans les mêmes conditions;

6°/ - Afin de contrôler que l'arrosage est homogène, deux pluviomètres de 55 ml ont été installés en amont et en aval ;

7°/ - L'intensité moyenne de la pluie simulée utilisée dans le calcul du taux de ruissellement est déduite de l'intensité moyenne de départ et de l'intensité moyenne d'arrivée.

La détermination de l'intensité de départ qui a été appliquée (60 mm/h) est faite en tenant compte des moyennes annuelles calculées sur une période de sept (7) ans à partir des données des stations locales (tabl II.), au lieu des intensités décennales (10 ans) conseillées par Roose (1977).

Ce choix se justifie par les raisons suivantes : les intensités décennales sont des intensités de retour en 10 ans et ne sont que des probabilités sur une moyenne de 10 ans, les phénomènes de ruissellement et d'érosion se produisent généralement au cours de chaque averse. Les intensités situées entre 60-80 mm en demi-heure sont plus régulières.

La simulation proprement dite nécessite trois opérateurs : le premier arrose la parcelle, le second récupère les eaux de ruissellement et fait la lecture et le troisième remplit la fiche de terrain et vérifie le temps à l'aide d'un chronomètre.

Les paramètres suivants constituent les principales mesures obtenues :

✓ La pluie d'imbibition (P_i en mm) qui représente la quantité de pluie simulée tombée avant le déclenchement du ruissellement. Elle est aussi appréciée à partir du temps qui s'écoule avant le début du ruissellement:

- $P_i = I_{nt} \times T$

- Avec I_{nt} : Intensité d'eau d'arrosage (l'intensité appliquée se situe entre 60 et 80 mm.h⁻¹);

✓

T : Temps de déclenchement du ruissellement;

✓ Le taux de ruissellement (RU) est la quantité d'eau ruisselée en 30 minutes, recueillie directement à l'exutoire de la parcelle de mesure et transformée en pourcentage selon la formule :

$$\% \text{Ruissellement} = \frac{\text{Intensité de ruissellement en mm/h}}{\text{Intensité de pluie en mm/h}}$$

✓ L'infiltration stabilisée appelée finale (I_f mm/h=infiltration à saturation) est obtenue à partir de la formule suivante :

- $IP - Ir = If$

- IP = intensité de pluie (mm/h)

- Ir = intensité de ruissellement (mm/h)

- If = intensité d'infiltration (mm/h)

5.2.3. Parcelles d'érosion de type Wischmeier : Dispositif et fonctionnement

Les quatre (4) parcelles d'érosion sont isolées de l'extérieur par des morceaux de tôles de 9 cm de large fichées en terre sur une profondeur de 5 cm pour éviter la pénétration des eaux qui viennent de l'extérieur (fig. 16).

Le long de ces tôles, un bourrelet en terre a été renforcé dans sa limite supérieure (en amont) afin d'éviter l'intrusion des eaux de ruissellement venant de l'amont. Par ailleurs, les rebords inférieurs, de part et d'autre de la cuve, ont été également renforcés pour éviter les débordements d'eau vers l'extérieur. A l'intérieur, ils sont doublés d'une gouttière cimentée d'environ 10 cm de large destinée à conduire le ruissellement vers la cuve sans provoquer l'érosion linéaire artificielle du fait de la concentration du ruissellement en cet endroit.

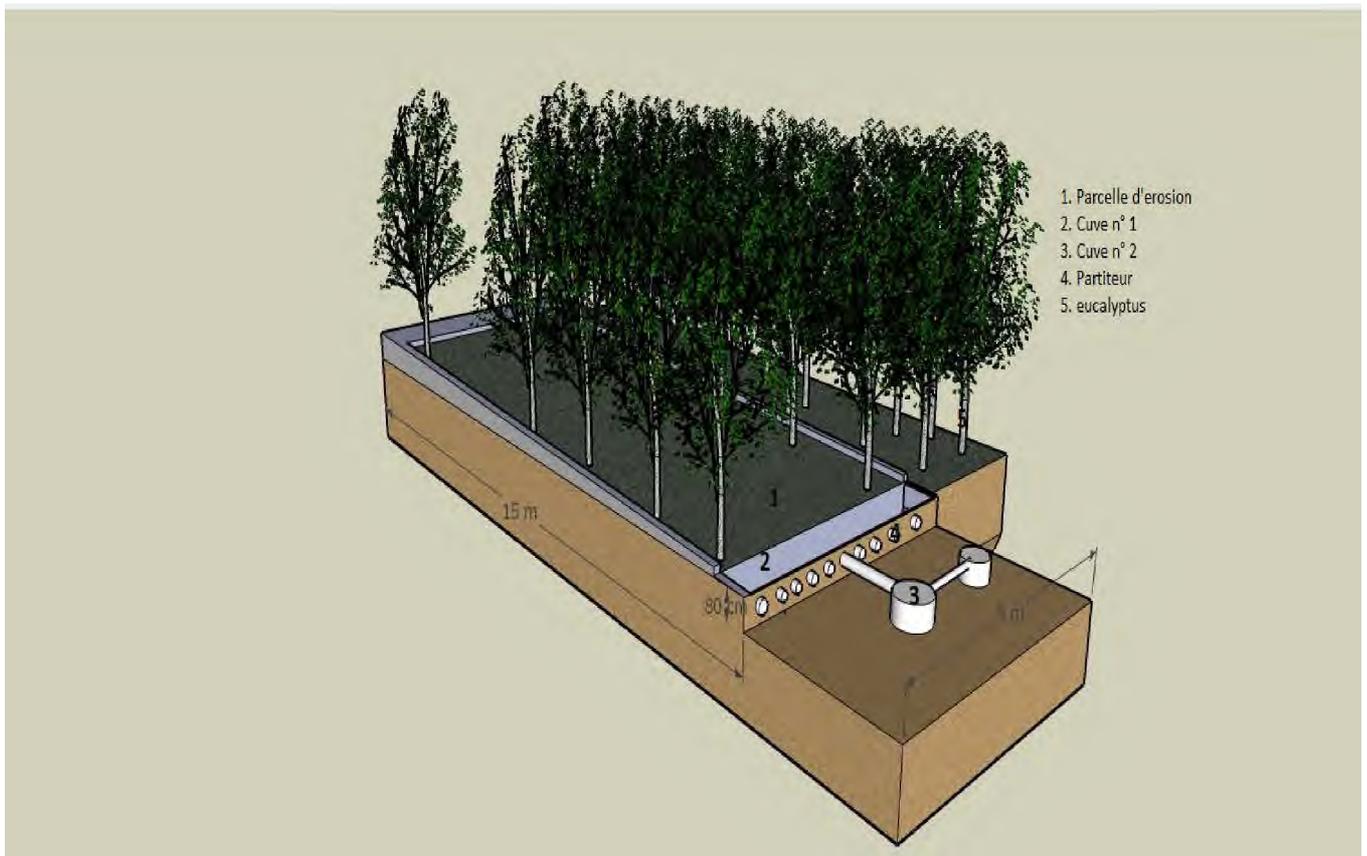


Figure. 16 : Vue en 3D d'un type de station expérimentale de mesures d'érosion installée à Kondi (Croquis sans échelle)

Le dispositif récepteur des eaux du ruissellement est constitué de deux cuves reliées par un partiteur. La première cuve (Cuve A) est destinée à recueillir le ruissellement de la parcelle. C'est une cuve cimentée, réalisée en parpaings, de 2 mètres de long, 80 cm de large et 50 cm de profondeur, soit un volume de 800 cm³ (Photo 17)



Photo 17: Construction de la cuve (A) (Cliché Mayima, 2011)

Cette cuve est aussi conçue pour stocker les terres de fond (sable et agrégats, etc.) et une lame ruisselée sur la parcelle d'environ 2 mm, son fond est légèrement incliné pour faciliter la récupération ou l'évacuation de l'eau. Cette cuve n'est pas couverte, la pluie y pénètre. A chaque événement, la fraction d'eau qui tombe directement dans la cuve est soustraite lors du calcul du ruissellement.

Si, au cours d'un événement, cette cuve A se remplit, le trop plein déborde dans un fût métallique d'environ 200 litres servant de seconde cuve (Cuve B), par l'intermédiaire d'un partiteur qui permet de ne prélever qu'environ 10%, 15%, ou 16% du ruissellement. Le partiteur est constitué de dix tubes en PVC de 40 mm de diamètre et 5 cm de long, disposés horizontalement sur le bord de la cuve «A ». Une bonne horizontalité est obtenue en noyant horizontalement les dix tubes dans du béton très coulant. La parfaite horizontalité des dix tubes est indiquée à partir d'un niveau à bulle. (Photo18).



Photo 18 : Processus de sélection du partiteur de la cuve (A)
(Cliché Mayima, 2011)

La proportion du ruissellement qui débordera dans la cuve « B » doit être déterminée le plus précisément possible car les imperfections de réalisation font que les 10 tubes n'ont pas un fonctionnement parfaitement identique. On fait donc artificiellement déborder la cuve et on mesure le ruissellement de chaque tube, pour différentes vitesses de débordement.

Le tube qui a le comportement le plus stable sera sélectionné comme meilleur tube pour déverser 10% du volume de débordement dans la deuxième cuve, même s'il s'éloigne de la valeur de 10 %, l'importance étant la stabilité plus que la valeur elle-même.

Après jaugeage, le tube sélectionné sera le seul connecté au moyen d'un tuyau en PVC et dirigé vers la deuxième cuve B (photo 19). La cuve « B » permet ainsi de stocker le ruissellement d'une lame de 65 mm environ. Elle est couverte ce qui empêche l'eau de pluie d'y pénétrer.



Photo 19 : Bon partiteur retenu après sélection (Cliché Mayima, 2011)

5.2.3.1. Mesures dans la cuve «A» en ciment

Pour chaque événement pluvieux, l'opérateur note les caractéristiques de la pluie au niveau du pluviomètre. La quantité d'eau et la quantité de terre de fond sont récupérées dans les cuves. On calcule ensuite la hauteur dans la cuve A en faisant la moyenne des hauteurs aux quatre coins (HA) à l'aide d'une règle graduée, ce qui permet de prendre en compte la non horizontalité du fond.

Si la cuve (A) n'a pas débordé, on prélève un échantillon d'eau pour mesurer la matière en suspension du ruissellement. Lorsque l'opérateur arrive après un événement pluvieux, l'eau a en général eu le temps de décanter dans les cuves. Pour obtenir une turbidité plus proche de celle du ruissellement qui s'est produit, l'eau de la cuve est agitée avant d'être échantillonnée, puis on prélève immédiatement un échantillon de 5 litres une dizaine de fois successivement pour avoir une bonne représentativité des matières en suspension.

Ces matières en suspension correspondent aux sédiments fins susceptibles d'être entraînés loin de la parcelle contrairement aux terres de fond qui restent dans la cuve (A) et n'aurait pas été transportées très loin de la parcelle. Cette méthode ne fournit qu'une approximation de la turbidité réelle du ruissellement, mais cette dernière est de toute manière une donnée subjective car les dépôts de sédiments ont lieu de manière progressive en fonction de la taille des sédiments. La cuve est ensuite vidangée en jetant le reste de l'eau à l'extérieur.

Les terres des fonds sont ensuite récupérées dans un ou plusieurs seaux et pesées. Ces seaux doivent être complétés par l'eau jusqu'à débordement. Cette précaution permet à partir de leur poids total et du volume du seau, de déduire le poids sec de terres de fond en faisant une hypothèse sur la densité du matériau (donnée relativement stable). Cette méthode simplifie considérablement le calcul du poids de terres de fond car elle évite de devoir sécher les échantillons.

5.2.3.2. Mesures dans le fût (cuve « B »)

Si la cuve « A » a débordé dans la cuve B, on pèse les terres de fond dans la cuve « A » comme indiqué plus haut, puis on prélève l'échantillon de matière en suspension dans la cuve « B ». Pour ce faire, on mélange l'eau de la cuve, puis on ouvre le couvercle, on prend cinq échantillons de 1 litre chacun à intervalle régulier dans le fût, tout en continuant à agiter pour soulever toute la matière en suspension au fond du fût. A la fin de l'opération, le fût doit être vide d'eau et de sédiments.

5.2.3.3. Mesures des données météorologiques

Le dispositif de mesures des données climatiques (température, intensité et hauteur de pluie) comprend un pluviographe enregistreur automatique et un pluviomètre de type auget basculeur de 20 grammes associés à un cône de réception de 2000 cm² et dont la précision est de 0,1 mm de hauteur d'eau. Ce dispositif nous a permis non seulement d'acquérir les hauteurs de pluie, mais aussi de confronter et valider nos mesures obtenues à partir des pluviomètres à lecture directe installés près de nos parcelles expérimentales (photo 20). Pour les pluviomètres à lecture directe, les relevés des précipitations sont effectués manuellement, après chaque événement pluvieux par un opérateur recruté et formé pour la circonstance et vivant sur place au village Kondi.



Photo 20 : Dispositif de mesure des données pluviométriques installés à Kondi par le CRDPI (Cliché Mayima ,2012)

5.2.3.4. Quantification du ruissellement et de l'érosion

Soit V le volume d'eau récolté dans le système récepteur au bas d'une parcelle, il se décompose comme suit:

V_1 volume réellement ruisselé sur la parcelle;

V_2 volume d'eau ne provenant pas de la parcelle mais de la pluie directement tombée sur le système récepteur qui n'est pas couvert ;

V_3 volume correspondant aux dépôts solides contenus dans la cuve.

Calcul de V_1

Le dispositif se compose de :

- un collecteur de superficie S_0 ;
- une première cuve de superficie S_1 ; -
- une deuxième cuve de superficie S_2 .

Première hypothèse : seule la cuve n°1 est concernée.

Le volume V se calcule selon la formule suivante: $V = S_1 \times h_1$ avec h étant la hauteur de l'eau mesurée dans la cuve n°1.

Deuxième hypothèse : pluie exceptionnelle, la première cuve se déverse dans la deuxième cuve qui est affectée.

Le volume V se calcule de la manière suivante: $V = (S_1 \times H_1) + (S_2 \times H_2 \times n)$ avec n le nombre de fentes du partiteur.

Calcul de V_2 : soit h la hauteur d'eau correspondant à la précipitation.

Premier cas : seule la cuve n°1 est concernée.

$V_2 = S_I \times h$ avec S_I la superficie du système collecteur d'ordre I soit $S_0 + S_1$.

Deuxième cas: les deux cuves sont concernées.

$V_2 = S_{II} \times h$ avec S_{II} la superficie du système collecteur d'ordre II soit $S_0 + S_1 + S_2$.

Calcul de V_3 : soit P le poids de matière sèche récoltée et d la densité moyenne de terre sèche.

$V_3 = \frac{P}{d}$; le volume d'eau réellement ruisselé est donc : $V_1 = V - (V_2 + V_3)$

Calcul de la fraction ruisselée (V_r)

Nos parcelles ont une superficie de 90 m^2 soit $S_p = 90 \text{ m}^2$

Le volume d'eau tombé sur la parcelle est égal à $S_p \cdot h = V_p$, on déduit la fraction ruisselée $r = V/V_p \cdot 100$.

~ Calcul des terres de fond

Le poids de terres de fond sèches est obtenu par :

$$P_s = V_{\text{eau}} \times 1 + V_{\text{tdf}} \times D_{\text{tdf}}$$

$$V_{\text{eau}} + V_{\text{tdf}} = N_s \times 5 \text{ (volume du seau 5 litres)}$$

On déduit:

$$V_{tdf} = \frac{PS - Ns \times 5}{D_{tdf} - 1}$$

D'où

$$P_{tdf} = \frac{PS - Ns \times 5 \times D_{tdf}}{D_{tdf} - 1}$$

Avec :

Ps : Poids des seaux remplis de terres de fond complétés par de l'eau

Ns : Nombre de seaux pleins (volume 5 litres)

V_{tdf} : Volume de terres de fond

Veau: Volume d'eau dans les seaux

D_{tdf} : Densité de la terre de fond (2,5)

Les terres de fond (TDF) en kg.ha⁻¹ sont obtenues par:

$$TDF = VA + \frac{P_{tdf}}{SP}$$

5.2.3.5. L'application de l'équation universelle de Wischmeier (USLE)

L'équation universelle de pertes en sol (Wischmeier et Smith, 1978) s'applique à la quantification des pertes en sol par l'érosion en nappes. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques antiérosives :

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

Où A est le taux annuel de perte en sol en t/ha/an.

R est le facteur de l'érosivité des pluies ; il correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 mn consécutives : il est exprimé en MJ. mm/ha.H.an. Pour simplifier les calculs, nous avons:

K est l'érodabilité des sols : il dépend de la granulométrie de la quantité de matière organique, de la perméabilité et de la structure du sol : il s'exprime en t.ha.H/.MJ.mm,

SL est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S la valeur de la pente en %) et la longueur de la pente (L en pied), avec 1 pied = 03048 m. Dans ce travail, nous avons utilisé la formule de Wischmeier et Smith (1978 tirée de Roose, 1977) afin de calculer le facteur topographique. Ainsi,

$$SL = \frac{\sqrt{L}}{(100)} \times (0.76 + 0.53S + 0.076 S^2)$$

C : est un facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture végétale,

L'application de l'équation universelle de Wischmeier (USLE) dans la zone d'étude a nécessité l'évaluation d'un certain nombre de facteurs.

P : est un facteur qui tient compte des pratiques purement antiérosives qui sont mises en œuvre afin de maîtriser les phénomènes d'érosion, à l'exclusion des façons culturales qui affectent d'abord l'alimentation hydrique ou minérale des cultures (Roose, 1977).

L'afforestation des plateaux côtiers autour de Pointe-Noire n'a pas fait l'objet d'une pratique antiérosive quelconque. Pour cela, Roose (2007) propose la valeur de P=1 pour des cultures sans soins particuliers.

5.2.3.6. Quantification des ravinelements

Elle a consisté précisément à mesurer sur le terrain la longueur et la largeur du plancher, et ainsi la hauteur des parois des ravinelements. Toutes ces mesures ont été prises sur des sections d'une longueur maximale de 40 m. Chaque ravin a été sectionné de sorte que chaque section ait une forme géométrique régulière afin de quantifier la perte en terre pour chaque section. Ainsi, le long des ravins, les principales formes géométriques rencontrées sont des sections en forme de prisme rectangulaire, des sections en arc ou en demi-cercle et trapézoïdale (Figures 17a et b).

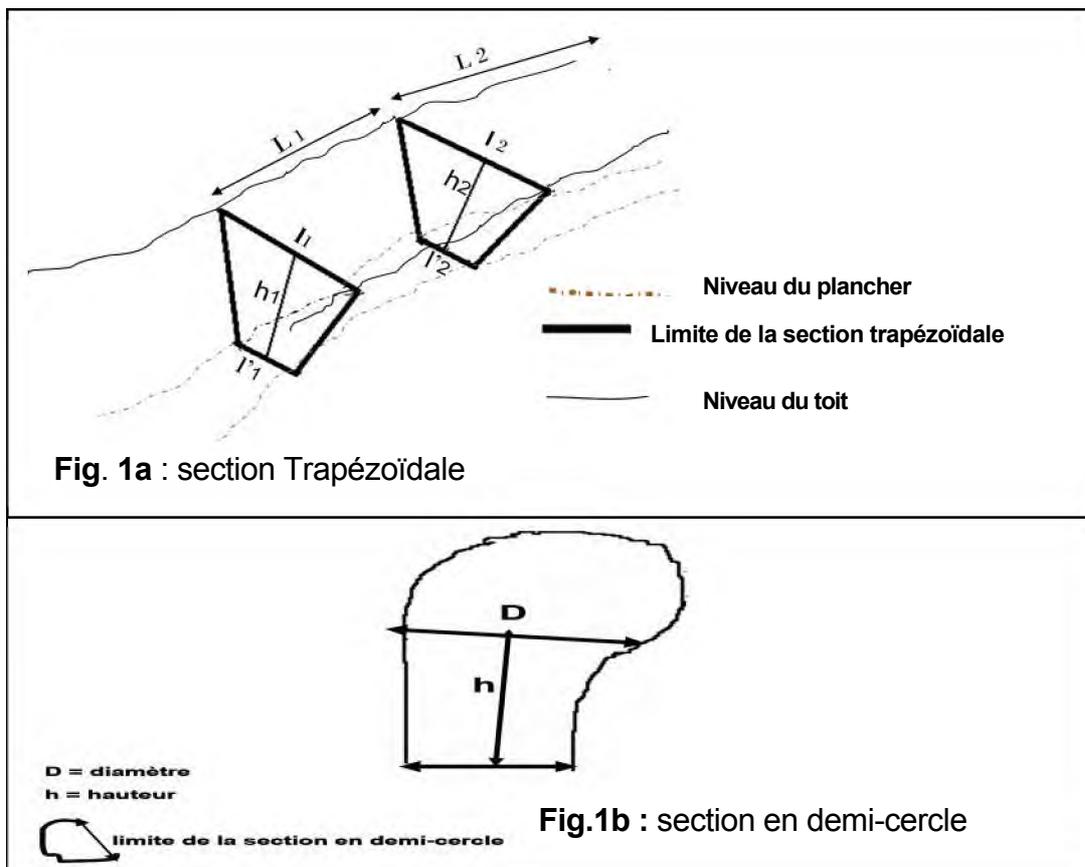


Figure 17 : Les différentes formes géométriques rencontrées sur le terrain

Pour des sections trapézoïdales la largeur (l_1), au niveau du toit est considérée comme la grande base et (l_1') au niveau du plancher, la petite base (Fig.17 a). Dans le cas des sections en arc ou en demi-cercle, cette largeur (l_1) est considérée comme le diamètre (Fig.17 b). Toutes ces variables mesurées sur le terrain nous a permis de calculer le volume de terres décapées par l'érosion en ravin, en appliquant la formule suivante :

$$V = \sum (A_1 + A_2)/2 \times L_1 + (A_2 + A_3)/2 \times L_2 + \dots$$

Avec

$A_1 = (l_1 + l_1')/2 \times p_1$: l'aire du début de la première section

$A_2 = (l_2 + l_2')/2 \times p_2$: l'aire du début de la deuxième section

$A_3 = (l_3 + l_3')/2 \times p_3$ l'aire du début de la troisième forme

L_1 = longueur de la section ou forme; L_2 = longueur de la deuxième forme... ;

Dans le cas des ravins avec des sections rectangulaires, le volume est égal à :

$$V = \sum ((l_1 \times p_1) + (l_2 \times p_2))/2 \times L$$

Pour les demi-cercles (fig. 3b), le volume est calculé par la formule suivante :

$$V = r \times (D / 2) \times h \text{ avec } r = \text{rayon; } D = \text{diamètre et } h = \text{hauteur ou profondeur.}$$

Le volume de terres décapées est obtenu et exprimé en tonne par la formule suivante :

$$\text{Quantité de terre érodée (t)} = V \text{ (m}^3\text{)} \times D_a$$

V = volume à vide du ravin

D_a = Densité apparente du sol

5.2.4. Détermination de la texture des sols

La sensibilité (érodibilité) ou non d'un sol vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion hydrique est liée à ses caractéristiques chimiques et physiques (Roose, 1977 et Henin, 1977). Les caractéristiques physiques des sols de notre zone d'étude ont été appréciées à partir de leur texture. Les analyses granulométriques ont été réalisées au laboratoire de BCBTP à Pointe-Noire (Congo), par la méthode de tamisage en deux grandes étapes et selon le protocole décrit ci-dessous.

L'opération a commencé par le tamisage de l'échantillon. Celui-ci a consisté à secouer 200 g d'échantillon séché à l'étuve à 105°C dans une colonne de cinq (5) tamis, de façon à obtenir la séparation des différents grains de sable. Les mailles suivantes ont été utilisées : 2,0 mm ; 1,0 mm ; 0,4 mm ; 0,2 mm et 0,08 mm de diamètre qui correspondent aux classes suivantes: 2,0 mm-500 μ m (sables grossiers) ; 500 μ m-200 μ m (sables moyens) ; 200-50 μ m (sables fins) ; et inférieurs à 0,08mm (limons et argiles).

Par la suite, la détermination des teneurs en limons et argile par la méthode de l'équivalent en sable s'est faite sur un matériau lavé, séché à l'étuve et débarrassé des particules supérieures aux sables grâce à un tamis de 5 μ m (module 38). Le protocole se présente comme suit :

- ✓ mettre dans une allonge une solution lavante (eau déminéralisée ou distillée mélangé à un dispersant) ; remplir l'allonge jusqu'au premier repère (10 cm) ;
- ✓ peser 120 g d'échantillon sur une balance électronique à précision et les mettre dans l'allonge ;
- ✓ faire reposer le tout pendant 10 mn ;
- ✓ après le repos, secouer à la main l'allonge fermée par un bouchon en caoutchouc, pendant 30 secondes par des mouvements aller et retour en maintenant l'allonge horizontale ;
- ✓ poser l'allonge à la verticale sur la paillasse et enlever le bouchon ;
- ✓ introduire jusqu'au fond de l'allonge tout en le tournant un tube en métal léger relié à un ballon en plastique contenant la solution lavante ;
- ✓ ouvrir le robinet du ballon et laisser couler la solution dans l'allonge jusqu'au deuxième repère (11.), en maintenant l'agitation avec le tube ;
- ✓ retirer le tube et laisser reposer la solution pendant 20 mn ;
- ✓ après les 20 mn de repos, la solution dans l'allonge présente trois niveaux : à la base les sables surmontés d'un niveau très trouble, celui des limons et argiles et au sommet un niveau moins trouble, celui des argiles. Les différentes teneurs s'obtiennent en mesurant la hauteur des différents niveaux qui est ensuite transformé en pourcentage par calculs statistiques (Cf. tableaux annexes1).

5.2.5. Détermination de la densité apparente (da)

La densité apparente, exprimée en g/cm^3 , est le rapport de la masse sèche du sol en (g) sur le volume total de l'échantillon (cm^3). En d'autres termes, la densité apparente représente la masse volumique du sol sec. Elle est obtenue à partir de la formule suivante: $D_a = M_s/V$ humide g/cm^3 , avec M_s (Masse ou poids de l'échantillon séché) et V humide (volume de l'échantillon humide).

Les échantillons destinés à la mesure de la densité apparente, ont été prélevés au cours de chaque expérience avec un cylindre de 25 cm^3 . Après la pesée de l'échantillon humide, ces échantillons sont mis à l'étuve à 105°C . Après 24 heures et leur passage au dessiccateur, ils sont pesés de nouveau à l'aide d'une balance à précision, afin d'évaluer la masse totale sèche.

5.2.6. Détermination des matières en suspension (MES)

La détermination de la quantité de matière en suspension a eu lieu aux laboratoires du CERGEC et du CRDPI sur des échantillons d'eau de ruissellement recueillie dans les parcelles de 1m^2 et 90 m^2 . Ces échantillons de 05 litres pour des cases d'érosion et 1,5 litre pour le micro parcelle ont été traités selon le protocole ci-après :

- ✓ un filtre de 0,45 micro mètre (pall corporation), pesé au préalable, est placé dans une boîte en PVC à fond percé par de petits trous et relié à une pompe à vide par un tube également en PVC disposant d'un robinet;
- ✓ un bêcher de 250 ml est fixé au-dessus de la boîte contenant le filtre ;
- ✓ un autre bêcher de 250 ml est fixé en dessous de la boîte contenant le filtre ;
- ✓ le bêcher supérieur est ensuite rempli d'eau de ruissellement ;
- ✓ la pompe à vide, utilisée comme suppresseur, est ensuite mise en marche et le robinet ouvert, ce qui crée une pression qui accélère le passage de l'eau du bêcher supérieur vers le bêcher inférieur à travers le filtre ;
- ✓ le filtre est délicatement récupéré à la fin de l'opération et séché d'abord pendant 48 heures, à l'air libre dans le laboratoire, à l'abri des courants d'air et des poussières, puis à l'étuve à 65°C ;
- ✓ les filtres sont, ensuite, pesés et le poids de la matière en suspension est déduit du poids total de l'échantillon.

Ces matières en suspension (MES) fournissent ensuite les masses de sédiments érodées (Kg) qui, rapportées à la superficie des parcelles, donnent le taux d'érosion de l'événement pluvieux (Kg.m²) selon la formule suivante.

$$\text{Perte en terre (Pt) Kg/ha/pluie} = \frac{\text{turbidité en (g/l)} \times \text{Volume (L/m}^2\text{)} \times 10.000}{1000}$$

5.3. Précision des mesures et validité des résultats

Tenant compte de quelques faiblesses liées aux dispositifs de mesures utilisés, la précision au gramme près n'apporterait guère plus d'information que les ordres de grandeurs auxquels nous parviendrons. En ce qui concerne le ruissellement, les erreurs de lecture dans les cuves et au niveau des partiteurs ont été prises en compte ; une erreur de + ou - 5% sur le ruissellement annuel a été prise en compte. Cette valeur a été indiquée dans ce genre d'étude par Roose (1984). Pour la pluviométrie, les données enregistrées à partir du pluviomètre, à lecture directe, ont été comparées à celles enregistrées à partir du pluviographe à auget bascule et les écarts observés entre les deux sources des données ne dépassent pas 5% d'erreur. Par ailleurs, le caractère aléatoire des matières en suspension dans les eaux de ruissellement, lié à la difficulté de standardiser l'agitation dans la cuve que l'on vide, fait que les résultats soient plus en ordre de grandeur.

5.4. Traitement statistique et interprétation des données

Les valeurs des mesures de terrain ont été saisies dans une feuille d'Excel, fournie par Vincent Simonneaux à Toulouse (France). Afin d'éliminer quelques valeurs suspectes, nous avons procédé à la transformation des données de terrain en normalisant la distribution selon la formule suivante:

$$P' = 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P_0}} \right)$$

Avec P' variable normalisée et P variable mesurée

La réalisation des courbes granulométriques a été directement faite à l'ordinateur à travers le logiciel Adobe Page Marker 7.0.

Les régressions linéaires simples entre les variables explicatives de l'érosion et les variables à expliquer ont été faites à partir du logiciel R.

Conclusion partielle de la deuxième partie

Cette partie avait pour objectif essentiel de caractériser les différents sites devront abriter nos expériences et de décrire l'ensemble des méthodes adoptées au cours de cette étude. Les sites sélectionnés ont fait l'objet d'une description détaillée site après site. Bien que peu éloignés, ces sites sont différents les uns des autres. Cette différence est liée par l'importance de la litière et de l'histoire de chacun d'eux. Par ailleurs, cette description nous a permis de mettre en évidence, quelques paramètres liés à l'itinéraire sylvicole susceptibles d'orienter les analyses et l'interprétation des résultats. La litière sous plantation d'eucalyptus est plus importante lorsque la plantation gagne en maturité. De ce fait, en choisissant plusieurs types de situations contrastés sous plantations d'eucalyptus : eucalyptus jeune, eucalyptus vieux, taillis et savane, nous permet d'évaluer l'impact de cette litière sur le ruissellement et l'érosion hydrique. Toutes ces méthodes que nous venons de décrire dans cette partie (simulateur de pluie, parcelle d'érosion, méthode de point quadrat et la granulométrie) sont des méthodes classiques et empiriques. Elles ont permis de quantifier d'une part, le ruissellement et l'érosion hydrique et d'autre part, des variables explicatives (texture du sol, densité apparente et états de surface). Les erreurs de mesures expérimentales dont les résultats sont présentés et discutés dans la troisième partie de ce travail ne dépassent pas 5% ; elles sont donc négligeables.

TROISIEME PARTIE

RESULTATS, DISCUSSION ET SUGGESTIONS

La troisième partie est consacrée à la présentation et à l'analyse. Tour à tour sont analysés et discutés les résultats des mesures obtenus sous pluies simulées (chapitre 6) et sous pluies naturelles (chapitre 7) sur parcelles d'érosion. Enfin, quelques méthodes de lutte antiérosives bouclent cette troisième partie

CHAPITRE VI

ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS OBTENUS SOUS PLUIES SIMULÉES

Dans un premier temps nous présentons et discutons, d'une part les résultats du ruissellement et de l'érosion sur différents sites et, d'autre part des variables explicatives du ruissellement et de l'érosion. Dans un deuxième temps, ces résultats sont regroupés et présentés ensemble afin de bien faire ressortir les différentes réactions des sites sur le ruissellement et l'érosion, en fonction des états de surface et du couvert végétal. Par ailleurs, nous avons cherché les corrélations simples existant entre les différentes variables explicatives de l'érosion dans la zone d'étude.

6.1. Résultats du ruissellement et de l'érosion sur différents

sites 6.1.1. Site de vieilles plantations d'eucalyptus 6.1.1.1.

États de surface

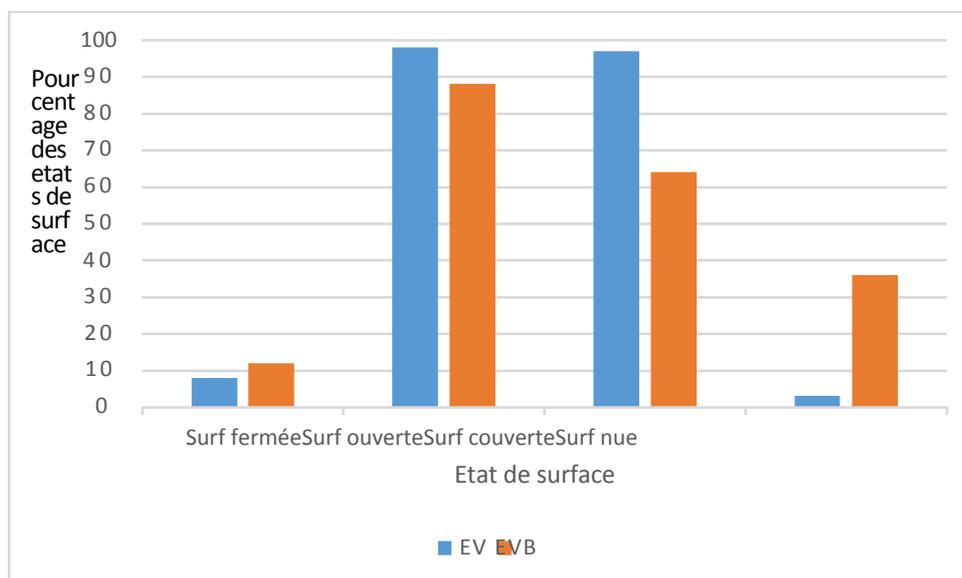


Figure 18. : Répartition des états de surface

La figure. 18 montre que sous vieille plantation d'eucalyptus brûlée et non brûlée, le sol n'est jamais nu, mais il est protégé à 90 % soit par les feuilles mortes soit par la litière. Ce taux important du couvert végétal observé sur ce site s'explique par le fait que l'intensité des feux a eu un impact très variable. En effet, quand le feu rencontre un milieu humide ou peu dense en

biomasse, il va se limiter à la litière et aux touffes d'herbes. Par contre, s'il se manifeste, dans un milieu à sous-bois dense et desséché, il peut brûler l'écorce et la canopée, et provoquer la chute de branches. Il se produit alors une accumulation de charbons de bois qui renforcent la protection de la surface du sol contre les pluies de l'année suivante.

Ainsi, sous les vieux eucalyptus, le feu ne détruit que partiellement (36%) la couverture végétale. Cela s'explique par les faits suivants : d'abord, l'humus et la biomasse plus épais ne sont détruits que partiellement. Ensuite, on note ici une plus grande concentration de plantes dans le sous-bois dont certaines résistent à l'action du feu. Enfin, dans ces vieux champs d'eucalyptus, l'incendie n'affecte que la litière et le sous-bois. Les feuilles de la canopée, du fait de la hauteur des arbres qui va au-delà de 20 mètres, restent presque hors de portée du feu et continuent à tomber après le passage du feu. Ce sont ces feuilles tombées des arbres qui composent en partie les 64% du taux de couverture enregistré ici.

En revanche, le taux important de fermeture (70%) enregistré sous eucalyptus brûlé semble être l'effet du passage du feu qui compacte le sol. Ceci montre clairement que sous vieux eucalyptus brûlés, le risque de ruissellement est important comme nous le montre le tableau VII. Ces résultats sont conformes aux premières observations faites par Roose (2007) sous vieux eucalyptus âgés de 7 ans dans la même zone.

Tableau VII : Résultats du ruissellement moyen et de l'érosion sous vieux eucalyptus

Site	Nombre d'essai	Classe de pente%	Temps d'imbibition (mn)	Ruissellement %	Intensité mm/h	Infiltration mm/h	Erosion en Kg/ha/pluie
EV	6	0-5	2,25	16,5	67	56	0,0105
	4	5-10	2,20	37,8	69	36	0,0155
	3	10-15	2,30	43,7	67	39	0,025
	2	+15	*	*	*	*	*
EVB	4	0-5	2,3	33	73,7	49	0,0201
	5	5-10	1,83	55,8	63	27,8	0,0507
	4	10-15	1,59	48,5	69	35,5	0,0357
	5	+15	1,20	53,4	70	33,4	0,0451

EV : eucalyptus vieux ; * site d'eucalyptus non existant

EVB : eucalyptus vieux brûlés

6.1.1.2. Pluie d'imbibition

La pluie d'imbibition (P_i) permet de déterminer les seuils à partir desquels le ruissellement se déclenche. Dans le cadre de cette étude, la pluie d'imbibition a été appréciée à travers le temps d'imbibition, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre le début de l'expérience (T_o) et l'apparition du ruissellement (T_d).

Les résultats obtenus consignés dans le tableau (VII) montrent que le temps d'imbibition sous plantation d'eucalyptus non brûlée varie entre 1 et 2 mn. Ce court temps d'imbibition indique que le ruissellement sous vieille plantation d'eucalyptus commence très tôt, tandis que, sous vieille plantation d'eucalyptus brûlée, les temps d'imbibition sont encore plus courts (1mn). Ici, le feu semble avoir un impact marqué sur le temps d'imbibition en comparaison à celui enregistré sous eucalyptus non brûlés. Des résultats similaires ont été obtenus au cours d'une étude expérimentale antérieure réalisée sur les mêmes sites (Roose, 2007).

6.1.1.3. Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement moyen enregistré sur ce type de site est de 37% en dépit du faible taux de fermeture (tableau VII). Ces résultats sont en opposition avec ceux sur les états de surfaces que nous avons caractérisés plus haut. Deux raisons vraisemblablement peuvent expliquer ces faits : la première serait la présence des feuilles mortes qui forment un tapis continu qui empêche les gouttes de pluie de s'infiltrer dans le sol, d'où ce taux de ruissellement. Ces résultats sont proches de ceux observés par Castro et *al.* (Non daté), dans des parcelles de soja avant la récolte au Brésil soulignant l'effet de la litière sur la perte d'infiltrabilité.

La deuxième raison est probablement le fait qu'en saison sèche, période pendant laquelle ces expériences ont été réalisées, la biomasse de la litière et surtout l'humus deviennent hydrophobes, c'est-à-dire qu'ils développent une propriété physique d'hydrophobicité qui les rend non humectables. Ce phénomène d'hydrophobicité, d'après Chamayou et *al.* (1989), modifie la capacité de tension superficielle de la solution du sol et favorise ainsi le ruissellement au détriment de l'infiltration. Dans la zone d'étude, le phénomène d'hydrophobicité est important et a été mis en évidence par Laclau et *al.* (2004).

Dans ce type de site, les ruissellements ne sont ni liés aux intensités de pluies ni à la saturation du sol, mais plutôt aux états de surface qui vont influencer considérablement le comportement hydraulique de ces sols.

Sous vieille plantation d'eucalyptus brûlés, le coefficient moyen du ruissellement enregistré est de 47%, ce qui est sensiblement supérieur à celui enregistré sous vieux eucalyptus non brûlés (37%). Cette augmentation semble être liée certainement au passage du feu qui a durci et donc compacté le sol comme le témoigne le taux de fermeture dudit sol indiqué plus haut (70%).

6.1.1.4. Turbidité et érosion mécanique

Sous eucalyptus vieux (EV), la turbidité des eaux du ruissellement est nulle. Ces eaux sont claires avec moins de flottants. Ces résultats nous amènent à conclure sur le caractère antiérosif des litières des forêts d'eucalyptus. Ces résultats concordent bien avec ceux trouvés en Côte-d'Ivoire par Godefroy et Roose (1975) où les eaux de ruissellement sous bananeraie avec litière sont restées claires et les matières en suspension ne représentaient qu'une très faible proportion. Par ailleurs, les valeurs de la concentration moyenne en sédiments et du taux d'érosion pour l'ensemble des quatre classes de pentes sont très faibles (0,3g/l et 0,01t/ha).

Cette concentration n'est pas également en corrélation avec le volume d'eau ruisselé et varie indépendamment de ce dernier. Cette situation peut s'expliquer par la litière et les adventices qui se sont avérées très efficaces pour protéger le sol contre le pouvoir érosif des eaux de ruissellement.

Sous eucalyptus vieux brûlés (EVB), la turbidité des eaux du ruissellement est légèrement au-dessus de celle enregistrée sous EV, à la différence ici, les eaux du ruissellement sont très noires et contiennent beaucoup de flottants. La turbidité et l'érosion hydrique sont respectivement de 0.3 g/l et 0,03t/ha.

Ces valeurs sont, dans l'ensemble, très faibles mais supérieures à celles enregistrées sous vieille plantation d'eucalyptus non brûlée. La raison de cette augmentation est vraisemblablement liée à l'impact du passage du feu qui, en détruisant une bonne partie de la litière, expose aussi partiellement le sol aux effets de l'ablation.

6.1.2. Site de savane brûlée et non brûlée

6.1.2.1. États de surface

Sous savane non brûlée, le taux d'ouverture du sol et les touffes d'herbes sont importants comme le montre la figure.19.

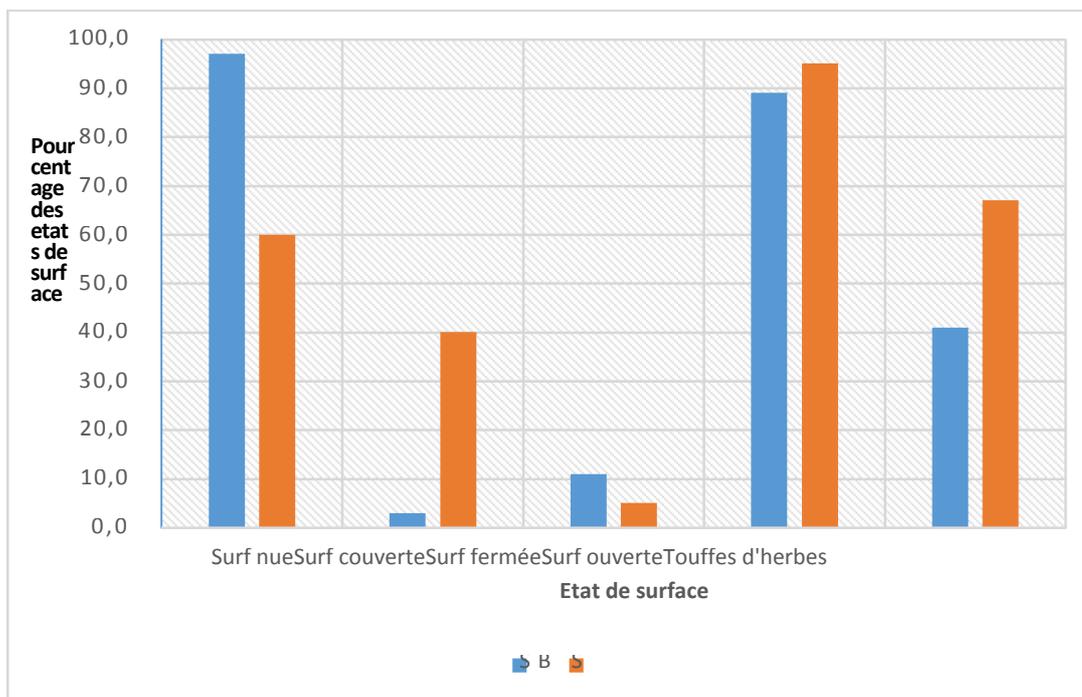


Figure 19. : Taux des différents états de surface sous site des savanes

6.1.2.2. Pluie d'imbibition

On observe dans le tableau VIII que les temps d'imbibition sont plus longs ici que sur les sites précédents. Ce qui indique que le ruissellement commence très tard. En effet, au cours de nos expériences sous savane brûlée, plusieurs essais n'ont enregistré aucun ruissellement au bout de la durée de l'expérience qui était de 30 minutes. Ce qui signifie que la saturation sur ce site demande un temps d'imbibition plus long.

Tableau VIII : Résultats du ruissellement et de l'érosion sous savanes

Site	Nombre d'essais	Classe de pente (%)	Temps d'imbibition (mn)	Ruissellement %	Intensité mm/h	Infiltration mm/h	Erosion en t/ha/pluie
SB	4	0-5	10	2,25	67	65	0,07
	4	5-10	100*	0,75	70	70	0
	4	10-15	22 (100*)	0,5	67	68	0
	4	+15	26 (100*)	01	68	68	0
S	2	0-5	5	10	66	51	0,06
	2	5-10	5	02	61	60	0

100* valeurs supérieures à la durée de l'expérience

SB : savane brûlée ; S : savane non brûlée

Le taux d'ouverture du sol (90%) sous savane montre que dans ce type de site, le sol est très aéré et favorise l'infiltration au détriment du ruissellement. La présence des touffes d'herbes (70%) va naturellement protéger le sol contre l'énergie cinétique des gouttes de pluies et de l'érosion pluviale. Par ailleurs, sur ce type de site nous avons observé des nappes de sables délavés organisées entre les touffes d'herbes, témoins du rôle de protection des touffes d'herbes.

Toutefois, le taux relativement élevé de surface nue enregistré même sous savane non brûlée explique cette activité érosive et vient corroborer les affirmations formulées par plusieurs auteurs (Kœchlin, 1961 ; Makany, 1963 ; Vennetier, 1968 ; Descoings, 1975 ; Loubelo, 1990 ; Dowsett et Lemaire, 1991 ; Loumeto et Huttel, 1997) selon lesquelles, ces savanes couvrent très mal le sol et l'exposent à l'agressivité des pluies et du ruissellement.

Sous savanes brûlées, les feux réduisent le taux du couvert végétal du sol qui tombe à 7% contre 40 % pour les savanes non brûlées (S). La surface occupée par les touffes d'herbes passe de 60% pour les savanes non brûlées à 40% pour les savanes brûlées. Il faut noter qu'à l'instar de la litière et du sous-bois des eucalyptus, les graminées de savane ne sont pas également détruites, car le feu a des effets très variables.

Certaines espèces résistent à la destruction par le feu et conservent une biomasse importante qui couvre quand même le sol. Certaines touffes d'herbes conservent, en général, toute leur base qui continue à couvrir le sol et freine l'érosion pluviale. Ces observations ont aussi été faites en France par Martin *et al.* (1993).

6.1.2.3. Coefficient de ruissellement

De manière générale, les coefficients de ruissellement sont très faibles sous savane et varient de 0,5 à 15%, qu'il s'agisse de la savane brûlée (SB) ou non brûlée (S) (tableau VIII). Ce qui veut dire que presque toute la pluie simulée s'est infiltrée. Les faibles taux de ruissellement constatés ici sont d'abord liés à la nature des sols qui sont, dans l'ensemble, assez aérés avec de faibles taux de liants comme nous l'avons montré dans la première partie. Ils sont également liés à l'activité biologique de la microfaune (termites, lombrics, fourmis...) très active dans les savanes côtières (Mboukou-Kimbatsa et *al.*, 1998). Ces microfaunes réorganisent et modifient la structure du sol en améliorant sa perméabilité et sa conductibilité, ce qui a pour conséquence l'augmentation de l'infiltration au détriment du ruissellement.

Cette explication rejoint celle donnée par Roose (1978) qui est arrivé à un résultat similaire sous savane en Côte-d'Ivoire. Par ailleurs, Lavelle (1983), travaillant également sous savane en Côte-d'Ivoire, a montré que l'activité faunique génère une macroporosité qui a une influence directe sur l'infiltration. Les vers rejettent 30 à 40 m³ de terre en surface, par hectare et par an. A ce volume de rejets correspond un volume comparable de pores à l'intérieur du sol et cette porosité communique avec la surface, facilitant ainsi le drainage vertical rapide de l'eau.

Par ailleurs, la perturbation subie par les sols lors de l'installation de la station météo peut avoir modifié quelque peu les caractéristiques hydrodynamiques des sols sur le site de savane, ce qui peut expliquer le faible taux de ruissellement enregistré, ce malgré la période de repos observée avant nos mesures.

6.1.2.4. Turbidité du ruissellement et érosion mécanique

Sous savane brûlée, malgré le coefficient d'infiltration important, la faible quantité d'eau (2%) qui ruisselle est assez trouble, ce qui indique une érosion mécanique. L'importante turbidité du ruissellement observée sous savane brûlée vient du fait que les mottes de terre provenant des activités des fourmis, sont prises en charge une fois que le ruissellement par saturation se déclenche. Les pertes en terre trouvées y sont faibles (0,01 à 0,07 t/ha), mais supérieures à celles trouvées sous eucalyptus. Ici, il nous a été difficile d'apprécier l'impact du feu sur les pertes, car les pertes en terre ne varient presque pas entre savane brûlée et savane non brûlée.

6.1. 3. Site de jeune plantation d'eucalyptus brûlée et non brûlée

6. 1. 3.1. États de surface

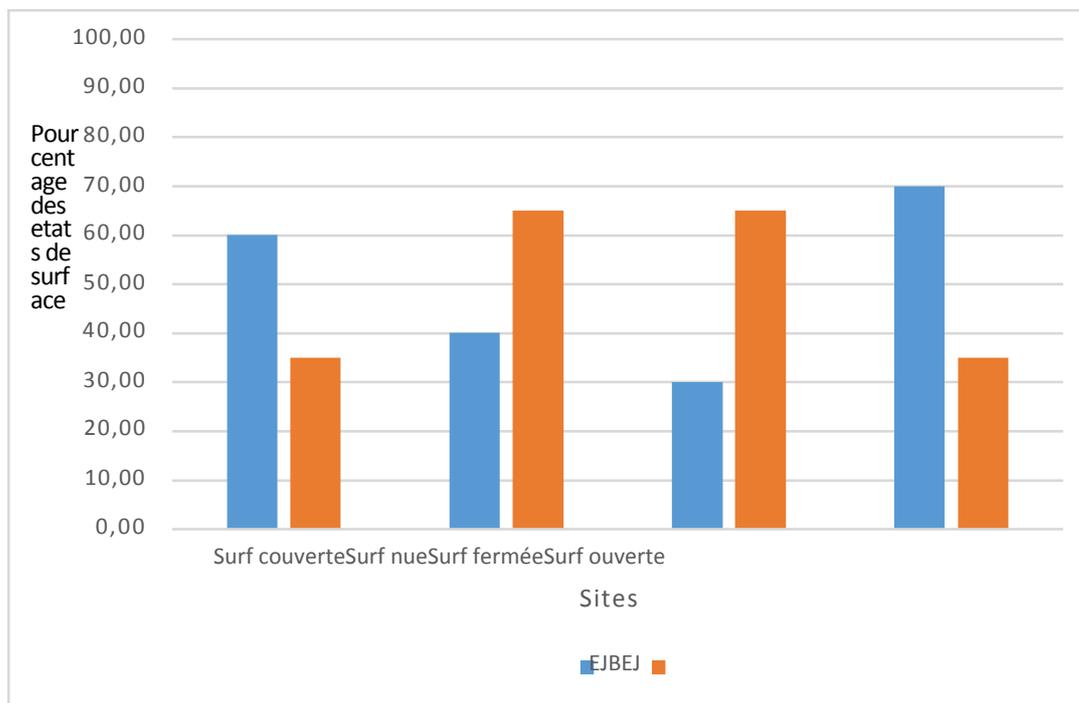


Figure 20 : Taux des différents états de surface sous sites de jeunes eucalyptus

La figure. 20. montre que le sol sous jeune plantation d'eucalyptus reste fermé, mais protégé par un couvert végétal composé de feuilles mortes qui tombent après le passage de feu en voie de décomposition. Le taux de fermeture du sol assez important enregistré sur ces sites, s'explique sans doute par le tassement du sol lié aux récentes opérations de travail du sol par l'industriel. Sous EJB, le taux de couverture a été réduit de plus de 20%, ce qui devrait exposer le sol à l'action mécanique des gouttes de pluie, car la canopée de deux ans dans ce genre de sites se situe à plus de 10 m de hauteur.

6. 1. 3. 2. Temps d'imbibition

Sous jeune plantation d'eucalyptus qu'elle soit brûlée ou non, les temps d'imbibition enregistrés oscillent entre 2 et 6 minutes. C'est le signe qu'ici comme ailleurs, sur piste ou sur coupe-feux, le ruissellement commence très tôt. Nous constatons que le feu semble avoir eu un impact sur le temps d'imbibition qui est en moyenne de 3 mn sous eucalyptus jeune brûlé contre 5 mn sous eucalyptus jeune non brûlé (tableau IX).

Tableau IX : Résultats du ruissellement moyen et de l'érosion sous jeune plantation d'eucalyptus

Site	Nombre d'essais	Classe de pente (%)	Temps d'imbibition (mn)	Ruissellement %	Intensité mm/h	Infiltration mm/h	Erosion en t/ha/pluie
EJB	4	0-5	3	40	67	40	0,038
	4	5-10	4	4	70	68	0,035
	3	10-15	2,30	25	65	48	0,047
EJ	6	0-5	6	22,33	69	51,8	0,085
	3	5-10	3,5	26	65	48	0,027
	3	10-15	3	16	65	55	0,089

EJB : eucalyptus jeune brûlé ; EJ : eucalyptus jeune non brûlé

6. 1. 3. 3. Coefficient de ruissellement

Sous eucalyptus jeunes, l'impact du feu a été difficile à apprécier au niveau du coefficient de ruissellement. En effet, si le feu semble influencer le temps d'imbibition qui est plus court sous EJB (3mn contre 5mn sous EJ), il ya presque le même coefficient de ruissellement entre les deux situations : 22% avant l'incendie et 21% après l'incendie (tableau IX).

Cette situation qui a été également observée au cours d'une étude antérieure, a été interprétée comme étant liée à l'histoire récente des parcelles notamment à l'aération de la structure du sol par des labours liés à la préparation des terrains (Mayima, 2009 ; Mayima, *al.*, 2010). En effet le passage du feu ne modifie pas profondément cette restructuration du sol qui reste filtrant pendant un temps.

6. 1. 3. 4. Turbidité du ruissellement et érosion mécanique

Sous jeune plantation d'eucalyptus brûlée, le feu a un impact visible par la qualité des eaux de ruissellement de couleur noire et chargée de petits charbons de bois plus ou moins flottants. Les pertes en terre (érosion mécanique) varient entre 0,038 t/ha et 0,047 t/ha. Cette situation indique que lorsque le feu arrive à bien affecter le sol, celui-ci se compacte : le ruissellement et l'érosion deviennent plus importants. La destruction du couvert végétal protecteur du sol contre l'érosion pluviale est en partie responsable de cet état de chose aussi bien sous savane que sous plantation d'eucalyptus jeunes. Nos résultats sont proches de ceux trouvés au Maroc dans les mêmes conditions d'expériences (Lavabre et *al.*, 1997). Par contre, sous jeune plantation d'eucalyptus non brûlée la turbidité du ruissellement est très faible. Les eaux de ruissellement sont ici, claires

et moins chargées de flottants, ceci indique que l'érosion est aussi négligeable sur ce genre de site (0,027 t/ha et 0,089t/ha) maximum en comparaison avec le site précédent.

6.1. 4. Zone de piste

6.1. 4.1. États de surface

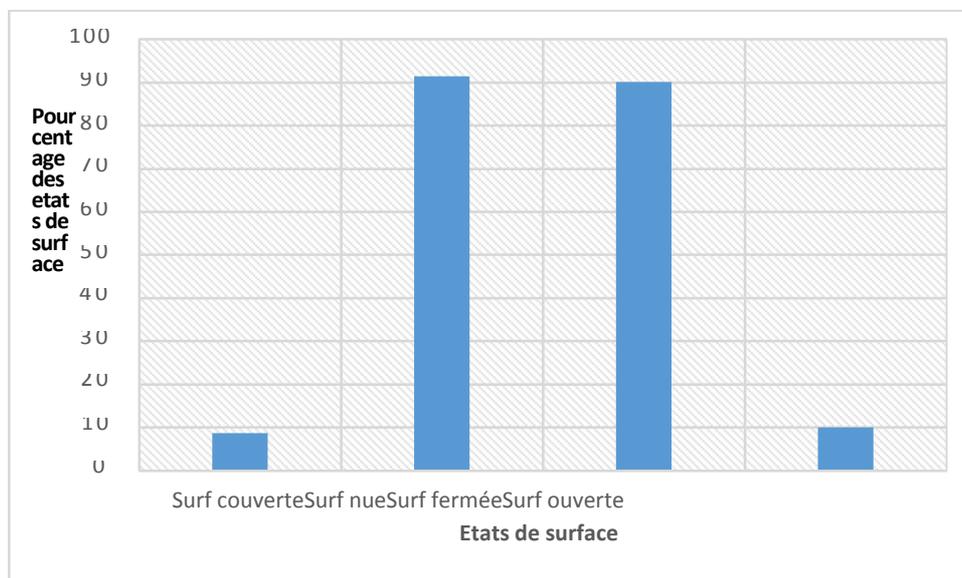


Figure.21 : Taux de fermeture et de nudité sur piste

La figure. 21 : montre que contrairement aux précédents sites, les pistes restent les sites les plus fermés avec plus de 90% et les moins couverts (10%). Le taux important de fermeture du sol est lié au compactage de celui-ci par des engins.

Par ailleurs, nous verrons que malgré leur caractère tassé et étanche, les pistes restent des sites à risque élevé d'érosion hydrique.

Tableau X: Résultats du ruissellement moyen et l'érosion sur piste

Site	Nombre d'essais	Classe de pente (%)	Temps d'imbibition (mn)	Ruissellement %	Intensité mm/h	Infiltration mm/h	Erosion en t/ha/pluie
P	3	0-5	1	68,7	69	21,7	0,0738
	5	5-10	1,5	74	70	18,4	0,21
	4	10-15	1	70,5	73	20	0,887
	2	+15	1	83,5	67	11	4,68

P : piste

6.1. 4. 2. Temps d'imbibition

Sur pistes (P), les temps d'imbibition sont les plus courts (moins de 2mn), quelle que soit la classe de pente considérée (tableau X). Ces temps d'imbibition courts enregistrés sur piste montrent que les ruissellements commencent très tôt et ont un caractère instantané.

6.1. 4. 3. Coefficient de ruissellement

Sur pistes (P), les coefficients de ruissellement enregistrés sont importants. Ils atteignent presque partout plus de 70% (tableau X). Ces coefficients importants enregistrés sur ce type de site s'expliquent par le taux de fermeture élevé du sol tassé et compacté à l'origine par le passage répété des engins. On constate par ailleurs que les coefficients de ruissellement n'augmentent pas forcément avec la pente. En effet, dans la classe 10-15%, il ruisselle moins que dans la classe (5-10%). Cette situation peut s'expliquer par le fait que sur fortes pentes les croûtes de battance ont du mal à se constituer car le ruissellement s'organise en rigole, déchire ces structures et maintient le sol ouvert.

6.1. 4. 4. Turbidité du ruissellement et érosion mécanique

Le tableau X montre que la turbidité du ruissellement est très marquée sur piste. En effet, les eaux de ruissellement obtenues sont restées troubles (chargées de particules fines). Les pertes en terre au cours des pluies cumulées de 60 à 80 mm avec des intensités moyennes de 80 mm/h sont plus élevées sur pistes que sur les sites précédemment étudiés où elles croissent de manière exponentielle avec le gradient de la pente (4% = 0,073 t/ha ; 9% = 0,21t/ha ; et 17% = 4,680t/ha). Les pertes importantes observées sur pistes sont courantes et s'expliquent surtout par l'état de surface fermée (100%) suite aux tassements. Cet état donne un ruissellement très abondant qui profite de l'état dénudé du sol pour le décaper ou le raviner. Les mesures et les observations nous ont permis de le vérifier.

6.1. 5. Zone de coupe- feux

6.1. 5. 1. Etats de surface

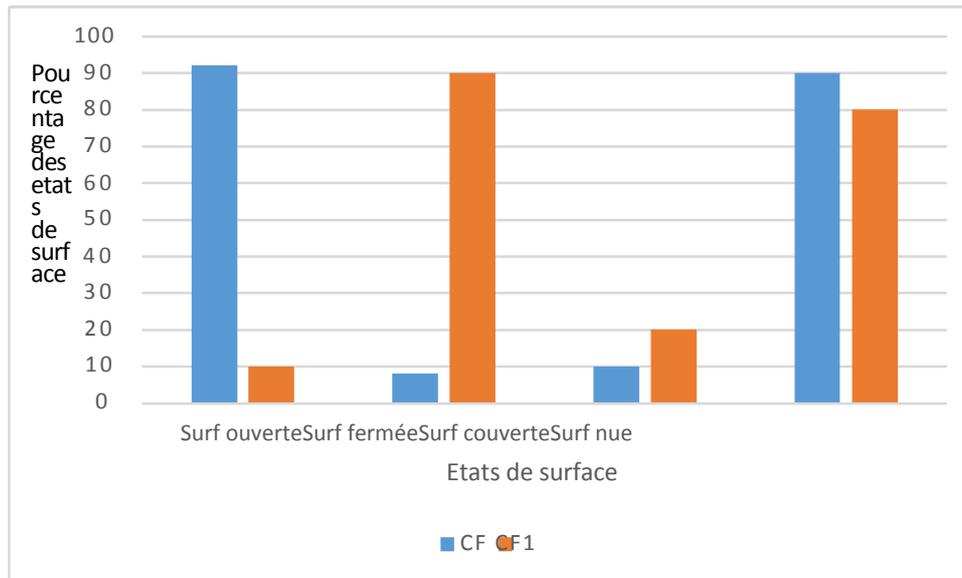


Figure.22 : Etat de surface sur coupe-feu travaillé avant et après

La figure 22 montre que sur coupe-feux, le taux de dénudation du sol est important (91%). Ceci indique que sur les coupe-feux, la surface du sol demeure nue à l'instar des pistes. L'important taux d'ouverture du sol (92%) enregistré ici, montre que le sol est aéré suite au travail du sol par des tracteurs en saison sèche. Nous verrons que ces taux ont largement influencé la dynamique faible des ruissellements sur ces sites. En revanche, après quelques pluies tombées, le sol se tasse entraînant ainsi, les taux de fermetures importants (85%) enregistrés.

Tableau XI : Résultats du ruissellement et de l'érosion sur coupe-feu

Site	Nombre d'essais	Classe de pente (%)	Temps d'imbibition (mn)	Ruissellement %	Intensité mm/h	Infiltration mm/h	Erosion en t/ha/pluie
CF	4	0-5	100*	1,3	65	64	
	3	5-10	25	01	63	63	
	3	10-15	15	09	69	63	0,032
	3	+15	100*	01	65	65	
CF1	2	0-5	1	65,8	69	20,5	0,07
	2	5-10	2	70	73	20	0,19
	2	10-15	1	70,7	73	19	0,78

CF : coupe-feu récemment travaillé (saison sèche) ; CF1 : coupe-feu en saison de pluie

6.1. 5. 2. Temps d'imbibition

Sur coupe- feux (CF) récemment travaillé, les temps d'imbibition sont plus longs surtout sur les faibles pentes, c'est-à-dire le ruissellement se déclenche très tardivement (15 à 25 mn après le début de la simulation). Cependant, les temps d'imbibition les plus courts (1 à 2 mn) ont été enregistrés sur le même site après plusieurs pluies, signe que le ruissellement commence très tôt comme sur piste.

6.1. 5. 3. Coefficient de ruissellement

Sur les coupe-feux, les coefficients de ruissellement sont faibles et varient de 1 à 9 % en début de la saison des pluies (tableau XI). Ces résultats s'expliquent par le fait que, le site venait d'être entretenu au tracteur à disque deux semaines avant l'expérience. Ce travail a eu pour effet, l'ameublissement du sol et partant l'augmentation de sa porosité et donc de sa perméabilité. Mais il s'agit d'une situation temporaire qui constitue la première étape des deux phases de dégradation du sol décrites par Bresson et Boiffin (1990) cités par Augéard et *al.* (2005).

En effet, selon ces deux auteurs, les labours par un engin ont pour effet d'aérer, dans un premier temps, le sol et donc d'augmenter les infiltrations, puis dans un second temps d'accélérer le tassement du sol et par conséquent de réduire les infiltrations. Après plusieurs pluies, le taux de ruissellement enregistré sur (CF1) a été multiplié par 60 comme le montre le tableau XI.

6.1.2. Relation ruissellement, érosion et variables explicatives

Les corrélations simples entre les variables à expliquer (infiltration ou ruissellement) et les variables explicatives (D_a , SF, SO, SC, et texture du sol), ont montré en partie que le comportement hydrodynamique des sols de Kondi et Kissoko sont sous l'influence directe des états de surface et d'autres facteurs physiques. Parmi les paramètres croisés, la densité apparente est bien corrélée avec le pourcentage de ruissellement ($R^2 = 0,72$), mais la tendance est décroissante (modèle linéaire généralisé sous R) figure 23. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés dans les sols du pré-Rif Marocain par El Garouani et *al.* (2005). Une explication possible: plus la densité apparente augmente et plus la teneur en silice augmente (proportion en sable dans la granulométrie), par conséquent, le sol devient de plus en plus filtrant.

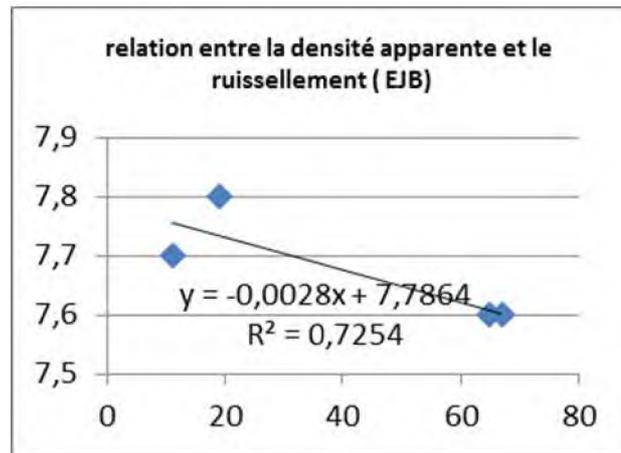


Figure 23. : Relation entre le ruissellement et la densité apparente du sol sous EJB à Kissoko

Par ailleurs, des corrélations positives ont été trouvées respectivement entre la surface fermée et le coefficient de ruissellement ($R^2 = 0,52$) et la surface couverte et le coefficient de ruissellement ($R^2 = 0,63$) Fig. 24 et 25

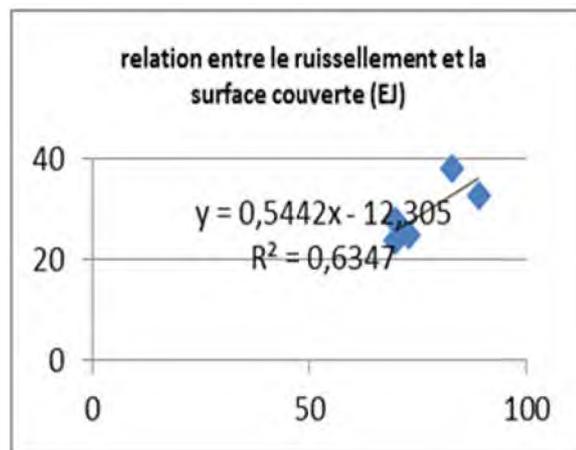


Figure 24. : Relation entre le ruissellement et le taux de couverture sous EJ

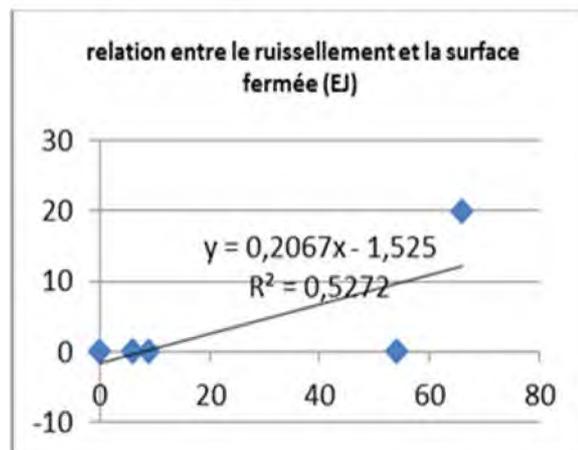


Figure 25. : Relation entre le ruissellement et le taux de fermeture EJ

Ces résultats montrent clairement que les états de surfaces (taux de fermeture et de couverture du sol) tels que nous les avons appréciés macroscopiquement est un paramètre pertinent à prendre en compte pour expliquer le comportement hydrodynamique des sols des plateaux côtiers. Ces résultats sont en opposition avec ceux trouvés par plusieurs auteurs (Al Karkouri et *al.*, 2000 ; Sabir et *al.*, 2004) qui, à travers leurs travaux, montrent au contraire que la végétation notamment la litière favorise les infiltrations. Nos résultats, peuvent s'expliquer par la spécificité des litières des eucalyptus. Cette particularité serait liée ici, à la composition organique de cette litière (abondance de matière organique), des propriétés physiques de cette dernière et le temps de minéralisation très rapide.

En revanche, nous n'avons pas trouvé de corrélation positive entre le taux d'ouverture et le coefficient de ruissellement, probablement parce qu'au-dessus de ces sols ouverts se trouve une couche étanche composée essentiellement de feuilles mortes qui empêchent les eaux de s'infiltrer. Ceci est contraire aux résultats obtenus sous pluie simulée sur des parcelles de 1m² par des auteurs comme Al Karkouri et *al.*(2000) et Cheggour (2008). La texture du sol sous jeune plantation d'eucalyptus s'est avérée également corrélée respectivement au coefficient du ruissellement. On observe par ailleurs, une corrélation positive entre respectivement les sables grossiers ($R^2 = 0,67$), les sables moyens ($R^2=0,65$) et les limons et et 28.)

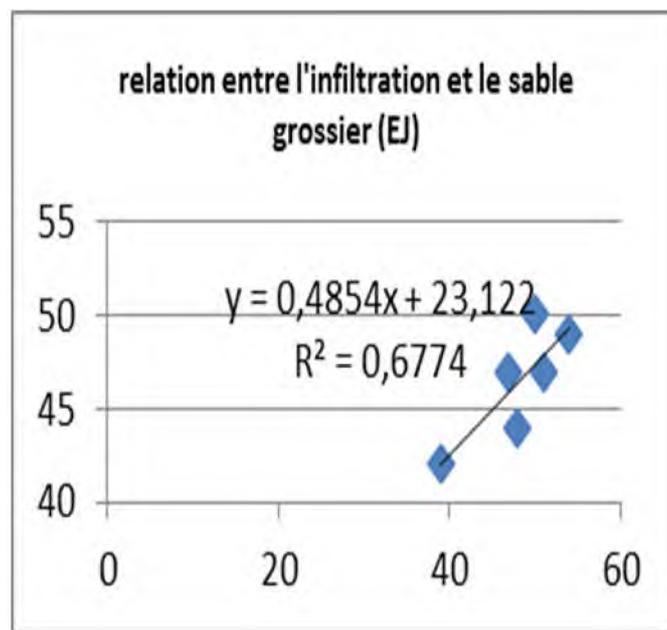


Figure 26. : Relation entre la texture du sol et le ruissellement sous EJ

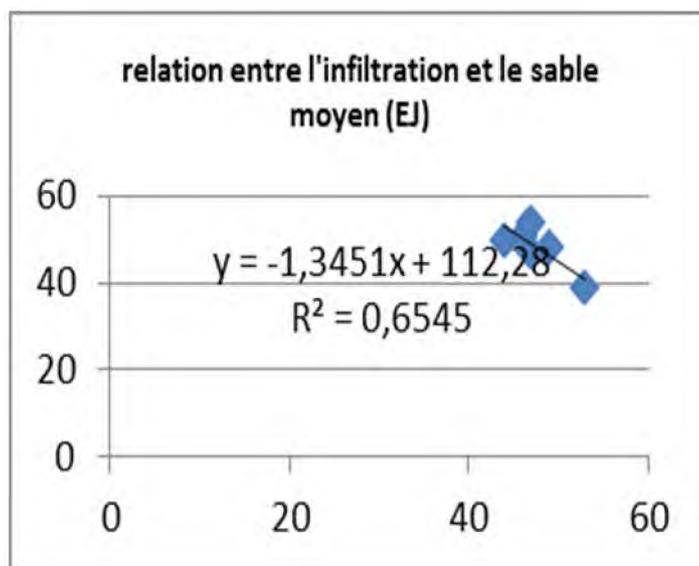


Figure 27. : Relation entre l'infiltration et le sable moyen sous EJ

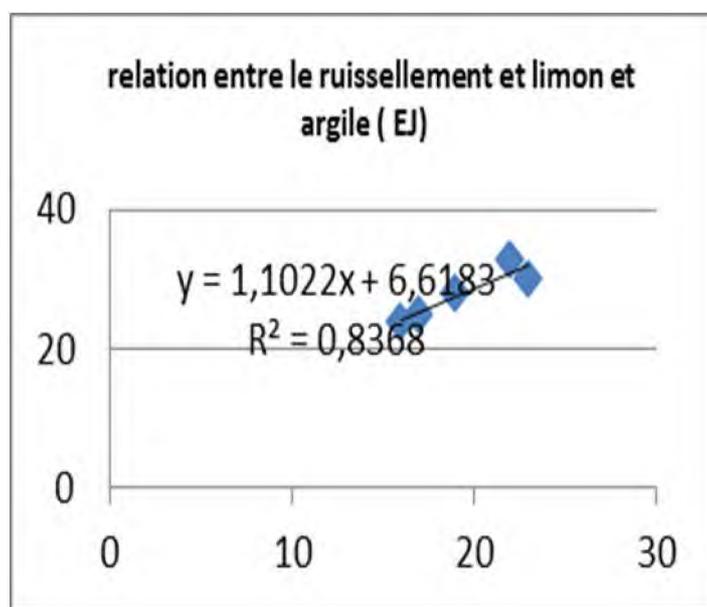


Figure 28. : Relation entre le ruissellement et le limon et argile sous EJ

Ces résultats sont conformes à ceux observés au Maroc à l'échelle de $1m^2$ avec le même appareillage par Cheggour (2008). En revanche, sous vieille plantation d'eucalyptus, aucune corrélation n'a été observée.

Ceci s'explique, vraisemblablement, par le rôle joué par l'importante couverture végétale présente sous vieille plantation qui masque l'influence de la texture du sol dans ce type de sites.

6.1.2.1. Influence de la pente sur le ruissellement et l'érosion

Bien connu des géomorphologues, la pente influence considérablement le ruissellement et l'érosion hydrique. Elle va intervenir par sa valeur, c'est-à-dire (l'importance de son inclinaison, sa longueur et sa forme).

L'inclinaison de la pente est sans doute le paramètre topographique le plus important dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion. La plupart des auteurs s'accordent pour dire que plus la pente augmente, plus l'érosion est importante. Cependant, cette relation ne fait pas l'unanimité, car des contradictions persistent encore sur le rôle joué par les autres facteurs en jeu (les états de surface, le sol ...). Sur les plateaux côtiers, les résultats des mesures expérimentales sous vieille plantation d'eucalyptus et piste (Tableau XII) montrent que sous eucalyptus, le ruissellement et l'érosion vont graduellement augmenter en fonction de la pente.

Tableau XII : influence de l'inclinaison de la pente sur le ruissellement et l'érosion sous eucalyptus vieux et sur piste

Sites	Pente %	Coefficient du ruissellement %	Erosion hydrique (t/ha/an)
Eucalyptus vieux	4	16,5	0,01
	9	37,8	0,02
	11	43,7	0,03
Piste	4	68,7	0,07
	8	74	0,21
	12	70,5	0,88

Les résultats sous eucalyptus sont conformes aux observations des auteurs comme Deploey et *al.* (1976); Djorovic, (1980); Sharma et *al.* (1983); Fox et *al.* (1997); Chaplot et Le Bissonnais, (2000) qui ont noté une augmentation du ruissellement avec la pente. Ils attribuent cela à la diminution du stockage de surface et de la profondeur des flaques.

En revanche, un effet contraire est observé sur pistes où le taux de ruissellement diminue avec le gradient de la pente: 8% de pente produit 74,7% de ruissellement alors que 12% de pente ne produit que 70 %. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que sur les plateaux

côtiers, la genèse du ruissellement est entièrement sous la dépendance des états de surface. Par conséquent, plus les pentes sont fortes, plus les croûtes de battance ont du mal à se constituer car le ruissellement organisé en rigole déchire ces structures et maintiennent la surface du sol ouverte (photo 21).



Photo 21 : Manifestation d'une rigole sur piste suite aux pluies simulées (Cliché Mayima, 2009)

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Roose (1977), sur des sols ferrallitiques qui montrent que plus la pente est forte, moins il y a de ruissellement. Ainsi, pour une pente de 2° , le taux de ruissellement est, en moyenne, supérieur de 15,5 % par rapport à une pente de 15° . L'auteur indique que quand la pente augmente, le sol reçoit moins d'eau par unités de surface pour une pluie donnée et le rapport de ruissellement sur infiltration tend à être faible.

Par ailleurs, Poesen (1984), Bryan et Poesen (1989) et Bradford et Huang (1992) arrivent au même constat, c'est-à-dire une diminution du ruissellement avec la pente mais pour des sols sensibles à la formation de croûte de battance et à la formation de rigoles. En Thaïlande et au Laos sur des sols tropicaux, les auteurs comme Janeau et *al.* (2003), Ribolzi et *al.* (2004) ont observé une diminution du coefficient de ruissellement sur des parcelles cultivées, sur des pentes allant de 16 à 63%.

6.2. Résultats du ruissellement et de l'érosion de l'ensemble des sites

Les mesures obtenues dans les différents sites, couplées aux observations de terrain, nous ont permis de faire la synthèse suivante : les différents sites y sont classés par ordre croissant de ruissellement et d'érosion hydrique, en dépit d'une variabilité assez marquée d'un site à l'autre et même lorsqu'on passe d'un essai à l'autre.

6.2.1. Ruissellement

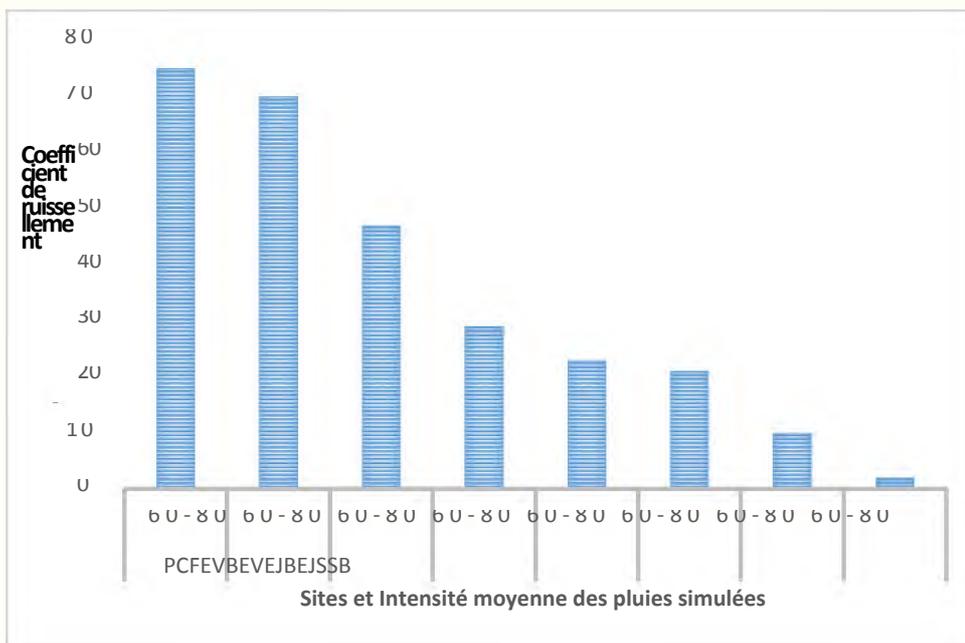


Figure 29. : Coefficients de ruissellement enregistré dans différents sites

La figure 29 montre, que dans l'ensemble, les résultats obtenus sont variables d'un site à l'autre et que les pistes et coupe-feux sont des sites où les sols sont les moins filtrants, donc très exposés aux risques de ruissellement et d'érosion hydrique. La totalité des précipitations simulées, située entre 60-80 mm, a produit en moyenne 75 mm/h. Les 25% d'eau non ruisselée ici, représentent en réalité, les pertes qui sont inévitables sur ce type d'occupation du sol. Ensuite, viennent les vieilles plantations d'eucalyptus qui produisent un taux de ruissellement de 47%. Sous jeune plantation d'eucalyptus, malgré le passage du feu, les résultats sont presque identiques. Les sites de savanes demeurent les sites où les sols sont très aérés, donc les plus filtrants.

6.2.2. Erosion hydrique

La figure 30 montre que les pertes en terre (érosion) sont importantes sur les sites nus de piste (1,4t/ha) et de coupe-feux (0,340t/ha) et augmentent rapidement avec la pente.

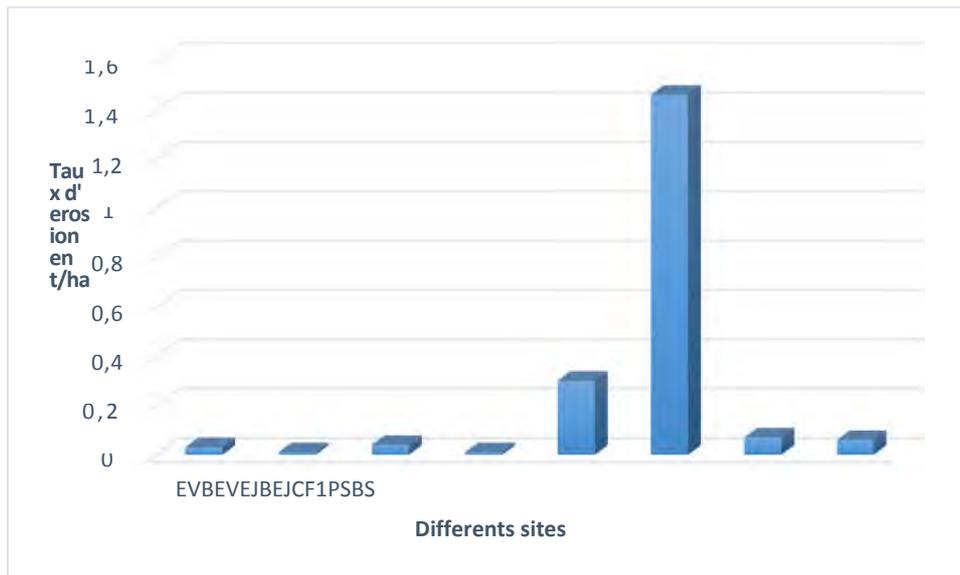


Figure. 30 : Taux d'érosion moyen dans différents sites

En revanche, sur les sites où la surface du sol est entièrement couverte par la litière (eucalyptus), les pertes en terre sont négligeables et varient entre 0,01 à 0,04 t/ha. Sous sites de savanes, les pertes sont également négligeables et varient entre 0,02 à 0,06t/ha.

6.3. Variabilité inter-sites et extra-sites du ruissellement

Le coefficient de ruissellement mesuré dans les différents sites montre une variabilité remarquable. En effet, pour les mêmes types de traitement, mêmes intensités de pluies simulées, le coefficient de ruissellement est très variable d'une expérimentation à une autre lorsqu'on passe d'un site à un autre. Sous vieilles plantations d'eucalyptus de 19 ans localisées à Kissoko et Kondi, le coefficient de ruissellement moyen enregistré dans la classe de pente (0-5) est respectivement de 20% et 1% (Tableau XIII).

Tableau XIII : Influence des sites sur le ruissellement

Sites	Traitement	Classe de pente	SF	SO	SN	SC	Krm %
KISSOKO	EV	1	7	93	0	94	20
		2	13	87	0	100	22,50
		3	0	100	8	92	54,40
KONDI	EV	1	0	100	0	100	1
		2	0	100	5	95	53
		3	10	90	10	90	50,5

Quelques raisons peuvent être avancées pour justifier ces écarts de comportement. Il s'agirait entre autre, du taux important de recouvrement du sol par la litière et l'humus qui va influencer le ruissellement, grâce à l'hydrophobicité.

Par ailleurs, sous jeune plantation d'eucalyptus, les coefficients de ruissellement obtenus sur trois sites dans la zone de Kondi montrent une variabilité importante (Fig.31.).

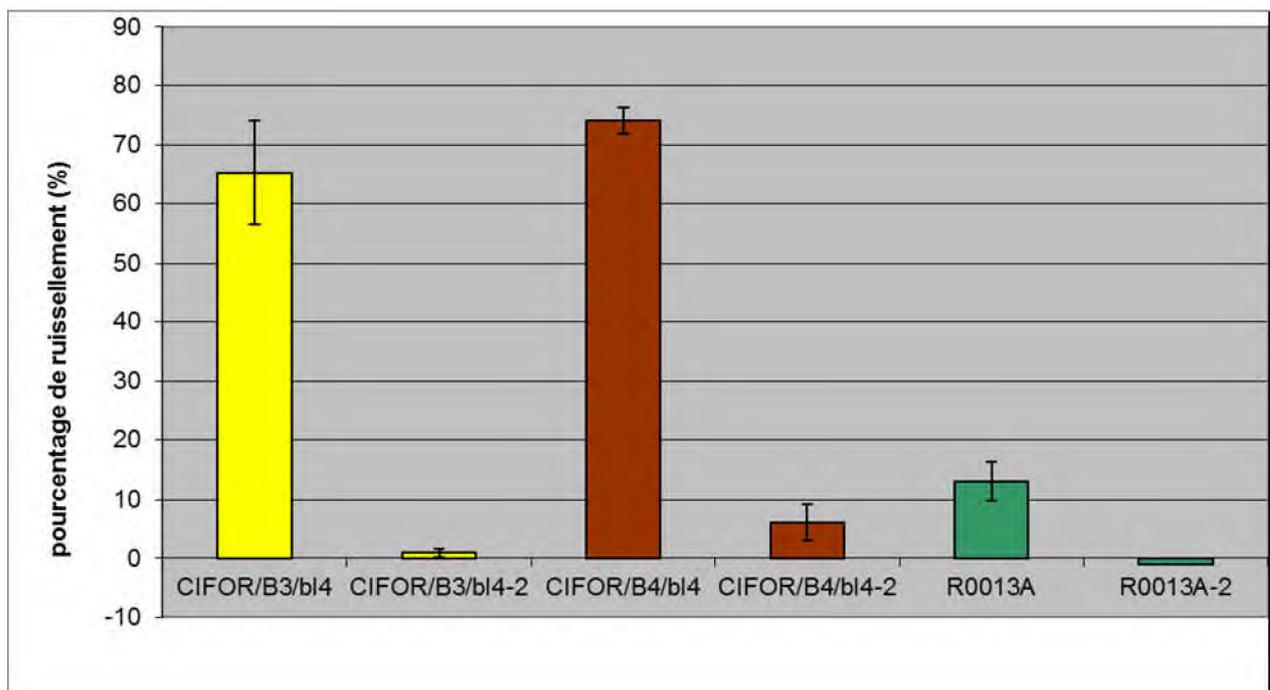


Figure.31 : Coefficient de ruissellement moyen des trois sites dans la zone de Kondi

Ces écarts, observés sous jeune plantation d'eucalyptus sont difficiles à interpréter à ce stade de la recherche, car nécessitant une étude qui doit être menée à l'échelle du bassin versant afin d'explorer cette variabilité. Cependant, plusieurs auteurs ont montré que les quantités du ruissellement et de l'érosion hydrique à l'échelle du mètre carré, en fonction des états de surface, sont toujours marquées par une importante variabilité dans le temps et dans l'espace

(Boudjemline ,1987 ; Cheggour, 2008 ; Cosandey et *al.* 1990 et Sabir et *al.*, 2004 ; Le Bissonnais, 2000 ; Esteves et Lapetite, 2003 ; Merz et *al.*, 2006 ; Moreno-de las Heras et *al.*, 2010 et Mounirou, 2012).

L'approche par simulation de pluie constitue un moyen fiable et rapide pour comparer en termes de taux de ruissellement et l'érosion sur les différents sites en fonction des paramètres physiques que sont la densité apparente, la texture du sol et les états de surface. Ceci, malgré la variabilité des résultats qui rend parfois difficile les interprétations, faits assez fréquents quand on a recours à ce type d'approche.

CHAPITRE VII

ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS OBTENUS SOUS PLUIES NATURELLES

Ce chapitre présente et discute des principaux résultats relatifs au ruissellement et l'érosion, obtenus entre 2011 et 2013 sous plantations d'eucalyptus et sous savanes originelles à Kondi. Les caractéristiques des pluies (durée et intensité) n'ont pas été prises en compte pour des raisons liées au mauvais fonctionnement du pluviographe. En revanche, seule la quantité d'eau ruisselée par rapport à la quantité d'eau tombée sur la parcelle pendant la pluie a été considérée. Ce qui nous a permis de faire les comparaisons sur la capacité d'infiltration ou non des eaux de pluies des différents sites.

7.1. Précipitations

Les pluviométries mensuelles enregistrées à la station de Kondi au cours de ces trois dernières années (période de nos expériences) montrent que les hauteurs des pluies varient entre 0,89 et 204,5 mm par mois (fig. 32)

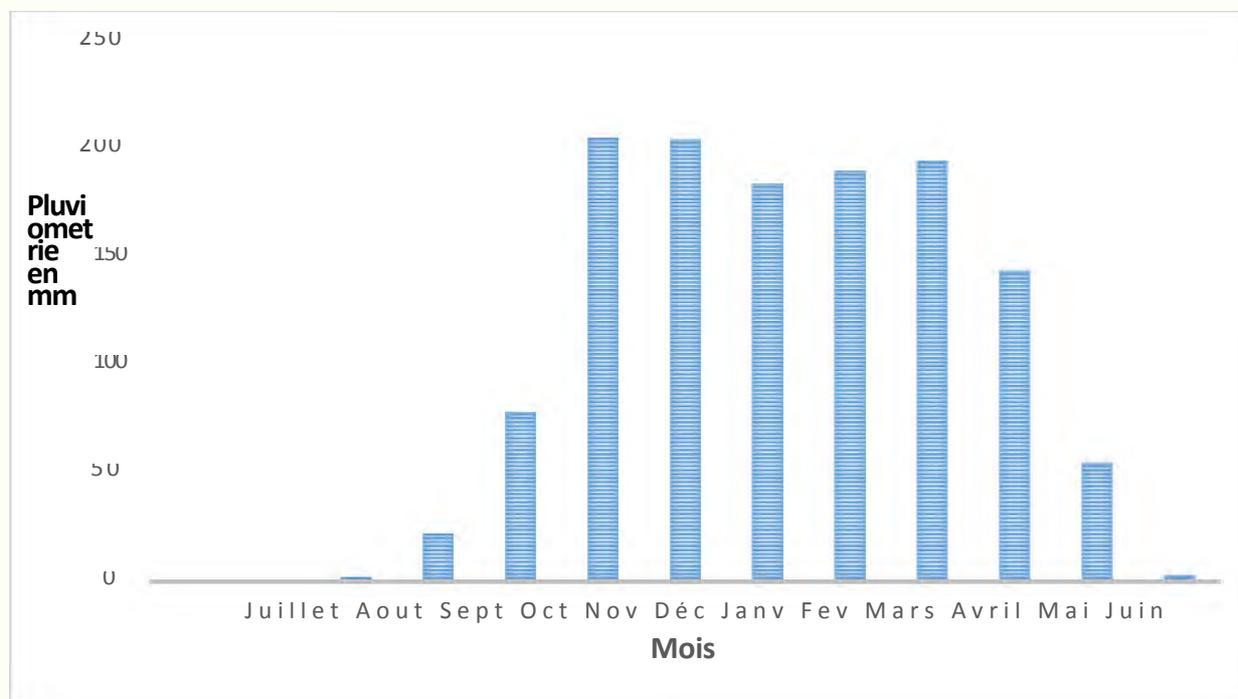


Figure 32 : Pluviométrie mensuelle dans la zone de Kondi (2011-2013)

Les mois d'octobre à avril constituent les périodes traditionnellement les plus humides avec des averses intenses aux fréquences soutenues. Le nombre des jours de pluie s'élève à 161 jours sur 365 jours, ce qui est remarquable. Les observations, les mesures du ruissellement et l'érosion montrent que les ruissellements et les érosions les plus importants sont enregistrés au cours de ces périodes, nous le verrons plus bas.

7.2. Résultats du ruissellement et de l'érosion sur différents sites

7.2.1. Ruissellement

Au cours de trois années d'expérimentation (2011- 2013), 50 évènements pluvieux ayant apporté une lame d'eau supérieure à 5 mm d'eau ont été répertoriés (tableau XIV).

Tableau XIV : Mesures des différents paramètres en parcelle d'érosion sous pluie naturelle (2011-2013)

Parcelles		EV	Taillis	EJR	Savane
Date d'installation		3 janv. 2011	8 janv. 2011	20 janv. 2011	26 janv. 2011
Nombre d'évènements ruisselants	2011-2012	27	26	28	03
	2012-2013	25	23	26	05
	Nombre moyen annuel	27	28	28	4
Coefficient de ruissellement en % (Kram)	2011-2012	20,7	14,5	21,5	1,3
	2012-2013	18,5	13,6	20,7	0,9
	Moyenne	19,7	13,8	20,9	1,1
Erosion (t/ha/an)	2011-2012	0,06	0,07	0,9	1,2
	2012-2013	0,09	0,05	0,7	1,3
	Moyenne	0,07	0,06	0,83	1,4
Etats de surface en %	Surface ouverte	16	30	31	65
	Surface fermée	84	70	69	35
	Surface nue	10	30	40	85
	Surface couverte	90	70	60	15

EV : Vieille plantation d'eucalyptus ; EJR : Jeune plantation d'eucalyptus replantée

7.2.1.1. Site de vieille plantation d'eucalyptus

Sous vieille plantation d'eucalyptus sur 50 évènements pluvieux de plus de 5 mm d'eau, 27 pluies représentant 54% de pluies ont produit une lame ruisselante de 4,6 mm d'épaisseur et produit un coefficient de ruissellement annuel moyen peu variable d'une année à l'autre (18 à 20,7%). Ces valeurs montrent que sous plantation d'eucalyptus, le coefficient de ruissellement, moyenne annuelle (*Kram* %), reste modeste mais plus important que les résultats trouvés sous savane.

Ceci est en opposition avec ce qu'affirmaient Roose et Lelong (1976) au cours d'une étude dans de milieux différents en Afrique de l'Ouest sur le rôle prépondérant du facteur couvert végétal ou des litières comme frein au ruissellement et à l'érosion hydrique.

Par ailleurs, ces résultats sont largement supérieurs à ceux obtenus respectivement par Cheggour (2008) sous pluie naturelle sur des parcelles de 100 m² au Maroc, sous forêts de pin où le coefficient de ruissellement varie entre 1,1 et 1,5%, et 25 fois supérieur aux résultats de Roose (1977) en Côte-d'Ivoire où les mesures donnent un ruissellement moyen de 0,6% sur des pentes de 13° sous forêt naturelle.

Le taux de ruissellement assez important enregistré au cours de ces expérimentations s'explique vraisemblablement par deux facteurs déterminants.

Le premier est l'important taux de couverture du sol (90%). En effet, les eucalyptus au cours de leur cycle de croissance laissent tomber une grande masse de feuilles mortes, de branchettes et d'écorces sèches qui, ensemble, construisent progressivement une litière très compacte. Celle-ci tapisse de façon continue le sol et réduit considérablement les possibilités qu'a l'eau de pluie d'entrer en contact direct avec le sol lors de sa chute (photo 22).

Le deuxième facteur est le réseau dense de racines latérales des eucalyptus qui s'entrecroisent et augmentent de ce fait le degré de fermeture du sol (90%). Ces deux facteurs liés aux états de surface rendent les ruissellements instantanés sous les plantations d'eucalyptus, quelle que soit l'intensité de la pluie. Sous certaines forêts naturelles, Fournier (1962) était arrivé à la même conclusion.



Photo 22 : Réseau dense de la litière colonisé par des racines d'eucalyptus et formant une couche peu perméable à l'eau et augmentant le degré de fermeture du sol au cours de la seconde année après plantation à Kondi (Cliché Versini, 2012)

7.2.1.2. Site de jeune plantation d'eucalyptus en taillis

Le coefficient de ruissellement annuel moyen enregistré ici, varie entre 13,5 et 14,5 %, ce qui est faible par rapport à celui enregistré sous vieille plantation. Ce faible taux de ruissellement est sans surprise pour nous et s'explique par les états de surface comme nous l'avons vu sous vieille plantation. Le sol est totalement recouvert par une litière provenant des anciennes rotations essentiellement constituées en surface, de débris de feuilles mortes (70%) et un taux de fermeture du sol assez important (70%) qui réduisent considérablement les infiltrations au détriment du ruissellement.

7.2.1.3. Site de jeune plantation d'eucalyptus replantée

Sous eucalyptus replantés, 55% des événements pluvieux ont apporté une lame ruisselante de 4,5 mm d'eau ayant provoqué un coefficient de ruissellement annuel moyen (*Kram* %) modeste (20,9) variable selon les années. Remarquons toutefois que ces valeurs sont légèrement supérieures à celles observées sous vieille plantation d'eucalyptus (19,7). Cette

légère augmentation s'explique par deux raisons : la première est liée à l'histoire récente du site. En effet, le parcellaire qui venait récemment d'être replanté a connu un tassement du sol qui d'ailleurs se vérifie par le taux de fermeture du sol assez important (70%). La conséquence immédiate est l'augmentation du ruissellement au détriment de l'infiltration. La deuxième raison est liée à l'importance de la couverture du sol (60%) qui, dans le cas des eucalyptus, influence le ruissellement.

7.2.1.4. Site de savane

En savane, sur 50 évènements pluvieux ayant produit plus de 5 mm de hauteur, seulement 4 évènements ont généré un ruissellement, soit 8%. Le coefficient de ruissellement moyen annuel (*Kram%*) enregistré est de 1,1 %. Ce qui montre que ces sols infiltrent mieux que les sols sous plantation d'eucalyptus.

Le faible taux de ruissellement enregistré ici, est en opposition avec les observations de Sitou (1994) qui a remarqué des ruissellements abondants sous savanes côtières. Ceux-ci seraient, selon lui, liés essentiellement aux lichens, mousses et algues diverses qui, pendant la saison humide, recouvrent le sol d'un enduit protecteur qui augmente le ruissellement. En revanche, une étude expérimentale menée dans un bassin versant de plusieurs hectares qui intègre tous les processus susceptibles d'expliquer cette variabilité serait plus que nécessaire.

Toutefois, nos résultats sont en relation avec le taux d'ouverture du sol (65%) favorisé par l'activité des méso faunes (termites, vers de terre, fourmis et autres insectes). En effet, nos observations nous ont permis de noter la présence de réseau dense des vides dans le sol produits par cette activité qui améliore ainsi son aération et, par conséquent, sa capacité d'infiltration.

Une étude écologique menée antérieurement par Mboukou- Kimbatsa et *al.* (1998) sous savane côtière a mis en évidence l'existence de ce phénomène. Par ailleurs, d'autres études menées respectivement en Côte- d'Ivoire par Roose et *al.* (1978), au Cameroun par Tchotsoua (1991) ont aussi mis en évidence ce phénomène. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés respectivement par Boli et *al.* (1993) sur une parcelle d'érosion de 100 à 1000 m² dans le territoire de Mbissiri (Cameroun) en savane où le coefficient de ruissellement moyen annuel varie entre 0,7 et 3%, et par Roose (1977) en Côte-d'Ivoire dont les mesures sur parcelle d'érosion de plus de 100 m² ont donné un ruissellement moyen de 0,28% sous savane arborée.

7.2.2. Concentration et pertes en terre

La concentration de matière en suspension est la quantité des particules contenues dans les eaux de ruissellement d'une parcelle au cours d'un évènement pluvieux et ruisselant dans une parcelle. Elle permet d'apprécier les pertes en terre enregistrées dans une parcelle et exprimées en tonnes de terre sèche, qui elles-mêmes sont liées à plusieurs facteurs qui conditionnent la genèse du ruissellement et sa compétence au cours d'une averse.

Tableau XV : Concentration de matières en suspensions et pertes en terre sous différents sites

Parcelles		EV	Taillis	EJR	Savane
Concentration de MES (g/l)	2011-2012	1,2	1,6	11,5	165,7
	2012-2013	1,1	1,9	10,7	160,5
	Moyenne	1,2	1,7	11,3	161,2
Erosion (t/ha/an)	2011-2012	0,06	0,07	0,9	1,2
	2012-2013	0,09	0,05	0,7	1,3
	Moyenne	0,07	0,06	0,83	1,4

A l'instar des résultats sur les taux de ruissellement, les résultats obtenus sur la concentration des matières en suspension (MES) montrent une variabilité marquée selon le type des sites, les valeurs annuelles varient entre 1,2 et 161,2 g/l (tableau XV). Sous vieille plantation d'eucalyptus et jeune plantation en taillis, la faible turbidité du ruissellement a été aussi appréciée à partir de la couleur des eaux de ruissellement qui sont restées claires avec moins de flottants comme le montre la faible moyenne obtenue de 1,2g/l. Ces résultats expriment le rôle positif de l'état du couvert végétal dans la préservation du sol de l'érosion. Ce rôle positif est confirmé par plusieurs études menées sous couvert végétal (Cheggour, 2008 ; Sitou et *al.* en cours, Roose, 1977).

Les pertes en terre mesurées sous plantation d'eucalyptus sont très réduites voire négligeables ($E = 0,06$ à $0,07$ t/ha/an) et sont bien en dessous de 2 t/ha/an, seuil qualifié de bas dans la classification des taux d'érosion généralement admise sous forêt tropicale humide naturelle (Young, 1995). Ces résultats montrent bien que la litière sous eucalyptus est très efficace à protéger le sol contre l'érosion hydrique en dépit d'une canopée très haute et d'un

houppier qui n'intercepte que faiblement les eaux de pluies. Sous eucalyptus, les valeurs trouvées concernant le taux d'interception par la canopée des eaux de pluies atteignent 96% Rougerie (1978) cité par Wassmer, (1984) ; Tchawa, (1991) ; Poore et Fries (1985).

Cette faible interception des eaux de pluies par la canopée d'eucalyptus, d'après Wassmer (1981), explique l'allure torrentielle du ruissellement et le déchaussement des racines des arbres qu'il a observé au Rwanda.

Sous nos savanes herbeuses, contre toute attente, malgré les faibles taux de ruissellement observés ici, la turbidité du ruissellement et les pertes en terre sont assez importantes (161,2g/l et 1,4t/ha/an) en comparaison avec celles obtenues sous plantations d'eucalyptus. Ces résultats sont supérieurs à ceux trouvés par Avenard et Roose (1972) sous savane arborée, dont les pertes en terre sont à peine de 0,2 à 0,9 t/ha/an.

Dans notre zone, ces résultats peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs : le premier facteur explicatif est le fait que, sous savanes herbeuses, le recouvrement lâche du sol par les touffes d'herbes avec un taux de dénudation qui atteint 85%, ce qui naturellement expose le sol à l'effet splash des gouttes de pluies et à l'énergie des eaux du ruissellement. Le second facteur est lié à l'activité des fourmis, vers de terre et autres insectes. En effet, au cours de nos observations, nous avons remarqué que ces fourmis, vers de terre et autres insectes, en réorganisant le sol, renvoient à la surface des quantités assez importantes de terre (terricules des vers de terre) qui par la suite sont prise en charge par les eaux de ruissellement, d'où l'importante turbidité des eaux de ruissellement et les pertes en terre observées.

7.2.2.1. Estimation de l'érosion par l'équation de Wischmeier

La modélisation par l'équation USLE de Wischmeier (1978) à partir des paramètres C, K, et P déterminés en Afrique de l'ouest (Roose, 1977 et Roose, 1994) sur des formations pédologiques à horizons superficiels semblables et d'autres paramètres que nous avons déterminés (R.LS), nous a permis d'évaluer annuellement des pertes en terre ou l'érosion sous différents types des sites et pentes dont les résultats sont consignés dans le tableau XVI.

**Tableau XVI : Taux d'érosion théorique (t/ha/an) enregistré dans les quatre sites à
Kondi**

Site	R	C	K	LS	P	Pente %	A(t/ha/an)
EV (CIFOR)	605,5	0,001	0,3	0,57	1	7	0,10
EJT	605,5	0,001	0,3	0,69	1	8	0,12
EJR	605,5	0,001	0,3	1,76	1	15	0,31
S	605,5	0,01	0,3	4,3	1	25	7,81

L'analyse de ce tableau (XVI) montre que les taux d'érosion varient de 0,1 à 7,81 t/ha/an d'un site à un autre et restent, de manière générale, très faibles sous plantation d'eucalyptus (1,7 t/ha/an), mais supérieurs sous savane (7,81 t/ha/an). En revanche, quels que soient le type de site et la nature du couvert végétal, l'érosion en nappe reste en moyenne très faible (2,08 t/ha/an). On constate aussi que la savane produit six fois plus de sédiments que les sites sous plantations d'eucalyptus.

Les valeurs trouvées sous plantations d'eucalyptus confirment celles que nous avons obtenues sous pluie simulée. Sous savane, ces valeurs se rapprochent de celles trouvées dans la région rifaine du Maroc (Elgarouani et *al.*, 2005) sur des sites nus.

7.2.2.1.1. Limites de l'équation de Wischmeier

Cette formule est mondialement utilisée pour estimer les pertes en terre au niveau de la parcelle. Son universalité est néanmoins mise en doute, phénomène pas nouveau, au regard de plusieurs critiques faites par de nombreux auteurs. Ceux-ci estiment qu'elle n'est pas applicable au domaine soudanien au sol battant (Guillobez et *al.*, 1992., Bep et *al.*, 1996).

Pour Auzet (1987), la principale critique est de ne pas tenir compte des interactions entre facteurs. Or, dans les régions peu accidentées à climat peu agressif, les relations entre facteurs sont sans doute davantage déterminantes que les facteurs eux-mêmes. Par ailleurs, l'utilisation de ce modèle de parcelles expérimentales standardisées et l'inclusion de tout autre échelon spatial en font un modèle empirique qui semble maintenant peu réaliste.

Tchotsoua (1994) pense, par ailleurs, que la première difficulté vient du fait que la définition de l'indice d'érosivité des pluies n'est valable que pour des pluies non orographiques pour lesquelles une relation existe entre l'intensité et l'énergie cinétique à l'est des Rocheuses aux USA. Or, dans un milieu au relief contrasté comme Yaoundé, il s'est avéré difficile de déterminer laquelle des pluies n'était pas orographique. D'autre part, l'auteur montre que le seuil de déclenchement du ruissellement (30 mn) reste très aléatoire et non applicable partout.

Rappelons, par ailleurs, que cette équation ne tient pas compte des ruissellements en rigoles ou en ravineaux, processus majeurs sur les plateaux côtiers. En dépit de tout ce qui précède, les résultats de cette équation apportent, toutefois, des informations importantes aux décideurs et aux aménageurs pour simuler des scénarios d'érosion d'évolution de la région et planifier les interventions de lutte contre l'érosion surtout dans les zones où l'érosion en nappe est prédominante sur l'érosion linéaire. Elle permet aussi de déceler des éventuels impacts liés aux modes d'utilisation des sols.

7.3. Comparaison des résultats à différentes échelles de mesures

Pour mieux appréhender des éventuels effets liés au changement d'échelle, nous avons procédé à la comparaison des résultats obtenus à l'échelle de 1m^2 et ceux obtenus à l'échelle de 90m^2 . Ainsi, le rapport entre le coefficient du ruissellement enregistré dans la grande parcelle (Q1) et le coefficient du ruissellement enregistré dans la petite parcelle (Q2) a été utilisé.

Ce rapport est inspiré de celui utilisé en Afrique de l'ouest par Van de Giessen et *al.*, (2000) et Mounirou (2012). L'étude de Mounirou sur la quantification du ruissellement et l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso, montre que, si ce rapport (Q1/Q2) est égal à 1, ce sont les mêmes processus de la genèse du ruissellement qui se manifestent au niveau de deux échelles. Par contre, si le rapport est inférieur à 1, il y a émergence des processus nouveaux à la grande échelle et si ce rapport est supérieur à 1, il y a donc accroissement du potentiel du ruissellement et accroissement à la grande échelle des manifestations des mêmes processus observés à la petite échelle.

Tableau XVII : Résultats comparatifs à différentes échelles.

Sites	Echelle (1m ²)		Echelle (90m ²)		Rapport Q1/Q2	
	Kmr %	Erosion(t/ha/an)	Kmr %	Erosion (t/ha/an)	Kmr	Erosion
Savane	10	0,06	1,1	1,4	0,11	23,3
EJR	21	0,08	20,9	0,8	0,99	10
EV	29	0,01	19,7	0,07	0,67	7

Q1 : coefficient du ruissellement et l'érosion au 90m² et Q2 : coefficient du ruissellement et l'érosion au 1m².

7.3.1. Ruissellement

Les résultats consignés dans le tableau XVII montrent que, sous savane, le coefficient du ruissellement est passé de 10% sous pluie simulée à 1,1% sous pluie naturelle soit une régression de plus de 10 points. Sous jeune plantation d'eucalyptus, on constate une légère diminution du coefficient de ruissellement lorsqu'on change d'échelle (21% sur 1m² et 20% sur 90 m²). Sous vieille plantation d'eucalyptus, nous constatons la même tendance à la diminution du coefficient de ruissellement que sous les sites précédents. Le coefficient de ruissellement est passé de 29 % sur la parcelle de 1 m² à 19 % sur la parcelle de 90 m².

Sous les vieilles et jeunes plantations d'eucalyptus, la valeur du rapport est proche de 1, ceci laisse présager l'intervention des mêmes processus sur les deux échelles. Par contre sous savane, ce rapport a une valeur inférieure à 1, ce qui signifie que lorsqu'on passe de l'échelle de 1 m² à l'échelle de 90 m², il y a émergence de nouveaux processus qui vont intervenir, c'est-à-dire que le phénomène de non- linéarité est très marqué. Cependant, de manière générale, toutes ces valeurs sont inférieures à 1. Cela est la preuve que notre dispositif a fonctionné normalement. Signalons que Le Bissonais (2000) dans une étude expérimentale sur l'analyse des mécanismes d'érosion a trouvé au contraire une valeur supérieure à 1.

Nos résultats rejoignent les conclusions de plusieurs auteurs qui ont démontré que le coefficient du ruissellement par unité de surface diminue lorsqu'on passe d'une petite échelle de mesure à une grande échelle de mesure (Yair et Lavee, 1985 ; Kirkby et *al.*, 2002 ; Gomi et *al.*, 2008 et Mayor et *al.*, 2011).

Beaucoup de causes à l'origine du problème d'échelle sur le ruissellement (La non-linéarité des processus, la dynamique de l'intensité des précipitations, les effets de seuils dans la manifestation de certains processus ou encore le développement de propriétés émergentes des sols à certaines échelles) ont été identifiées et décrit par Julien et *al.*, (1990) ; Blösch et *al.*, (1995) ; Sivapalan et *al.*, (2002) ; Giesen et *al.*, (2005) ; Reaney et *al.*, (2007) ; Lin et *al.*, (2010). La variabilité des conditions d'humidité du sol, l'encroûtement des sols, l'intensité de pluie, peuvent tous produire différents régimes hydrologiques à différentes échelles spatiales.

7.3.2. Érosion hydrique des sols

En ce qui concerne les mesures de l'érosion, le rapport d'échelle est largement supérieur à 1 pour tous les sites. La courte longueur des micro-parcelles ne permet pas une forte accumulation du ruissellement, ce qui fait que l'énergie globale du ruissellement est faible et ne permet plus à celui-ci de raviner. Ce fait expliquerait vraisemblablement cette différence observée. Nos résultats confirment bien la tendance observée par Le Bissonnais, (2000) et Mounouri (2012).

Bien que n'affectant pas les vieilles plantations d'eucalyptus l'érosion mécanique, due aux ruissellements est active autour de celles-ci. Elle se manifeste par des formes assez spectaculaires dont les processus d'évolution et les mécanismes de mise en place sont abordés dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE VIII

CONSEQUENCES DES RUISSELLEMENTS AUX ABORDS DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS ET METHODES DE LUTTE ANTIÉROSIVE

Les résultats obtenus sous simulations et sous pluies naturelles montrent que les ruissellements sont assez abondants sous plantation d'eucalyptus mais l'érosion y est par contre faible. C'est à l'extérieur des plantations, que les eaux de ruissellement engendrent une intense érosion mécanique. Le présent chapitre est consacré à la description de cette activité érosive qui se manifeste sous forme de ravinement, d'ensablement et de cirques d'érosion plus ou moins figés situés autour des plantations d'eucalyptus. Dans ce chapitre, nous proposons aussi quelques mesures pour atténuer cette érosion.

8.1. La dynamique de l'érosion hydrique aux abords des plantations d'

eucalyptus 8.1.1. Les ravinements

Les ruissellements issus des plantations d'eucalyptus convergent, d'une part, vers les sites nus et compactés que sont les pistes et coupe-feux et, d'autre part, vers le bas des versants. Sur les pistes et les coupe-feux, en raison du compactage et du tassement du sol, il se produit déjà un ruissellement important auquel s'ajoute celui qui prend naissance à l'intérieur des plantations. Ces ruissellements abondants qui se développent sur ce vaste impluvium sont à l'origine d'un ravinement intense qui se manifeste par des formes classiques : rigoles, ravines et ravins.

En effet, sur les pistes et les coupe-feux, les ruissellements s'étalent d'abord de façon diffuse et engendrent une érosion en nappe qui procède par décapage et transport en charge des particules libérées par le phénomène du splash. Il importe de noter que l'action du splash sur les coupe-feux est favorisée par les retournements du sol liés aux travaux d'entretien qu'on y mène régulièrement. Les petits agrégats cohérents du sol sont détruits par les gouttes de pluie qui libèrent et étalent les différentes particules. Les argiles se soudent et forment les croûtes de battance qui renforcent les ruissellements qui, progressivement, se concentrent de façon préférentielle le long des chenaux d'écoulement créés par les traces des pneus ou autres sillons.

Cette concentration leur confère une force qui les rend capables d'approfondir et d'agrandir davantage leurs lits initiaux. C'est ainsi que naissent les rigoles puis les ravines et les ravins.

Les rigoles représentent le premier stade du ravinement. Elles ont une profondeur inférieure ou égale à 50 centimètres. Lorsqu'elles sont nombreuses sur la piste elles gênent la circulation. A chaque pluie les pistes et les coupes feux se dégradent assez profondément par ce type de ravinement (Photos 23 et 24). En général les rigoles disparaissent vite après plusieurs passages de véhicules.

Mais, sur des sentiers peu fréquentés ou à la suite d'une succession des pluies abondantes, il arrive que l'évolution des rigoles soit très rapide. On assiste ainsi à la mise en place des ravinements plus profonds : des ravines puis des ravins. En mars 2012, en deux sorties successives, le 21 et le 22, nous avons observé après une pluie qui est tombée dans la nuit du 21 au 22, la transformation assez rapide d'une rigole en ravine sur un coupe-feu à Kissoko (photos.23 et 24).



Photos (23 et 24) : Dégradation d'un coupe-feu à Kissoko le 22 mars 2012, après la pluie du 21 au 22 mars 2012 (Cliché Mayima, 2012)

Les ravines sont des entailles ou excavations un peu plus importantes que les rigoles par leurs dimensions notamment leur profondeur qui atteint 2 mètres. Elles sont l'œuvre des ruissellements plus volumineux et donc plus agressifs. Dans la zone d'étude, plusieurs coupe-feux et pistes sont le théâtre de ce type de formes (photos 25 et 26).



Photos (25 et 26) : Dégradation respective d'une piste et d'un coupe-feu par des ravines à l'intérieur des champs d'eucalyptus et rendant l'accès difficile à Kondi (Cliché Mayima, 2012)

Les ravins sont du point de vue des dimensions, les formes de ravinement les plus importantes et les plus spectaculaires. Ce sont des entailles de plus de 2 mètres de profondeur et de plusieurs mètres de long et de large. Ils dégradent de façon très préoccupante les plateaux côtiers.

Les pistes et coupe-feux mal entretenus sont les principaux sites de prédilection de ce type de ravinement qui entravent les opérations d'exploitation et la desserte des villages environnants par véhicules de transport. Ce fait conduit le plus souvent l'industriel chargé de gérer ce massif à abandonner des tronçons entiers et à recréer de nouvelles pistes d'accès (Photo 27).



**Photo (27) : Ravin en pleine évolution sur la route de Kondi village
(Cliché Mayima, 2013)**

Les observations de terrain nous ont permis d'inventorier plus de 30 ravins et ravines localisés sur les pistes et coupe-feux à Kondi et Kissoko et dont cinq d'entre eux ont fait l'objet d'une quantification sur le terrain (tableau XVIII).

Un des 5 ravins situés à environ 150 mètres du village Kondi a fait l'objet des mesures à deux périodes différentes de l'année entre décembre 2012 et Mars 2013. Ces données consignées dans le tableau XVIII montrent que la largeur du ravin a doublé en 4 mois, passant du simple au double (de 1,5 à 2,8 m) soit une progression de plus de 95%. La longueur de 50,5 est passée dans le même temps à 60,5 m soit 10% de plus, tandis que sa profondeur a augmenté de 90 cm. Pour ce ravin, la quantité de terre érodée est importante et varie de 229 à 825,4t soit une augmentation de 3 fois (tableau XVIII).

Ainsi, comme on peut le noter, le ravinement est très intense et peut évoluer très vite. Les processus d'évolution qu'on observe partout ailleurs sont les mêmes, notamment son creusement vertical et latéral par sapement des parois.

Tableau XVIII: Volume du vide et terres perdues par l'érosion dans la zone de Kondi et Kissoko en décembre 2012

Ravin	Largeur moyenne (m)	Longueur moyenne (m)	Profondeur moyenne (m)	Surface (m ²)	Volume du vide (m ³)	Quantité de terre érodée en t
Ravin du village (Kondi)	1,5	50,50	1,8	75,8	136,4	229,06
Ravin du village (Kondi) mars-2013	2,8*	60,5*	2,9*	169,4*	491,3*	825,4
Ravin sur la route (Kondi)	1,8	80,40	2,2	144,72	318,4	534,9
Ravin sur la route (Kondi)	0,5	78,70	2	39,35	78,7	132,2
Ravine sur la route (Kissoko)	2,5	65,50	1,9	163,75	311,62	523,5
Ravine (Kissoko)	2,4	30	1,3	72	93,6	157,2

* Valeurs obtenues les 8 et 10 mars 2013

8.1.2. Les ensablements

Un autre type de dégradation résultant des ruissellements abondants générés par les plantations d'eucalyptus est représenté par les ensablements. Ceux-ci se manifestent sous forme d'importantes plages de sables blancs qui tapissent les jeunes plantations dominées topographiquement par de vieilles plantations pourvoyeuses de ruissellements (photo 28). Les ensablements se manifestent aussi et souvent par des épais épandages de sables qui

ensevelissent et étouffent les jeunes plants d'eucalyptus (photo 29). Ce phénomène préoccupe également les responsables de cette exploitation sylvicole en raison des dégâts qu'elle cause.



Photo (28) : Nappe de sables blancs et débris de charbons de bois sous jeune plantation d'eucalyptus brûlé de 1an à Kondi (Cliché Mayima, 2012)



Photo (29) : Nappe de colluvions ensevelissant progressivement une jeune plantation d'eucalyptus de 1 an à Kondi (Cliché Mayima, 2012)

8.1.3. Les cirques d'érosion

Comme indiqués dans la présentation du cadre général et ainsi que le montre l'image ci-dessous de Google Earth du 21 août 2013, les plateaux côtiers sont incisés par d'énormes excavations dont la mise en place date du Quaternaire (Sitou, 1994). Cette vue d'ensemble montre que d'un côté, les parcelles d'eucalyptus occupent les sommets d'interfluves, donc des positions supérieures par rapport aux cirques d'érosion et de l'autre, les parcelles sont, dans l'ensemble, orientées vers les têtes des cirques (fig.32 et photo 30).



Figure.33 : Configuration actuelle des parcelles d'eucalyptus débouchant sur les cirques d'érosion vers Kondi (Source: Google Earth, 2013)



Photo 30: Plantation d'eucalyptus sur les bords du cirque dont la paroi supérieure très active évolue par érosion régressive suite aux eaux de ruissellement provenant de la plantation à Kondi (Cliché Mayima, 2013)

Plusieurs de ces formes, aujourd'hui, colonisées par des forêts sont figées ou en partie figées (fig.33). Malheureusement, les ruissellements générés par les plantations d'eucalyptus menacent la stabilité de certains de ces vieux cirques d'érosion. En effet, les observations de terrain indiquent qu'à plusieurs endroits, les ruissellements issus des champs d'eucalyptus se déversent directement dans des cirques d'érosion figés ou en partie figés situés en bas desdits champs d'eucalyptus. Ces ruissellements ont engendré une reprise d'érosion parfois spectaculaire. La redynamisation de ces cirques se fait par l'agrandissement des incisions des parois supérieures abruptes, engendrées par les ruissellements concentrés qui descendent sous forme de torrent à l'intérieur, en s'engouffrant dans les petites stries ou sillons préexistants. Elle se fait aussi par des écroulements massifs des pans entiers des parois supérieures à la suite de l'imbibition par les ruissellements des rebords supérieurs desdites parois (photo 30).

8.2. Suggestion sur les méthodes de lutte

La gestion de l'environnement passe entre autres par la lutte contre les ruissellements et l'érosion hydrique, qui constituent pour la société en charge des plantations d'eucalyptus une préoccupation majeure. La réduction des ruissellements et de leurs effets doit donc constituer pour elle une nécessité si elle veut la pérennisation de cette activité d'afforestation. En effet, les observations de terrain et les résultats auxquels nous sommes parvenus, montrent clairement que les plantations d'eucalyptus produisent des taux de ruissellement importants et que les pistes et coupe-feux sont des sites de prédilection où débouchent ces masses d'eau qui y engendrent une érosion par ravinement. Par conséquent, nous suggérons quelques méthodes qui vont dans le sens de gérer les eaux de ruissellement dans les plantations, sur les pistes et coupe-feux sans modifier l'itinéraire sylvicole qui supposerait un coût supplémentaire pour les gestionnaires du massif forestier.

8.2.1. Gestion des eaux de ruissellement dans les plantations d'eucalyptus

La gestion des eaux de ruissellement devrait avoir comme objectif principal de favoriser l'infiltration et éviter que les eaux qui prennent naissance dans les plantations ne puissent se jeter sur les pistes et coupe-feux. Il s'agit, ici, d'aérer le sol de façon à permettre l'infiltration des eaux. Dans notre contexte, il est possible d'agir au niveau des états de surfaces. La solution principale serait de créer un réseau de vides par un tracteur à charrue dont les disques utilisés actuellement seraient remplacés par d'autres ayant des pointes de plus de 30 cm de long et de quelques centimètres de diamètre. L'engin passerait entre les arbres une ou deux fois par mois en période de pluies. Les pointes s'enfonceraient dans le sol et créeraient un réseau de petits trous qui non seulement vont rompre la continuité de la litière mais aussi et surtout aérer le sol sous la litière.

Par ailleurs, cette réduction des ruissellements devrait être accompagnée par un endiguement des parcelles situées sur des pentes de plus de 5%. La mesure consisterait à construire de petites levées de terre mélangées à de l'herbe en contre bas desdites parcelles. Le mélange de l'herbe avec la terre favoriserait l'enherbement rapide des digues et donc leur stabilisation. Ces digues arrêteraient les ruissellements qui réussiraient à se former malgré l'aération du sol. Elles créeraient ainsi, à la base de chaque parcelle ou de quelques parcelles un impluvium où s'accumuleraient les ruissellements. Les besoins en eau des eucalyptus et la

chaleur relativement importante de cette zone devaient suffire pour qu'entre deux pluies ou deux séries de pluies, ces eaux stagnantes disparaissent par infiltration et évaporation.

8.2.2. Gestion des eaux de ruissellement sur les pistes et coupe-feux

Rappelons que les pistes permettent l'accès aux plantations d'eucalyptus pour tous les travaux allant de la phase de préparation des sols à celle d'exploitation (évacuation des rondins). Les pare-feu ou coupe-feux par contre sont mis en place pour empêcher que les feux se propagent d'une parcelle à une autre.

Nous avons constaté sur le terrain que ces aménagements sont mis en place sans tenir compte de la disposition des pentes du terrain. Plusieurs d'entre eux sont disposés dans le sens de la pente depuis le sommet jusqu'à la base du versant. Ce qui fait intervenir le facteur longueur de pente, qui joue un rôle aggravant sur le ruissellement et l'érosion. En effet, la longueur de la pente offre aux ruissellements la possibilité de se renforcer aussi bien en volume qu'en énergie. La solution serait donc d'empêcher que ces deux paramètres soient réunis. L'objectif étant de réduire la vitesse des eaux de ruissellement en la maintenant en dessous de 25 cm/s d'après le diagramme de Hjulsroim (Roose, 1994).

Ainsi, trois mesures principales peuvent être entreprises pour atteindre cet objectif. La première serait l'isolement des parcelles par endiguement. Elle consiste, comme nous l'avons indiqué plus haut, à construire des levées de terre le long des parcelles de façon à empêcher les ruissellements qui se forment dans les plantations d'eucalyptus de déboucher sur les pistes et les coupe-feux. La deuxième mesure possible serait la création, le long des pistes et coupe-feux situés sur des pentes, des petits impluviums. Il s'agit de creuser sur le bord des pistes ou des coupe-feux, en diagonale, des petits sillons en forme de petites reculées très inclinées qui peuvent se terminer par de petits trous fig. 34.

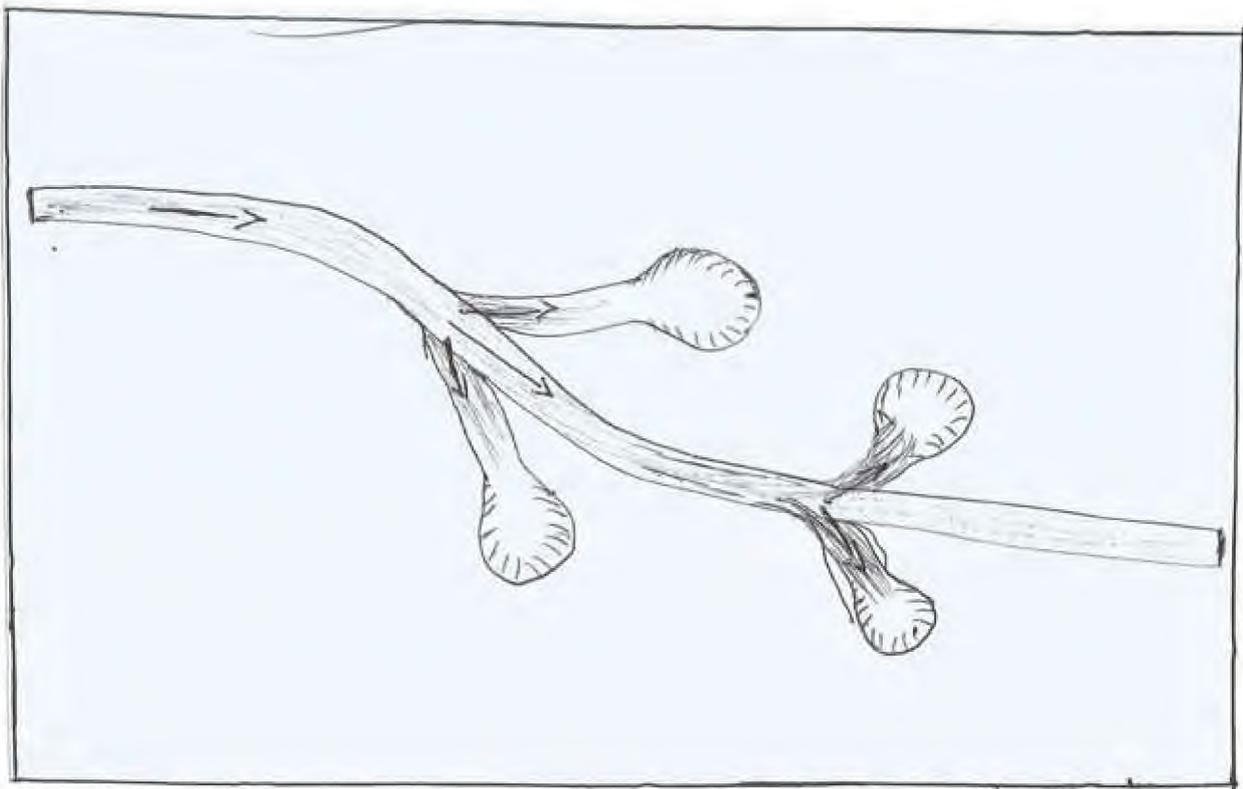


Figure. 34 : Dispositif de rétention d'eau de ruissellement le long d'une piste

Ces petits bassins de rétention peuvent être créés tous les 100 mètres dans les zones bien pentues (pentes supérieures à 5%).

Enfin, la troisième mesure consisterait à réduire la largeur des pistes et coupe-feux ; ceci aurait pour effet positif immédiat la réduction de cette surface imperméabilisée pourvoyeuse elle-même de ruissellements.

8.2.3. Gestion des ruissellements par une meilleure organisation de l'espace : utilisation des courbes de niveau dans l'occupation de l'espace

Nous avons vu que dans les plantations d'eucalyptus, le ruissellement augmentait avec le gradient de la pente et que plusieurs parcelles, pistes et coupe-feux occupent des versants très inclinés et sont disposés dans le sens de la pente. Il serait souhaitable pour la société de généraliser la plantation des eucalyptus en courbes de niveau. En effet, la plantation le long des courbes de niveau (parallèle à la pente à, et non dans le sens de la pente donc de l'écoulement) est l'un des éléments déterminants de la gestion du ruissellement sur le versant. Elle vise à créer un stockage par rétention d'eau dans la couche superficielle du sol et à ralentir la vitesse du ruissellement, en donnant à l'eau le temps de s'infiltrer dans le sol (fig.35).

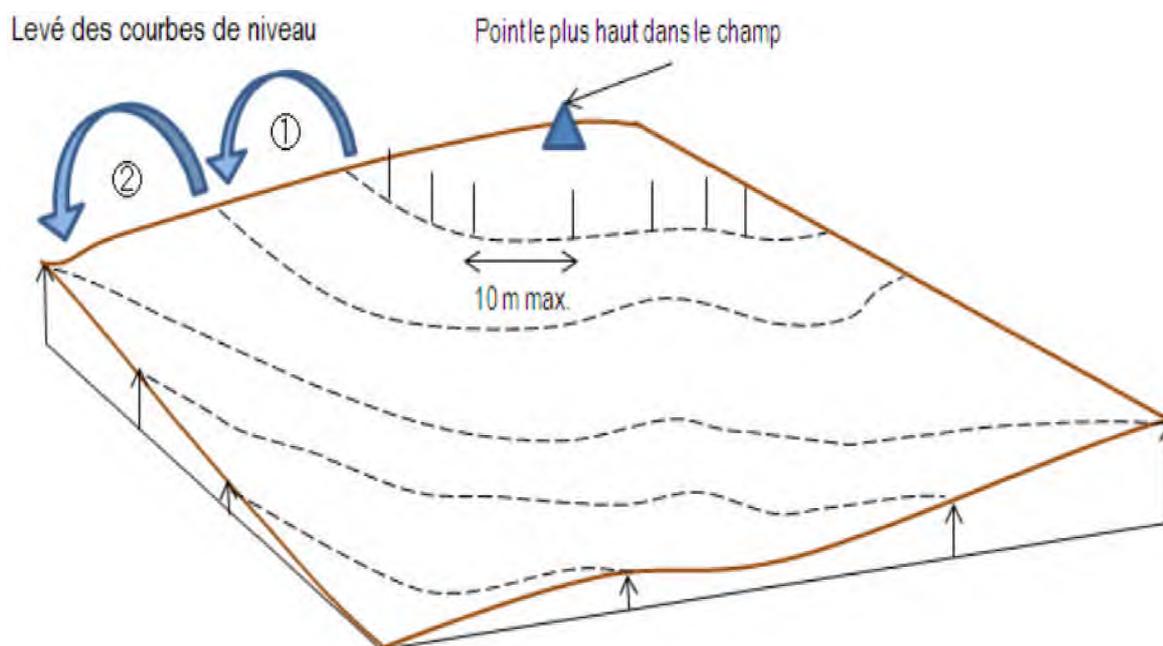


Figure. 35: Plantation en courbes de niveau

En revanche, sur des pentes supérieures à 10%, le travail de la terre suivant les courbes de niveau doit être combiné à d'autres mesures, telles que la culture en terrasses ou la culture en bandes. Toutefois, nous ne sommes pas en mesure compte tenu de l'état actuel de la recherche de confirmer que l'utilisation des terrasses conviendrait bien aux sols sableux sans une étude au préalable. Néanmoins, cette méthode a fait des preuves ailleurs dans un contexte de fortes pentes sur des sols argileux (Wassmer, 1981).

La configuration de certaines pistes principales d'exploitation pourrait également être revue en fonction de la carte des pentes. En effet, la disposition actuelle de certaines pistes constitue un facteur de risques. Il serait souhaitable que les pistes soient aussi disposées en ligne brisée ou quinconce avec des sections diagonales et des sections perpendiculaire à la pente générale.

8.2.4. Description et analyse de certaines méthodes curatives utilisées sur le terrain

Les ruissellements engendrent une érosion de plus en plus intense sur l'ensemble du massif forestier. Cette érosion, comme nous venons de le montrer plus haut, se manifeste par un ravinement intense qui dégrade de façon considérable et particulière les pistes et les coupe-feux. Pour faire face à ce ravinement intense, une seule méthode curative est utilisée par les

responsables de cette sylviculture. Celle-ci consiste à découper le ravin en sections isolées les unes des autres par des mottes de terre.

Le principe consiste à boucher partiellement le ravin, en versant par endroits de la terre. Ainsi disposé, le ravin se présente en une succession de petites dépressions fonctionnant comme de petits bassins de rétention (Photo 31). Ainsi, dans le fonctionnement, l'eau en provenance de l'amont se déverse dans le premier bassin qu'elle remplit puis franchit par débordement la motte de terre, pour se déverser dans le bassin suivant. Le processus se poursuit jusqu'à la dernière section. Ce mécanisme permet de réduire la vitesse de l'eau et de redistribuer le matériel des différentes mottes de terre. Cette redistribution de la terre contribue au remblaiement du ravin.

Ainsi, si cette méthode permet de boucher le ravin, elle ne résout pas le problème des voies de communication qui ne peuvent être utilisées ni pendant le processus de comblement du ravin, ni après. En effet, chaque fois qu'elle est appliquée, la société se trouve dans l'obligation d'abandonner le tronçon et de créer d'autres pistes. La conséquence est la multiplication des pistes abandonnées qui sont autant d'impluviums pourvoyeurs de ruissellements et de ravinement.



Photo 31: Stabilisation latérale d'une piste à Kondi (Cliché Mayima, 2013).

La méthode permet d'empêcher la concentration des eaux de ruissellement en créant un petit bassin de rétention d'eau qui va favoriser l'infiltration et l'évaporation

Conclusion partielle de la troisième partie

Au terme de ces différentes campagnes de mesures et à la lumière des résultats obtenus, plusieurs enseignements peuvent être tirés. De manière générale, les taux de ruissellements et les pertes en terre diffèrent d'un site à un autre en fonction des états de surface et de quelques autres facteurs tels que la densité apparente et la pente.

Sur les sites forestiers plus ou moins couverts, les résultats obtenus sur les mini-parcelles de 1 m² sous pluies simulées ont les mêmes tendances que ceux obtenus sur des parcelles de 90m² sous pluies naturelles.

Ainsi, sous vieilles plantations d'eucalyptus, bien que fortement ouvert, le sol est entièrement couvert en surface par la litière. Les ruissellements sont abondants, mais les pertes en terre négligeables. La litière en raison de ses caractéristiques physiques (épaisseur, composition, ...) constitue donc un facteur à la fois générateur du ruissellement et protecteur du sol contre l'érosion mécanique. Sous vieilles plantations d'eucalyptus brûlées, le ruissellement est aussi remarquable mais la litière, en partie diminuée par le feu, laisse quand même s'infiltrer un peu d'eau, réduisant ainsi les ruissellements. Mais, ici comme sous vieilles plantations d'eucalyptus non brûlées, les ruissellements n'engendrent presque pas d'érosion mécanique.

La turbidité enregistrée dans les eaux de ruissellement est liée uniquement à la couleur noire causée par la cendre de la matière organique brûlée. Sous jeune plantation d'eucalyptus le taux de couverture est assez faible à cause de la litière presque inexistante encore. Le sol garde pendant un moment une structure aérée causée par les labours et les sarclages inhérents aux opérations de plantation et de replantation. La conséquence est que pendant cette période, les infiltrations sont largement supérieures aux ruissellements, mais l'érosion mécanique est non négligeable du fait justement de la faible couverture du sol par la litière et par conséquent de la faible protection de celle-ci contre l'effet splash. Au bout de quelques semaines et après plusieurs pluies, le sol se tasse et l'aération se réduit. Le taux d'humidité augmente dans les

horizons supérieurs, ce qui réduit les infiltrations au profit des ruissellements. Mais ce temps suffit pour que la litière se renforce avec tout ce que cela implique.

Sous plantation en taillis, la litière bien qu'ayant acquis un taux de couverture et une épaisseur relativement importants, n'a pas encore les propriétés telle l'hydrophobicité pour occasionner des ruissellements abondants. Par conséquent, le coefficient de ruissellement y est légèrement inférieur à celui enregistré sous vieille plantation d'eucalyptus. Mais le site enregistre quand même une faible érosion mécanique.

Sur sites de savanes, les sols filtrent mieux que les sols sous plantation d'eucalyptus. Les taux de ruissellement sont très faibles voire nuls, quel que soit le type de pente considéré. En effet, en raison de la texture sablonneuse des sols et de l'activité des méso faunes (termites, vers de terre, fourmis et autres insectes), le sol ici est ouvert (65% d'ouverture). Mais, en dépit de leurs faibles volumes, les ruissellements engendrent quand même une érosion mécanique non négligeable (2,51t/ha/an). Celle-ci s'explique, d'une part, par le taux de couverture assez faible (15%) qui expose le sol aux effets du splash et, d'autre part, par l'activité de la méso faune qui remonte des particules du sol à la surface et les met à la disposition de moindres ruissellements.

En revanche, sur sites complètement nus comme les pistes et les coupe-feux, les taux de ruissellements et les pertes en terre sont plus importants et illustrent bien l'importance des états de surface.

Ainsi, sur pistes, en raison d'un taux important de fermeture du sol lié au compactage ou tassement provoqué par les passages répétés des engins, des véhicules et des hommes, les ruissellements sont très abondants et instantanés. Le taux de ruissellement atteint 75% et engendre une érosion intense qui augmente avec la valeur de la pente. Avec des pertes en terre qui avoisinent 5 t/ha sur pentes de plus de 15%, c'est la plus grande érosion mécanique enregistrée au cours de cette étude. Elle peut atteindre 8t/ha sur les pentes de 25%. La texture du sol marquée par la prédominance des sables et la faiblesse du taux de liants (argile), d'une part et le caractère nu de ce type de site, d'autre part, sont les principaux paramètres qui expliquent l'abondance de l'érosion mécanique. Sur les coupe- feux, la dynamique de ruissellement et d'infiltration est influencée par la pratique annuelle du labour aux disques qui, le plus souvent, favorise l'infiltration au détriment du ruissellement. Mais, cette situation est transitoire et ne se manifeste qu'en début de la saison des pluies, car, après plusieurs pluies, le

sol se tasse et le même comportement hydrodynamique que les pistes, avec les mêmes effets sur l'érosion mécanique.

En somme, ces résultats montrent que les états de surface et la pente sont les principaux facteurs de l'érosion. Les états de surface à travers le degré de fermeture et de couverture du sol jouent un rôle important dans la genèse des ruissellements sous plantation et sur pistes. La pente des versants confère un caractère agressif aux eaux de ruissellement.

Ainsi, si les plantations d'eucalyptus engendrent des ruissellements plus ou moins abondants, en fonction de la maturité de la litière et donc du taux important de couverture, les pistes et les coupe-feux constituent par leur état nu les sites les plus sensibles de la zone d'étude. En effet, non seulement ces sites sont eux-mêmes favorables aux ruissellements, à cause du taux de fermeture du sol, elles constituent l'exutoire des ruissellements issus des plantations d'eucalyptus. Cette importante concentration des eaux de pluie engendre ici les phénomènes de ravinement les plus spectaculaires et les plus préoccupants. La solution à cette dégradation passe par la réduction des ruissellements en provenance des plantations d'eucalyptus aussi bien que de ceux générés par les pistes et coupe-feux eux-mêmes. C'est l'esprit principal des suggestions formulées dans le dernier chapitre de cette partie

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale

Au terme de cette étude, il convient de rappeler les principaux résultats obtenus avant de dégager quelques perspectives. En entreprenant ce travail, nous nous sommes fixés comme objectif principal l'étude de la dynamique érosive au sein et à la périphérie des plantations d'eucalyptus qui s'étendent progressivement depuis plusieurs décennies sur les plateaux côtiers du Congo, autour de Pointe-Noire, au détriment des savanes originelles. Nous avons voulu vérifier notre hypothèse principale selon laquelle ces plantations d'eucalyptus généraient des ruissellements responsables d'une dynamisation de l'érosion sur ces plateaux relativement stables ; cette hypothèse s'appuyait sur des observations de terrain. A la lumière des résultats obtenus, nous sommes à mesure de confirmer que cet objectif a été atteint.

En effet, basée sur d'une part, des mesures des ruissellements et des pertes en terre, effectuées sur des petites parcelles de 1m² sous pluie simulée et sur des parcelles de 90 m² sous pluies naturelles et, d'autre part l'analyse des états de surface (taux de couverture, de fermeture, d'ouverture du sol ...), ce travail nous a permis non seulement de quantifier cette érosion mais de comprendre les processus et les facteurs de sa dynamique.

Ainsi, les observations et les mesures de terrain, l'étude de la littérature existante et du cadre général, notamment des caractéristiques physiques des unités topographiques et mécaniques des formations pédologiques, permet de mettre en évidence que ce vaste programme d'afforestation se déroule dans un cadre naturellement très sensible aux problèmes d'érosion.

Cette sensibilité est liée à plusieurs facteurs naturels dont entre autres, la présence des pentes relativement fortes pouvant atteindre et dépasser 20% sur les bordures d'un plateau peu accidenté; un climat dont les indices de Fournier, Wischmeier et Smith montrent bien l'agressivité ; des roches sableuses donc meubles et très fragiles avec moins de 7% d'argile et limon et un faible taux de matière organique.

Cette sensibilité est aujourd'hui accentuée par cette activité de sylviculture.

En effet, les enseignements suivants peuvent être tirés à la lumière des résultats obtenus sur la quantification des ruissellements et des pertes en terre.

Les plantations d'eucalyptus, quelle que soit l'échelle de mesure considérée, qu'elles soient brûlées ou non, en vieillissant, produisent beaucoup de ruissellement. Le coefficient de ruissellement atteint 40% ; ceci en raison de la litière qui en fonction de sa maturité s'épaissit, se densifie et acquiert des caractéristiques telle que l'hydrophobicité qui jouent en faveur du ruissellement au détriment des infiltrations.

Malgré, le taux important du ruissellement enregistré, les pertes en terre sont très faibles voire nulles. Ceci montre clairement que la litière constitue un facteur à la fois accélérateur du ruissellement et protecteur du sol contre l'effet splash des gouttes des pluies. Plus les plantations sont vieilles, plus la litière est épaisse et plus son action est négative vis-à-vis des ruissellements et très efficace contre les pertes en terre.

A cet effet, **les jeunes plantations d'eucalyptus**, brûlées ou non, ont une litière moins importante sous laquelle les sols demeurent ouverts, ce qui augmente les infiltrations au détriment des ruissellements qui par conséquent sont moins importants que sous vieilles plantations. Ces ruissellements, bien que modestes génèrent une érosion mécanique à cause de la faiblesse du taux de couverture du sol.

Les savanes originelles brûlées ou non, ont des taux de ruissellement très faibles voire nuls quel que soit le type de pente et l'échelle de mesure considérés. Les sols y sont ouverts et très filtrants malgré l'encroûtement causé par l'action du feu. Mais les pertes en terre sont non négligeables et dépendent du taux de couverture du sol très lâche qui protège mal ce dernier.

Le croisement entre les variables explicatives de l'érosion (densité apparente, analyses granulométriques, états de surface) et les variables à expliquer (ruissellement et érosion) ne s'est pas avéré significatif à cause vraisemblablement de la grande variabilité observée. Toutefois, une corrélation significative entre le taux de ruissellement, la densité apparente, la texture et le degré de fermeture du sol a été observée sous jeune plantation d'eucalyptus.

Sur pistes et coupe-feux, les ruissellements sont abondants et instantanés, ils dépendent en grande partie des états de surface du sol (compactage ou tassement et dénudation du sol). Ici le ruissellement et l'érosion mécanique augmentent avec le gradient de la pente. Les pistes et coupe-feux sont des nids de ravinements importants, qui se manifestent par des rigoles et

ravines plus ou moins profondes et dont la dynamique actuelle est en relation avec les ruissellements qui proviennent des plantations.

Ces pistes et coupe-feux, sont des facteurs anthropiques qui favorisent les ruissellements et l'érosion mécanique. Par conséquent, les résultats trouvés sur ces sites viennent vérifier et confirmer la deuxième hypothèse qui stipule que «**Les activités anthropiques liées à cette sylviculture intensive à travers l'itinéraire sylvicole sont aussi des facteurs qui accélèrent les ruissellements**»

Tous ces résultats obtenus sur le terrain et les observations ont valeur de comparaison entre les différents sites. Ils permettent de connaître quel site produit plus de ruissellement ou de l'érosion que l'autre. La méthode par simulation de pluies est plus rapide et très facile à réaliser. Elle convient bien à cette préoccupation. En effet, la méthode de la simulation de pluie qui a donné des résultats similaires aux données obtenues sur les stations expérimentales peut être utilisée de façon plus générale, plus facile à mettre en œuvre et moins coûteuse, elle peut permettre d'approcher les mécanismes d'érosion sous boisements plus facilement.

Cependant, les résultats obtenus bien qu'assez représentatifs ne peuvent être généralisés sur l'ensemble des plateaux côtiers colonisés par ces massifs forestiers. Le nombre limité de parcelles d'érosion utilisées, faute de moyens financiers et l'échelle des dites parcelles ne peuvent permettre une généralisation des résultats dans le but d'établir une carte non seulement de l'érosion mais aussi des risques d'érosion sur l'ensemble du massif forestier.

Perspectives

Ce travail de thèse mené dans un contexte d'afforestation constitue, une première étude et ouvre, à cet effet, de nombreuses perspectives scientifiques à court ou plus long terme, à la fois d'un point de vue fondamental ou appliqué.

A court terme, il apparaît clairement que l'érosion constitue un danger pour la survie de cette exploitation industrielle et qu'une étude sur les méthodes antiérosives permettant d'empêcher à long terme une dégradation généralisée des massifs s'impose. Elle aura pour objectif principal de sélectionner les méthodes antiérosives dont l'efficacité sera testée au préalable.

A long terme, il serait également intéressant d'étudier la dynamique du phénomène d'hydrophobicité des sols sableux sous plantation d'eucalyptus ou la teneur en matière organique est importante. En effet, nos mesures montrent que ce phénomène constitue un facteur explicatif des ruissellements sous plantations.

En sus, cette étude mérite d'être complétée par une étude plus longue menée sous bassins versants en multipliant le nombre des parcelles d'érosion sur le plateau côtier. Cette démarche aurait l'avantage d'être plus représentative en intégrant une grande variété des facteurs qui sont souvent difficiles à appréhender sur des mini-parcelles de 1m^2 et sur des parcelles de 90 m^2 .

Le manque de données sur les caractéristiques des pluies (durée et intensité) pendant notre étude a rendu complexe l'analyse et l'interprétation du ruissellement et de l'érosion sous pluie naturelle. Par conséquent, une étude plus fine des pluies qui tombent dans la zone devrait être menée. Elle aura pour objectif, entre autres, la constitution d'une base de données.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Abdelkader El Garouani., Abdelaziz Merzouk Raouf Jabrane., Mohamed Rached Boussema., (2005)** : Analyse spatiale de l'érosion en nappe et de l'infiltrabilité des sols dans le pré-rif marocain. Télédétection, Vol. 5, n° (1-2-3), pp. 69-80.
2. **Ahiokpor D., (2011)** : Impact de l'occupation des sols sur l'érosion hydrique dans le bassin versant du Lac Togo. Diplôme de Master international, Faculté des Sciences, Université de Lomé, 143 p.
3. **Alkarkouri J., Roose E., Laouina A., Sabir M., (2000)** : Etat de surface, infiltration et risque d'érosion dans la vallée de Beni Boufrah. Bulletin du Réseau Erosion, n° 20. pp. 342-356.
4. **Anthony Young., (1995)** : L'agroforesterie pour la conservation du sol, centre international pour la recherche en agroforesterie, ICRAF, Vane Ruys-Bruxelles, 189 p.
5. **Arabi M., Roose E., (1989)** : Influence de quatre systèmes de production méditerranéenne en moyenne montagne algérienne. Bulletin Réseau Erosion 9 : pp. 39 51.
6. **Asseline J., Valentin C., (1978)** : Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM XV 4, pp. 321-349.
7. **Atlas Jeune Afrique de la République du Congo., (2001)** : Edition Jeune .Afrique. Paris, pp 12, pp.14-16.
8. **Auger B., Kao C., Ledun J., Chaumond C., Nedelec Y., (2005)** : Le ruissellement sur des sols drainés : identification des mécanismes de genèse. Ingénieries n°-43, pp. 3-18.
9. **Babet V., (1928)** : Sur les roches cristallophylliennes du Mayombe (Afrique-Equatoriale française). C.R. Acad. Sci. Paris, 187, pp. 348-350.

- 10. Boli BZ., Roose E., Bep A Ziem B., Waechetler F., (1996) :** Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux sableux tropical. Cahiers ORSTOM, Pédol. Vol. 28, N° 2, pp. 309-325.
- 11. Barthes De Noni G ., Roose E ., Asseline J ., Albrecht A ., Viennot M., (1998) :** Influence du travail du sol et des apports sur le ruissellement et l'érosion : le cas des Rougiers de Camares dans le sud- Avignon. ORSTOM actualités, Spécial érosion, pp. 56 :31.
- 12. Batchy A., (2004) :** Etude géomorphologique du littoral Congolais. Approche méthodologique. Mémoire de DEA de géographie, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, 103 p.
- 13. Batti A., Depraetere C., (2007):** Overview of methods for modelling erosion in island settings, 26 p.
- 14. Bertaux P., (2001) :** Note technique fertilisation "urophylla x grandis". Synthèse des résultats disponibles et éléments de décision. Note interne ECO sa, Pointe-Noire, 18 p.
- 15. Bikouta B., (2011) :** Implication des populations locales dans la gestion durable du massif d'eucalyptus du Kouilou (Congo), thèse de doctorat, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Université Marien Ngouabi, 325 p.
- 16. Bocquier G., Boissezon P., (1959) :** Note relative à quelques observations pédologiques effectuées sur le plateau Batéké (Région du Pool, République du Congo), ORSTOM, Brazzaville, 19 p. Ronéo.
- 17. Boli B Z., Roose E., Bep A Ziem B., Sanon K., Waechter F., (1993) :** Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux, Cah. ORSTOM, Sér. Pédol, Vol .XXVIII, n°2 : pp.309-325
- 18. Bolline A., 1982 :** Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en Moyenne Belgique.- Liège : Thèse Université, 380 p.

- 19. Boureghda S., (1988) :** Influence des caractéristiques physiques (texture, état de surface) de divers sols à végétation naturelle ou cultivés sur leur susceptibilité au ruissellement et à l'érosion. Etude expérimentale au champ sous pluies simulées. Orléans : Thèse, Université d'Orléans, 251 p.
- 20. Bouvet J.M., (1999) :** Les plantations d'eucalyptus. Evolutions récentes et perspectives. *Le Flamboyant*, 49, pp.4-14.
- 21. Bradford J., Huang C., (1992):** Mechanisms of crust formation: physical components. (Lewis Publishing éd.). Ann Arbor, Mich.: M. Summer, B. Stewart. pp. pp.55–72.
- 22. Bradford J.M., Blanchar R.W., (1999):** Mineralogy and water quality parameters in rill erosion of clay-sand mixtures, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 63, no. 5, pp. 1300-1307.
- 23. Bryan R., Poesen J., (1989):** Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. *Earth Surface Processes and Landforms* 14(3), pp. 211–231.
- 24. Bryan R.B., (1979):** The influence of slope angle on soil entrainment by sheet wash and rain splash. *Earth Surface Processes and Landforms*, n° 4, pp.43-58.
- 25. Cahen D., Mortelmans G., (1973) :** Un site tshitolien sur le plateau des Batékés (Rép. du Zaïre), Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, Belgique, Ann., Sér. in 8°, Sci. Hum., n°81, 48 p.
- 26. Caratini C., Giresse P., (1990) :** Approche palynologique des environnements continentaux et marins du Congo à la fin du quaternaire. In paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique. Editions de l'ORSTOM, pp.221-223.
- 27. Castro N., Auzet V., Silveira A., Chevallier P., (NON DATE) :** Dynamique de l'infiltrabilité de sols ferrallitiques cultivés sur le plateau basaltique au sud du Brésil, Scientifique registration n°734, Symposium n° :2 ; Présentation poste 7 p.

- 28. Chaplot V., Le Bissonais Y., (2000):** Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Land forms*, n° 25, pp. 145-153.
- 29. Cheggour A., (2008) :** Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi- aride et spatialisation par des S.I.G. : Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc, Thèse de doctorat, Université CADI AYYAD Faculté des Sciences Semilalia Marrakech, Maroc, 231 p.
- 30. Cheggour A., Simonneaux V., Asma S., Yaro Y., Sadik E., Sabir M., Roose E., (2008) :** Recherche d'indicateurs de ruissellement et des risques d'érosion au moyen de tests d'infiltrométrie dans le bassin versant du Rhéraya (haut-atlas occidental, Maroc), *Revue des Sciences de l'Eau* 21(2) xxx-xxx.
- 31. Cosandey CL., Boudjemline D., Roose E.J., Lelong F., (1990) :** Etude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont Lozère (France). *Z. Geomorphology*, NF, 39, 1 : pp. 61-73.
- 32. Cusset G., (1989) :** La flore et la végétation du Mayombe congolais état des connaissances in Sénéchal J ; Kabala M ; Fournier F ; *Revue des connaissances sur le Mayombe*, UNESCO, PNUD, pp.103-136.
- 33. Damman G., (2001) :** Etude et modélisation du fonctionnement hydrique de plantations D'eucalyptus au Congo. DAA 'Physique des surfaces naturelles et génie hydrologique, ENSA Rennes, 45 p.
- 34. Dannunzio R., (2008) :** Etude de la dynamique de la matière organique sous plantation clonale d'Eucalyptus au Congo. Thèse Doct de l'ENGREF/Agro Paris Tech. Paris Nancy, 219 p.
- 35. Decaillau B., (2011) :** Interaction-Tectonique – Erosion - Sédimentation. Paris, Vuibert, 287 p.

- 36. Delusca K., (1998) :** Estimation de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'Équation Universelle de Perte de Sol assistée d'un Système d'Information Géographique : Le cas du bassin versant de la ravine balan, Haïti. Thèse de doctorat, Faculté des Études Supérieures et de la Recherche, Université de Moncton, Canada, 122 p.
- 37. Deploey J., Savat J., Moeyersons J., (1976):** Differential impact of some soil loss factors on flow, runoff creep and rainwash. *Earth Surface Processes and Landforms* 1(2), pp. 151–161.
- 38. Descoings B., (1975):** Les grandes regions naturelles du Congo. Ed Candallea, pp. 31 66.
- 39. Descroix L., (1989):** La mesure de l'érosion actuelle dans les terres noires des Préalpes du Sud; recherches sur petites parcelles expérimentales, Bull. Lab. Rhodanien de Géomorphologie, Lyon, pp.11-29.
- 40. Devigne J.P., (1959) :** Le précambrien du Gabon occidental en Afrique Equatoriale Française et régions limitrophes. Bull de la Direction des mines et de la géologie. Fasc n°11.
- 41. Djorovic M., (1980):** Slope effect on runoff and erosion, M. De Boodt and D. Gabriels. pp. 215–225.
- 42. Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D., (1998):** Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone *Eucalyptus* and pine forests, Portugal. *Soil Science*, 163 (4), pp.313-324.
- 43. Dowsett R J., Lemaire F., (1991):** The vegetation of Kouilou Bassin. In flore et faune du Kouilou et leur exploitation. Ed. Touraco Research Rapport, 4, pp.189-229.
- 44. El Garouani A., Merzouk A., Jabrane R., Boussema M.R., (2005) :** Analyse spatiale de l'érosion en nappe et de l'infiltrabilité des sols dans le pré-rif marocain. *Téledétection*, Vol 5, n° (1-2-3), pp.69-80.

- 45. Esteves M., Lapetite J.M., (2003):** A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. *Catena*, 50, pp.255-271
- 46. FAO. (2010):** Global Forest resources assessment 2010. Main report. FAO Forestry Paper 163, Rome, pp. 378.
- 47. FAO. (1998):** World reference base for soil resources. World Soil Res. Reports, pp.84-88.
- 48. Fournier F., (1962) :** Carte du danger d'érosion en Afrique au sud du SAHARA (fondé sur l'agressivité climatique et la topographie) CEE/CCTA, Bur. Inter africain des sols, 4 p + carte.
- 49. Fox D M., Bryan R B., Price A. G., (1997):** The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma* 80(1-2), pp. 181–194.
- 50. Gimenez R., Govers G., (2002):** Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of America Journal*, 66:1475–1483.
- 51. Giordano A., (1994) :** L'érosion et la lutte contre l'érosion en forêt méditerranéenne. *Forêt méditerranéenne* t. xv, n° 1, pp.12-21.
- 52. Girault A ., Biang Nzie E ., Zambo D ., Foyen D ., Boli Z., (2000) :** Diagnostic du risque érosif en 1998 à la SOSUCAM à Mbandjock, Cameroun. *Nsan ebanga*, 15 p.
- 53. Godefroy J., Muller M., Roose E.J., (1975) :** Estimation des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de Basse Côte d'Ivoire. *Fruits*, 30, 4: 223-235.
- 54. Govers G., (1985):** Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. *Catena*, 12: 35-40.

- 55. Govers G., Rauws G., (1986):** Transporting capacity of overland flow on plane and irregular beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11: 505-524.
- 56. Groulez J., (1964) :** Introduction d'eucalyptus au Congo Brazzaville, Bois et forêt des tropiques, n°93, pp.1-14.
- 57. Guillobez S., (1990):** Réflexions théoriques du ruissellement et de l'érosion: bases d'un contrôle, application à la détermination des écartements entre dispositifs antiérosifs. Bois et Forêts des Tropiques, n°226 : 37-47.
- 58. Guiton M., (1998) :** Ruissellement et risque majeur: Phénomènes, exemples et gestion spatiale des crues, Etudes et recherches des LPC, EG 13, 315 p.
- 59. Hamel O. et Laclau J.P., (1996) :** Création d'une filière bois-énergie à Pointe-Noire. Ou comment utiliser les résidus d'exploitation en provenance des plantations industrielles d'eucalyptus du Congo. Bois et Forêts des Tropiques, 250, pp. 47-58.
- 60. Henensal P., (1986) :** L'érosion externe des sols par l'eau : Approche quantitative et mécanismes, Rapport de recherche LPC, no. 138, 75 p.
- 61. Henin S., (1977) :** Cours de physique du sol. Vol 2 : L'eau et le sol. Les propriétés mécaniques. La chaleur et le sol. Ed. ORSTOM et EDITEST. Paris, Bruxelles, 219 p.
- 62. Hermeline., (1985) :** Essai écartement Marynen 81-29. Mensurations à 41 mois. Document interne CTFT-Congo, 19 p.
- 63. Horton R., (1933):** Erosional development of streams and their drainage basin: hydrological approach to quantitative morphology. *Géol. Soc. Amer. Bull*; 56, pp. 275-370.
- 64. Hountondji. Y. H., (2008) :** Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la

dégradation du couvert végétal, thèse de doctorat, Université de Liège, Faculté des Sciences, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, 153 p.

65. **Huang C., (1995):** Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas. *Soil Science Society of America Journal*, n° 59, pp. 982-990.
66. **Jamet R., (1975) :** Évolution des principales caractéristiques des sols des reboisements de Pointe-Noire, ORSTOM Brazzaville, service Pédol, 36 p.
67. **Jamet R., Rieffel J. M., (1976) :** Carte pédologique du Congo au 1/200000^e. Feuille Pointe-Noire, feuille Loubomo. Notice explicative, n° 65, ORSTOM éd, 167 p.
68. **Janeau J. L., Bricquet J. P., Planchon O., Valentin C. (2003):** Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *European Journal of Soil Science* 54(3), pp. 543–553.
69. **Jarry F., (1987) :** Le ruissellement sur les terres agricoles - Approche par simulation de pluie et par télédétection, Thèse, Université Paris VII, 276 p.
70. **Kinnell P.I.A., (1990):** Modeling erosion by rain-impacted flow. *Catena suplement*, Cremlingen, n° 17, pp. 55-66.
71. **Kitsoukou A., (1992) :** Etude géomorphologique du littoral ponténégrin (Congo) ; contribution à l'étude des érosions actuelles du rivage. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg1, 297 p.
72. **Koechlin J., (1961) :** La végétation des savanes dans le sud de la république du Congo. Mémoire n°1 ORSTOM, Montpellier, 310 p.
73. **Laclau J.P., (2001) :** Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation d'eucalyptus. Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais ; conséquences pour la gestion des plantations industrielles. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique, Paris-Grignon, 145 p.

- 74. Laclau J.P., Ranger J., Nzila J.D., Bouillet J.P., Gelhaye D., Deleporte P., (2003) :** Eucalyptus et fertilité des sols au Congo, Bois et Forêts des Tropiques, N° 277 (3), pp. 69-84
- 75. Laclau J.P., Toutain .F., Thongo-Mbou A., Arnaud M., Joffre R., Ranger J., (2004):** The function of the superficial Root Mat in the Biogeochemical Cycles of Nutriments in Congolese Eucalyptus Plantations. Annals of Botany 93, pp. 249-261.
- 76. Landais D., (2003) :** Etudes quantitatives et qualitatives du carbone séquestré dans le sol après afforestation au Congo, mémoire de DESS en sciences de l'environnement, Université Louis Pasteur France, 49 p.
- 77. Lavabre J., Martin C., (1997) :** Impact d'un incendie de forêt sur l'hydrologie et l'érosion hydrique d'un bassin versant méditerranéen. I.A.HS. Public. N° 245, pp.39 – 47.
- 78. Lavelle P., (1983):** The soil fauna of tropical savannas. II. The earth worms. In: Tropical Savannas, Bourliereedn, Elsevier, Amsterdam. pp. 485-504.
- 79. Le Bissonnais Y., (2000) :** Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion : la dégradation structurale superficielle et le détachement des particules des sols cultivés Ingénieries – EAT – N° 22– pp. 27 - 36.
- 80. Le Bissonnais Y., Benkhadra H., Gallien E., Eimberck M., Fox D., Martin P., Douyer C., Ligneau L., Ouvry J. F., (1996) :** Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse sur sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m² au bassin versant élémentaire agricole In: Géomorphologie: relief, processus, environnement, vol. 2, n°3. pp. 51-64.
- 81. Lecompte M., Lhenaff R., Marre A., (1996) :** Premier bilan de six années de mesure, l'ablation dans les roubines des Baronnies méridionales. Rev, Géogr. Alpine, n° 2, pp.11-16.

- 82. Logar J.F., (1983) :** La tectonique globale et les bassins ouest-africains. In well evaluation conference : Afrique de l'Ouest, Schlumberger, pp.1-69.
- 83. Loubelo E., (1990) :** Etude comparative de quelques éléments du fonctionnement de deux peuplements d'eucalyptus au Congo. Thèse de l'université de Rennes I.U.F.R Sciences de la vie et de l'environnement, 123 p.
- 84. Loumeto J.J., Huttel C., (1997):** Understory vegetation in fast-growing tree plantations on savanna soils in Congo. *Forestry ecology and management* 99, pp 65-81.
- 85. Makany L., (1963) :** Contribution à l'étude de la végétation côtière du Congo-Brazzaville Thèse de Doct.3^{ème} cycle. Paris VI, 150 p.
- 86. Malvos C., Ranger J., (1983) :** Mission d'appui à l'unité d'Afforestation Industrielle du Congo. Note interne CTFT. Nogent sur Marne, 85 p.
- 87. Mareschal L., Nzila J. D. D., Turpault M. P., Thongo M'bou A., Mazoumbou J. C., Bouillet J. P., Ranger J., Laclau J. P., (2011):** Mineralogical and physico-chemical properties of Ferralic Arenosols derived from unconsolidated Plio-Pleistocenic deposits in the coastal plains of Congo. *Geoderma* 162, pp.159-170.
- 88. Mayima B., (2009) :** Quantification des risques d'érosion hydrique sur les plateaux côtiers autour de Pointe-Noire dans la région du Kouilou selon l'occupation des sols et la pente, D.E.A. Université Marien Ngouabi, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, 72 p.
- 89. Mayima B., Sitou L., Samba-Kimbata., (2010) :** Quantification du ruissellement et de l'érosion hydrique sous les champs d'Eucalyptus des plateaux côtiers du Congo Brazzaville, *Revue de Géographie du Laboratoire de Recherche sur la Dynamique des Milieux Et des Sociétés (LARDYMES)*, Faculté des Lettres et des Sciences humaines, Université de Lomé (Togo), N° 4, pp.137-146.

- 90. Mboukou-Kimbatsa I.M.C., Bernhard-Reversat F., Loumeto J.J., (1998):** Change in soil macro fauna and vegetation when fast- growing trees are planted on savanna soils. *Forest. Ecol. Management.*, 110, pp.1- 12.
- 91. Memento de l’Agronome. (1984) :** La conservation des sols. Mémento de l’ agronome, République française, ministère des relations extérieures coopération et développement, Paris, 36 p.
- 92. Merz R., Blöschl G., Parajka J., (2006):** Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. *Journal of Hydrology*, 331: 591– 604.
- 93. Mietton M., (1980) :** Recherches géomorphologiques au Sud de la Haute Volta. La dynamique actuelle dans la région de Po-Tiebele. Univ. de Grenoble, thèse de doctorat. de 3^{ème} cycle, 233 p.
- 94. Mietton M., (1988) :** Dynamique de l’interface lithosphere-atmosphère au Burkina Faso. L’érosion en zone de savane. Thèse de Doctorat d’état. Université de Grenoble I, 556 p.
- 95. Missie J.P., (1986) :** Etude de la dynamique en milieu tropical humide africain, mémoire de DEA, Université Louis Pasteur, U.F.R. de géographie, Strasbourg I, 83 p.
- 96. Moeyersons J., (1989) :** La nature de l’érosion des versants au Rwanda ; recherches sur la colline de Rwoza (Runyingabutar) et observations dans la partie occidentale du pays, suivies de quelques réflexions sur la lutte antiérosive. Imprimerie Groeningle Kortrijk, 379 p.
- 97. Moeyersons J., (1991) :** La recherche géomorphologique au Rwanda, *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 27, pp.49-68.
- 98. Mohamed Y., Rachid B., Abdellah E., Ali E., Mourad E.A., (2014) :** Modélisation de l’érosion hydrique via les SIG et l’équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l’Oum Er-Rbia. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, Volume 3, pp.83-91.

- 99. Molinier M., (1979) :** La sécheresse de 1978 dans le sud-ouest congolais. In cah. ORSTOM, ser. hydrol., vol. XVI, n°2, pp.77-88.
- 100. Moreno-De Las Helas M., Nicolau J.M., Merino–Martin L., Wilcox B.P.:** Plot scale effects on runoff and erosion along a slope degradation gradient. *Water Resources Research*, 46, W04503, doi: 10.1029/2009WR007875.
- 101. Moukandi-N’kaya G.D ., (2005) :** Paramétrisation de modèles de transferts hydrique dans le sol sous trois plantations d’eucalyptus dans la région de Pointe-Noire, mémoire de DEA, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, 117p.
- 102. Moukandi–N’kaya G.D., (2011) :** Etude hydrogéologique, hydro chimique in situ et modélisation hydrodynamique du système aquifère du bassin sédimentaire de la région de Pointe-Noire, Thèse de doctorat, Université Marien Ngouabi, Faculté des Sciences et Techniques, 142 p.
- 103. Mounirou L.A., (2012) :** Etude du ruissellement et de l’érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahéenne du Burkina Faso : quantification et transposition des données, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 249 p.
- 104. Mpounza M., Samba-Kimbata M.J., (1990) :** Aperçu sur le climat de l’Afrique centrale occidentale. Paysages quaternaires de l’Afrique centrale atlantique, ORSTOM, pp.31-41.
- 105. Neyrinck C., (2011) :** L’impact du paillage et du non labour sur le ruissellement et l’érosion dans les systèmes bananes haricots dans la région du Sud-Kivu. Diplôme d’ingénieur, Faculté biologique, agronomique et environnementale, Université catholique de Louvain, Belgique, 113 p.

- 106. Nizinski J.J., Morand D., Loumeto J.J., Luong-Galat A., Galat G., (2008)**
: Bilan hydrique comparé d'une savane et d'une plantation d'eucalyptus dans le bassin du Kouilou (République du Congo), climatologie, vol 5, pp. 99-112.
- 107. Nouvellon Y., O. Roupsard, L. Saint-Andre, O. Hamel, J. M. Bonnefond, W. Mouvondy, D. Epron, CH. Jourdan, A. Mabilia, L. Moundzeo, R. Joffre, P. Berbigier, M. Irvine, J. P. Laclau, P. Bouillet, H. N'tongo ET J. Dautat. (2001)** : Séquestration de carbone des plantations d'Eucalyptus au Congo. Note interne UR2PI/CIRAD-Forêt, Projet ATP Carbone 13 p.
- 108. Nzila J. D., (1996)** : Principales caractéristiques des sols des reboisements dans la région de Pointe-Noire. Document interne U.R.2P.I, Pointe Noire Congo, 1996, 15 p.
- 109. Nzila J. D., (2001)** : Caractérisation minéralogique des sols ferrallitiques sableux sous plantations d'Eucalyptus et sous savane naturelle de la région de Pointe-Noire. Document interne UR2PI, Pointe Noire Congo, 51 p.
- 110. Ouagga T., (2005)** : Etude de l'effet des modes d'occupation des sols et de l'érosion sur la séquestration du carbone et l'agrégation des sols dans le bassin versant de la RHERAYA (Haut atlas du Maroc). Mémoire de 3^e cycle, école Nationale Forestière d'Ingénieurs, Maroc. 78 p.
- 111. Oyomba E., (1991)** : Autosuffisance alimentaire: Les neuf régions sur la sellette , le Kouilou. In le journal "Aujourd'hui" N°004, Brazzaville, 6 p.
- 112. Pandey. (1997):** Hardwood plantations in the tropics and subtropics. Tropical Forest plantations area 1995. Rapport interne FAO, Rome, 76 p.
- 113. Parsons A. J., Abrahams A. D., Luk S. H., (1991):** Size characteristics of sediment in interrill overland flow on a semi-arid hillslope, southern Arizona. Earth Surface Processes and Landforms, 16: pp.143-152.

- 114. Peyrot B., (1983) :** Interprétation: géomorphologie du littoral et de la façade maritime atlantique de Rép. Pop. du Congo. In Travaux et documents de géographie tropicale; CEGET N°49, pp.75-98.
- 115. Poesen J., (1984):** The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd., n° 49, pp.117- 131.
- 116. Poesen J., Govers G., (1994):** Bodemerosie in Midden- België. Een stand van zaken. Onze Alma Mater, 48 (3): pp.251-267.
- 117. Poore M.E.D., Fries C., (1985) :** Les effets écologiques des eucalyptus. Rome, FAO, Forêts, N° 59, 118 p.
- 118. Ribolzi O., Bariac T., Bresson L., Dupin B., Keoudone K., Phanthavong K., Ri- Chard P., Thiebaut J. P., Silvera N., Soullab B., Valentin. C., Vandervaere J. P., (2004):** Why does infiltration rate increase with slope gradient? Luang Phrabang, Laos.
- 119. Riou G., (1990) :** L'eau et les sols dans les géo systèmes tropicaux. Masson, Paris, 222 p.
- 120. Roose E.J., (1973) :** Dix années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitiques sableux de basse cote d'ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu inter tropical. Thèse de Docteur ingénieur, Fac sciences, Abidjan, n°2, ORSTOM, Abidjan, 125 p.
- 121. Roose E.J., (1974) :** Conséquences hydrologiques des aménagements antiérosifs XIIIe journée. rapp.10, 6 p.
- 122. Roose E.J., Lelong F., (1976) :** Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. Études sur petites parcelles expérimentales de sol, revue de géographie physique et de géologie dynamique, 21, Vol. XVIII, Fasc. 4, pp.365-374.

- 123. Roose E.J., (1977) :** Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Trav. Doc. N°78, ORSTOM, Paris, 108 p.
- 124. Roose E.J., Asseline J., (1978) :** Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopoumé les charges solides et solubles, eaux de ruissellement sur sol nu et diverses d'ananas in Cah. ORSTOM, Sér. Pédol, 16, 1: pp.43-72.
- 125. Roose E.J., (1981) :** Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Collection Travaux et Documents. Paris: ORSTOM, 130 : 587 p.
- 126. Roose E.J., (1994) :** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique n°70, FAO, Rome, 420 p.
- 127. Roose E.J., (1996) :** Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. Bulletin Réseau Erosion 16, pp. 87-97.
- 128. Roose E.J., Smolikowski B., (1997) :** Comparaison de trois techniques de mesure de l'infiltration sur fortes pentes : monocylindre et 2 simulateurs de pluies. Application à un versant de la vallée de Godim au Cap Vert. *Bull Réseau Erosion*. Montpellier: ORSTOM, 17: pp.282-296.
- 129. Roose E., De Noni G., Lamachere J.M., (1998) :** L'érosion à L'ORSTOM : 40 ans de recherches multidisciplinaires. IRD Montpellier (France). *Bul- Réseau Erosion* (France) N° 18 : pp.54-66.
- 130. Roose E., De Noni G., (2004) :** Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique: revue et perspectives. *Sécheresse*, 15(1), pp. 121-129.

- 131. Roose E.J., (2007) :** Evaluation des risques de ruissellement et d'érosion sous les plantations d'eucalyptus dans la région de Pointe Noire (Congo). Compte rendu de la première mission au sud du Congo. UR2PI/CIRAD/CARBOAFRICA., 25 p.
- 132. Rougerie G., (1960) :** Le façonnement actuel des modelés en Côte-d'Ivoire forestière. Mém. I.F.A.N., 58, Dakar, 542 p.
- 133. Rousseva S., Torri D., Pagliai M., (2002):** Effect of rain on the macro porosity at the soil surface, *European Journal of Soil Science*, 53, pp.83-94.
- 134. Sabir M., Barthes B., Roose E., (2004) :** Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc) *Science et changements planétaires / Sécheresse*. Volume 15, Numéro 1, pp.105-110.
- 135. Sadiki A., Bouhlassa S., Auajjar J., Macaire A.F.J.J., (2004) :** Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, n°26, pp. 69-79.
- 136. Safou-Matondo R., Deleporte P., Laclau J.-P., Bouillet J.-P., (2001):** Hybrid and clonal variability of nutrient accumulation and nutrient use efficiency in eucalypt stands in Congo. *In: Proceedings of the Iufro symposium « Developing the eucalypt of the future »*, Valdivia, Chili, pp. 10-15.
- 137. Samba-Kimbata M.J., (1978) :** Le climat du Bas-Congo. Thèse de doctorat 3^e cycle, [Université.de](http://www.univ-dijon.fr) Bourgogne Dijon, 280 p. + figures.

- 138. Samba-Kimbata M.J., (2002) :** Rythme bioclimatique et comportement phénologique de la végétation en république du Congo. Ann. Univ. Marien Ngouabi 3, pp.81-92.
- 139. Saint-André L., A. M’bou-Thongo, A. Mabilia, W. Mouvondy, CH. Jourdan, O. Rousard, PH. Déléporte, O. Hamel and Y. Nouvellon. (2005):** Age-related equations for above and below ground biomass of a Eucalyptus hybrid in Congo. Forest Ecology and Management 204:5: pp. 199 - 214.
- 140. Sauchere., (1995) :** Modélisation spatiale du ruissellement à des fins d’aménagement contre l’érosion de talweg. Application à des petits bassins versants en pays de Caux (Haute Normandie), thèse de Doctorat de l’INAPG, 200p. +annexes.
- 141. Saya A., Mankessi F., Toto M., Marien J N., Monteuis O., (2008):** Advances in mass clonal propagation of Eucalyptus urophylla X E. grandis in Congo. Bois et Forêts des Tropiques.
- 142. Schwartz D., (1991) :** Intérêt de la mesure du ^{13}C des sols en milieu naturel équatorial pour la connaissance des aspects pédologiques et écologiques des relations savanes-forêts. Exemples du Congo. Cahiers de l'ORSTOM 26 : 327- 341.
- 143. Schwartz D., Dechamps R., Elenga H., Lanfranchi R., Mariotti A., Vincens A., (1995) :** Les savanes du Congo: une végétation spécifique de l’Holocène supérieur. In : 2e symposium de palynologie africaine, Tervuren, Belgique. Pub. Occas. CIFEG, 1995/31, Orléans, CIFEG : 99-108.
- 144. Schwartz D., Lanfranchi R., Mariotti A., (1990) :** Origine et évolution des savanes intramayombienne (R.P. du Congo). I. Apports de la pédologie et de la bio géochimie isotopique (^{14}C et ^{13}C). In paysages quaternaires de l’Afrique centrale atlantique. Editions de l’ORSTOM, pp. 314-325.
- 145. Sharma K., Singh H. Pareek O., (1983):** Rainwater infiltration into a bare loamy sand. Hydrological Sciences Journal 28(3), pp. 417–424.

- 146. Simonneaux V., (1996) :** Généralisation d'images satellites classées pour leur intégration à un SIG. In Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographique, ORSTOM, Paris, pp.231-247.
- 147. Sitou L ., Tchicaya J., (1991) :** L'érosion en cirques dans la région côtière du Congo, Bulletin de la Société géographique de Liège, 27, 1991 : pp. 77-91.
- 148. Sitou L ., (1994) :** Les cirques d'érosion dans la région de Pointe-Noire (Congo) : étude géomorphologique. Thèse de Doctorat Unique. ULP, CEREG, Strasbourg, 225 p +annexes.
- 149. Sitou L., Mayima B., (2011) :** Feux de brousse et risques de ruissellement et d'érosion hydrique sous savanes et plantation d'Eucalyptus des plateaux côtiers du Congo Brazzaville, Annales de la Faculté des Arts, Lettres et Sciences Humaines de l'Université de N'Gaoundéré, Vol. XIII, ISSN : 1026-3225 : pp.195- 207.
- 1
- 151. Sitou L., Mayima B., (2015) :** Influence de la litière sur la genèse du ruissellement et de l'érosion hydrique dans les plantations d'eucalyptus des plateaux côtiers du Congo, Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie, N° 26, pp. 126-138.
- 152. Sola G., Mayima B., Levillain J., Deleporte P., Saint Andre L., (2010):** Run-off intensity and carbon and nitrogen losses in run-off water on eucalyptus plantations at Pointe Noire. FAO Rome; N°104, pp.163-175;
- 153. Tchawa P., (1991) :** Dynamique des paysages sur la retombée méridionale des hauts Plateaux de l'Ouest-Cameroun. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux III, 400 p.
- 154. Tchotsoua M., (1994) :** Erosion accélérée et contraintes d'aménagement du site de la ville de Yaoundé au Cameroun. Une contribution à la gestion de l'Environnement urbain tropical humide. Thèse de Doctorat de 3è Cycle, Univ. de Yaoundé I, 296 p.

- 155. Tchotsoua M., (1996) :** Urbanisation et Erosion accélérée dans la ville de Yaoundé : comment améliorer la conservation de l'Environnement urbain en milieu tropical humide. UEPA, Nouvelles imprimeries du Sénégal, Dakar, 131 p.
- 156. Tolale E., Yongue-Fouateu R., Boli Baboule Z., Bilong P., (2008) :** Potentiel et effets des résidus de culture de canne à sucre pour la conservation des sols ferrallitiques d'une exploitation agricole de la région de Mbandjock (sud Cameroun), étude et Gestion des Sols, Paris, Volume 15, 2, pp.113 à 129.
- 157. Tondeur G., (1950) :** Erosion, spécialement au Congo belge. Publ. Min des Colonies, Bruxelles, 3^{ème} édition, 240 p.
- 158. Tricart J., (1961) :** Les caractéristiques fondamentales du système morphogénétique des pays tropicaux humides In: L'information géographique. Volume 25 n°4, pp. 155-169.
- 159. Tricart J., (1974) :** Traité de géomorphologie. Le modelé des régions chaudes: forêts et savanes. 2^{ème} édition. SEDES, Paris, 345 p.
- 160. Trouve C., (1992) :** Apport de la géochimie isotopique (¹³C) à l'étude du renouvellement des matières organiques et des sucres neutres dans les sols tropicaux soumis à des changements d'écosystèmes. Cas des aménagements forestiers sur les savanes de Pointe-Noire au Congo, thèse de doctorat, Université d'Orléans, 112p.
- 161. Van De Giesen N.C., Stomph T.J., De ridder N., (2000):** Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall runoff dynamics in a West African catena landscape. Hydrological Process. , 14: pp. 165–75.
- 162. Vennetier P., (1968) :** Pointe-Noire et la façade maritime du Congo Brazzaville. Mémoire, ORSTOM N°26, 458 p.

- 163. Versini A., (2012) :** Effet de la manipulation de matière organique de surface sur les cycles du C et de N dans les sols en plantation d'Eucalyptus au Congo, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, 222 p.
- 164. Wakponou. A., (2004) :** Dynamique géomorphologique des basses terres soudano - sahéliennes dans l'extrême-nord-Cameroun. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, U.F.R. des Lettres et Sciences Humaines, 240 p.
- 165. Wassmer P., (1981) :** Recherches géomorphologiques et ses conséquences au Rwanda. Étude de l'érosion dans la préfecture de Kibuyé. Univ. Louis-Pasteur, thèse de doctorat 3ème cycle, 153 p.
- 166. Wassmer P., (1984) :** L'érosion et ses variables régulatrices dans un boisement d'eucalyptus, l'exemple du boisement de Josi. Bulletin agricole du Rwanda, N°2, pp. 95-99.
- 167. Wischmeier W.H., Smith D.D., (1960):** A Universal Soil Loss Estimating Equation to Guide Conservation Farm Planning. Proc. HT ISSS. Vol. 1, pp. 418-425.
- 168. Wischmeier WH., Smith DD., (1958):** Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Am Geophys Union* 39: pp.285-91.
- 169. Wischmeier WH., Smith DD., (1978):** Predicting rainfall erosion losses. A guide to Conservation planning. Washington: US Department of Agriculture Handbook, 282: 58 p.
- 170. Yoro G., Godo G., (1990) :** Les méthodes de mesure de la densité apparente: analyse de la dispersion des résultants dans un horizon donné. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol ; vol. XXV, n°4, pp.423-429.

Webographie

Les sites ci-dessous mentionnés nous ont permis de télécharger plusieurs travaux de recherche.

1. <http://www.jle.com/fr/print/e-docs/00/04/00/89/article.md>

2. http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/morfo_1266

5304 1996 num 2 3 885

3. http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003

4010 1959 num 68 368 16024

4. [www.nafa.gov.rw/IMG/PDF/Eucalyptus au Rwanda.pdf](http://www.nafa.gov.rw/IMG/PDF/Eucalyptus%20au%20Rwanda.pdf)

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des plantations d'Eucalyptus de la région de Pointe-Noire et du site expérimental de Kondi	13
Figure 2: Localisation de la zone d'étude.....	31
Figure 3: Grandes unités topographiques de la région côtière du Congo	32
Figure 4: Altitudes des plateaux côtiers	34
Figure 5: Carte de pentes des plateaux côtiers.....	35
Figure 6 : Formations géologiques du bassin côtiers et chaînes prémayombiennes.....	39
Figure 7: Formations pédologiques des plateaux côtiers	41
Figure 8 : Diagramme ombrothermique de la zone d'étude de Pointe-Noire construit selon BIROT (P=4T) correspondant à la période 1983-2013	42
Figure 9 : Variation annuelle de la pluviométrie à Kondi (2004 – 2013).....	43
Figure 10 : Moyennes mensuelles de la pluviométrie à Kondi (2004-2013).....	43
Figure 11 : Corrélacion de la pluviosité annuelle entre Pointe-Noire et Kondi.....	44
Figure 12: Réseau hydrographique sur les plateaux côtiers autour de Pointe-Noire.....	50
Figure 13: Répartition des villages du massif d'eucalyptus du Kouilou	54
Figure 14 : Occupation des sols des plateaux côtiers et leurs environs en 2000.....	61
Figure 15 : Occupation des sols des plateaux côtiers et leurs environs en 2000.....	61
Figure 16 : Vue en 3D d'un type de station expérimentale de mesure d'érosion sous eucalyptus à Kondi.....	82
Figure 17 : les différentes formes géométriques rencontrées sur le terrain.....	91
Figure 18 : Répartition des états de surface.....	98
Figure 19 : Taux des différents états de surface sous site des savanes	102
Figure 20 : Taux des différents états de surface sous sites de jeunes eucalyptus.....	106
Figure 21 : Taux de fermeture et de nudité sur piste.....	108
Figure 22 : Etat de surface sur coupe-feu travaille avant et après.....	109
Figure 23 : Relation entre le ruissellement et la densité apparente du sol.....	111
Figure 24 : Relation entre le ruissellement et le taux de couverture sous jeune eucalyptus...	111

Figure 25 : Relation entre le ruissellement et le taux de fermeture sous jeune eucalyptus....	111
Figure 26 : Relation entre la texture du sol et le ruissellement sous jeune eucalyptus.....	112
Figure 27 : Relation entre l'infiltration et le sable grossier sous jeune eucalyptus.....	113
Figure 28 : Relation entre le ruissellement, limon et argile sous jeune eucalyptus.....	113
Figure 29 : coefficients de ruissellement enregistré dans différents sites.....	116
Figure 30 : Taux d'érosion moyen dans différents sites.....	117
Figure 31 : Coefficient de ruissellement moyen des trois sites dans la zone de Kondi.....	118
Figure 32 : Pluviométrie mensuelle dans la zone de Kondi (2011-2013).....	120
Figure 33 : Configuration actuelle des parcelles d'eucalyptus débouchant sur les cirques d'érosion vers Kondi.....	137
Figure 34 : Dispositif de rétention d'eau de ruissellement le long d'une piste.....	141
Figure 35 : Plantation en courbes de niveau.....	142

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques du sol dans une plantation d'eucalyptus de 6 ans à Kondi.....	40
Tableau II : Pluviosité horaire et semi-horaire annuelle maximale (mm/heure).....	45
Tableau III : Indice annuel de Fournier sur le site de Kondi.....	46
Tableau IV : Variation des paramètres du bilan hydrique d'une savane et d'une plantation d'eucalyptus à Kondi.....	49
Tableau V: Opérations sylvicoles et risques éventuels de ruissellement et de l'érosion hydrique.....	59
Tableau VI: Evolution de la superficie des différentes strates dans les plateaux côtiers de 2000 à 2012.....	62
Tableau VII : Résultats du ruissellement et l'érosion sous vieux eucalyptus	99
Tableau VIII : Résultats du ruissellement et l'érosion sous savanes.....	103
Tableau IX : Résultats du ruissellement et l'érosion sous jeune plantation d'eucalyptus.....	106
Tableau X: Résultats du ruissellement et l'érosion sur piste.....	107
Tableau XI : Résultats du ruissellement et l'érosion sur coupe-feu	110
Tableau XII: influence de l'inclinaison de la pente sur le ruissellement et l'érosion sous eucalyptus vieux et sur piste.....	114
Tableau XIII : l'influence des sites sur le ruissellement.....	118
Tableau XIV : Mesures des différents paramètres en case d'érosion sous pluie naturelle (2011-2013).....	121
Tableau XV : Concentration de matières en suspensions et pertes en terre sous différents sites.....	125
Tableau XVI : Taux d'érosion théorique (t/ha/an) enregistré dans les quatre sites à Kondi..	127
Tableau XVII : Résultats comparatifs à différentes échelles.....	129
Tableau XVIII: Volume du vide et terres perdues par l'érosion dans la zone de Kondi et Kissoko en décembre 2012	135

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Cirque à source à Kondi	36
Photo 2 : Mosaïque forêt naturelle – forêt artificielle – savane sur le plateau côtier.....	51
Photo 3 : Etat de couverture du sol par des gaminés à Kondi.....	52
Photo 4 : Engin utilisé pour labourer le sol.....	57
Photo 5 : Exemple d'une parcelle à Yoka Ngassi localisé sur un versant à pente supérieure à 25% sans méthodes antiérosives particulière	58
Photo 6 : Site expérimental de savane à Loudétia à kondi	.67
Photo 7 : Plantation d'eucalyptus âgée de plus de 10 ans à Kondi	.68
Photo 8 : Branchettes et d'écorces qui enrichissent la litière sur l'hybride PF1-41 à Kondi	69
Photo 9 : Système racinaire superficiel sous litière, clone 1-41 à Kondi	69
Photo 10 : Canopée du clone 1-41 dans la parcelle CIFOR à Kondi	70
Photo 11 : Jeune eucalyptus de 3ans replanté à kondi	71
Photo 12 : Site de taillis 3 ans à Kondi	..72
Photo 13 : Coupe feux à ngouassandji	..73
Photo 14 : Piste de débardage à kondi	73
Photo 15 : Simulateur de pluie installé sur une piste à Kondi	78
Photo 16 : Dispositif de réception des eaux du ruissellement	.. 79
Photo 17 : Construction de la cuve (A)	.83
Photo 18 : Processus de sélection du partiteur de la cuve (A)	84

Photo 19 : Bon partiteur réseau après sélection	85
Photo 20 : Dispositif de mesure de données pluviométriques installées à Kondi par le CIRAD.....	87
Photo 21 : Manifestation d'une rigole sur piste suite aux pluies simulées.....	115
Photo 22 : Réseau dense de la litière et racines d'eucalyptus formant une couche étanche à l'eau à Kondi	123
Photo 23 : Dégradation d'un coupe-feu avant le 21mars 2012	132
Photo 24 : Dégradation rapide de la rigole en ravine à Kissoko suite aux pluies 21 et 22 mars 2012.....	132
Photo 25 et 26 : Dégradation d'une piste et d'un coupe-feu par des ravines à Kondi.....	133
Photo 27 : Ravin en pleine évolution sur la route de Kondi village.....	134
Photo 28 : Nappe de sables et débris de charbon du bois sous jeune plantation d'eucalyptus brulé de 1 an à Kondi	136
Photo 29 : Nappe de colluvions ensevelissant progressivement une jeune plantation d'eucalyptus de 1 an à Kondi.....	136
Photo 30 : Plantation d'eucalyptus sur les bords du cirque dont la paroi bordière très active évoluant par érosion régressive a Kondi.....	138
Photo 31 : Stabilisation latérale d'une piste à Kondi.....	143

ANNEXES

Numéro du relevé : 47	Auteur: MAYIMA
Date: 16 / 09 / 2012	Opérateur: Walmard
Heure:	N° fichier GPS : SPO47
	Xlu : Ylu :

Zone: KONDI	<i>Clone utilisé: 1-41</i>
N° parcelle : R0013B	Pente (%) : 6
Site de Vieux Eucalyptus	Azimut (° Est) : 110

Etat de surface :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
O/F	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
N/C	C	C	C	C	C	C	N	C	C	C	C	C	C	C	C
TH															
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
O/F	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
N/C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	N	C	C	C
TH															

Simulation de pluie:

Débit initial (L/min) : 1,1					Temps d'imbibition (min) : 1				
Ruissellement:									
N°	Temps (min)	Volume (L)	Couleur T, C, F, N	Flottant 0, +, ++	N°	Temps (min)	Volume (L)	Couleur T, C, F, N	Flottant 0, +, ++
1	4,25	1,03	C	+	18	27,4	0,82	C	0
2	5,32	0,95	C	+	19	29,13	0,85	C	0
3	6,5	1,05	C	+	20	30	0,63	C	0
4	7,59	0,95	C	0	24				
5	9,18	1,03	C	0	25				
6	10,38	0,85	C	0	26				
7	12,06	1	C	0	27				
8	13,06	0,97	C	0	28				
9	14,59	1,05	C	0	29				
10	16,24	1	C	0	30				
11	17,47	1	C	0	31				
12	19,19	1,05	C	0	32				
13	20,20	0,96	C	0	33				
14	21,53	0,88	C	0	34				
15	23,3	0,97	C	0	35				
16	24,49	0,91	C	0	36				
17	26,26	0,97	C	0	37				
Débit final (L/min) : 1,14 hauteur					Ruissellement après pluie (L) :0,65				
Pluvio finale haut (mL) : 30					Pluvio finale bas (mL) : 32				

Numéro du relevé : 43	Auteur: MAYIMA
Date: 16 / 09 / 2012	Opérateur: Walmard
Heure: 11h50	N° fichier GPS : SPO43
	Xlu : Ylu :

Site: KONDI	Clone utilisé: 1-41
N° parcelle : R0013B	Pente (%) : 4
Site de Vieux Eucalyptus Brûlés	Azimut (° Est) : 218
:EVB	

Etat de surface :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
O/F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
N/C	N	N	C	N	C	C	C	C	C	C	N	N	C	C	C
TH															
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
O/F	F	F	F	F	F	F	F	F	O	O	F	F	F	F	F
N/C	N	N	C	C	C	C	N	C	C	C	C	C	C	N	N
NTH															

Simulation de pluie:

Débit initial (L/min) :	Temps d'imbibition (min) :
Ruissellement:	

N°	Temps (min)	Volume (L)	Couleur T, C, F, N	Flottant 0, +, ++	N°	Temps (min)	Volume (L)	Couleur T, C, F, N	Flottant 0, +, ++
1	5	0,94	N	+	21				
2	6,55	0,93	N	+	22				
3	8,31	0,96	F	+	23				
4	10,32	0,95	F	+	24				
5	23,09	0,97	F	+	25				
6	15,27	0,97	F	+	26				
7	17,55	0,97	C	+	27				
8	20,18	1	C	+	28				
9	22,39	0,91	C	+	29				
10	25,53	0,96	C	+	30				
11	28,45	1	C	+	31				
12	30	0,05	C	+	32				
13					33				
14					34				
15					35				
16					36				
17					37				

Débit final (L/min) : 1,13hauteur
Pluvio finale haut (mL) : 32

Ruissellement après pluie (L) :
Pluvio finale bas (mL) : 32

Numéro du relevé : 31	Auteur: MAYIMA
Date : 17 / 09 / 2012	Opérateur: Walmard
Heure: 10h50	N° fichier GPS : SPO31
	Xlu : Ylu :

ZONE : KONDI	<i>Clone utilisé :</i>
N° parcelle :	Pente (%) : 5
Site de Savane : S	Azimut (° Est) : 130

Etat de surface :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
O/F	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
N/C	N	C	N	N	N	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
TH	th	th					th	th	th						
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
O/F	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
N/C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
NTH	th							th	th	th	th				

Simulation de pluie:

Débit initial (L/min) :					Temps d'imbibition (min) :				
Ruissellement:									
N°	Temps (min)	Volume (L)	Couleur T, C, F, N	Flottant 0, +, ++	N°	Temps (min)	Volume (L)	Couleur T, C, F, N	Flottant 0, +, ++
1	30	0,4	C	+	21				
2					22				
3					23				
4					24				
5					25				
6					26				
7					27				
8					28				
9					29				
10					30				
11					31				
12					32				
13					33				
14					34				
15					35				
16					36				
17					37				
Débit final (L/min) : 1					Ruissellement après pluie (L) : 5				
Pluvio finale haut (mL) : 47					Pluvio finale bas (mL) : 47				

Numéro du relevé: 32	Auteur: MAYIMA
Date : 17 / 09 / 2012	Opérateur: Walmard
Heure: 13h40	N° fichier GPS : SPO32
	Xlu : Ylu :

Site: KONDI	<i>Clone utilisé :</i>
N° parcelle :	Pente (%) : 14
Site de Savane Brûlée: SB	Azimut (° Est) : 264

Etat de surface :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
O/F	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
N/C	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
TH	th	th	th				th	th	th						
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
O/F	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
N/C	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
NTH	th		th	th				th	th	th	th				

Simulation de pluie:

Débit initial (L/min) : 1,28					Temps d'imbibition (min) :				
Ruissellement:									
N°	Temps (min)	Volume (L)	Couleur T, C, F, N	Flottant 0, +, ++	N°	Temps (min)	Volume (L)	Couleur T, C, F, N	Flottant 0, +, ++
1	30	0,12	F	+	21				
2					22				
3					23				
4					24				
5					25				
6					26				
7					27				
8					28				
9					29				
10					30				
11					31				
12					32				
13					33				
14					34				
15					35				
16					36				
17					37				
Débit final (L/min) : 1,28					Ruissellement après pluie (L) : 0				
Pluvio finale haut (mL) : 35					Pluvio finale bas (mL) : 35				

Fiche de collecte de données brutes sur des parcelles de 90 m² sous pluie

naturelle Parcelle :

Date d'observation : / / 2010 Heure:
Début de pluie : / /2010 Heure:
Fin de pluie : / /2010 Heure: Durée de pluie:
Type de pluie : orageuse averse pluie fine longue
Durée pluie en (Jour) : 1j 2j 3j

Quantification du ruissellement

Hauteur cuve A en Béton | cm
 |cm
 |cm
 | cm
Hauteur cuve B (Fût) | cm
 |cm
 |cm
 |cm

Matières en suspension : homogénéisation (remuer l'eau dans les cuves) et prélever un échantillon de 3 litres d'eau selon les deux cas possibles :

Si B= 0 l'échantillon de 3 litres est prélevé dans la cuve A
Si B est différent de zéro l'échantillon est prélevé dans la cuve B

Terre de fond

Poids des seaux pleins : remplir chaque seau par la terre, puis compléter de l'eau.

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

Observations :

Fiche de collecte de données brutes des états de surface sur des parcelles de 90 m² sous pluie naturelle

Numéro du relevé: 01	Auteur: MAYIMA
Date: 02 / 08 / 2012	Opérateur: Walmard
Heure:	N° fichier GPS : SPO01
	Xlu : S0457920
	Ylu : E01190506

ZONE : KONDI	<i>Clone utilisé: 1-41</i>
N° parcelle :	Pente (%) : 7
Site: Taillis	Azimut (° Est) : 264

Etat de surface :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
O/F	F	F	O	O	O	C	O	F	O	O	F	F	F	F	F
N/C	N	N	N	C	C	N	C	C	C	C	C	C	C	C	C
TH															
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
O/F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
N/C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
TH															
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
O/F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
N/C	C	C	C	C	C	C	C	N	N	N	C	C	C	C	C
TH															
	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
O/F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
N/C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
TH															
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
O/F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
N/C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
TH															
	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
O/F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
N/C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
TH															
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100					
O/F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F					
N/C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C					
TH															

TABLE DES MATIERES

Sommaire	1
Fiche présentative de la thèse	3
Dédicace	.4
Liste des sigles et acronymes	..5
Résumé/ Summary	.6
Avant-propos et remerciement	8
Introduction	11
PREMIERE PARTIE: ORIENTATION ET CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	15
CHAPITRE 1 : ORIENTATION DE L'ETUDE	16
1.1. Contexte, problématique et justification de l'étude	6 1
1. 2. Questions de recherche	7. 1
1.2.1. Question principale	17
1.2.2. Questions secondaires	71
1.3. Objectifs de la recherche	17
1.3.1. Objectif général	71
1.3.2. Objectifs spécifiques	..18
1.4. Hypothèses de recherche	18
1.4.1. Hypothèse principale	..18
1.4.2. Hypothèses secondaires	..18
1.5. Etat de la question	.18
1.6. Intérêt de l'étude et choix de la démarche	4 2
1.7. Clarification des termes utilisés	.25
1.7.1. Eucalyptus	..25
1.7.2. Simulateur de pluie	.26
1.7.3. Parcelle d'érosion	27
1.7.4. Erosion hydrique	27
1.7.5. Ruissellement	.29

CHAPITRE II. UN CADRE PHYSIQUE VULNERABLE.....31

2.1. Situation géographique.....	31
2.2. Un relief de plateaux tabulaires relativement disséqués	32
2.2.1. Une plaine littorale légèrement ondulée.....	33
2.2.2. Des bas plateaux côtiers tabulaires assez disséqués	33
2.3. Des roches sédimentaires fragiles	37
2.4. Des sols très sensibles aux phénomènes d'érosions.....	39
2.5. Un climat agressif.....	41
2.5.1. Une pluviométrie abondante.....	42
2.5.2. Des intensités et des fréquences de pluies assez remarquables.....	44
2.5.3. Indices d'agressivité des pluies	46
2.5.3.1. Indice de Fournier.....	46
2.5.3.2. Indice de Wischmeier et Smith	47
2.6. Un bilan hydrique à surplus hydrologique.....	47
2.7. Une hydrographie dense et dynamique	49
2.8. Une végétation diversifiée.....	50

CHAPITRE III. UN CADRE HUMAIN EN PLEINE MUTATION.....53

3.1. De la démographie.....	53
3.2. Des activités économiques dominées par la sylviculture.....	55
3.2.1. Description des activités de plantation d'eucalyptus.....	56
3.2.1.1. Les opérations de plantation des eucalyptus	56
3.2.1.2. Les opérations d'exploitation des eucalyptus.....	58
3.2.1.3. Les opérations de (re)- plantation des eucalyptus	59
3.2.1.4. Les risques liés aux feux de brousse	60
3.3. L'état de l'occupation du sol en 2000 et 2012.....	60
Conclusion partielle	63

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES D'APPROCHE.....	64
CHAPITRE IV. MATERIEL UTILISE.....	65
4. 1.Caractérisation des sites expérimentaux	65
4 .1.1. Critères de choix des sites	65
4. 1.2.Caractéristiques des sites expérimentaux	66
4.1.2.1. Site de savane.....	67
4.1.2.2. Site de vieille plantation d'eucalyptus non brûlé.....	68
4.1.2.3. Site de jeune plantation d'eucalyptus	70
4.1.2.4. Site d'eucalyptus en taillis.....	71
4.1.2.5. Site de coupe-feu et de piste.....	72
4.2. Instruments de mesures.....	73
CHAPITRE V. APPROCHE METHODOLOGIQUE ADOPTEE.....	75
5.1. Recherche documentaire.....	75
5.2. Travail de terrain.....	75
5.2.1. Détermination et évaluation des variables explicatives de la dynamique érosive.....	75
5.2.1.1. Détermination des pentes des parcelles expérimentales.....	76
5.2.1.2. Evaluation des états de surface.....	76
5.2.2. Approche par simulation de pluie.....	77
5.2.2.1. Simulation de pluie : dispositif et fonctionnement.....	78
5.2.3. Parcelles d'érosion de type Wischmeier : dispositif et fonctionnement.....	81
5.2.3.1. Mesures dans la cuve « A » en ciment.....	85
5.2.3.2. Mesures dans le fut cuve « B ».....	86
5.2.3.3. Mesures des données météorologiques.....	86
5.2.3.4. Quantification du ruissellement et de l'érosion.....	87
5.2.3.5. Application de l'équation de Wischmeier (USLE).....	89
5.2.3.6 Quantification des ravinements.....	91
5.2.4. Détermination de la texture des sols	92
5.2.5. Détermination de la densité apparente (Da).....	94

5.2.6. Détermination des matières en suspension.....	94
5.3. Précision et validité des résultats.....	95
5.4. Traitement statistiques et interprétation des données	..95
Conclusion partielle	..96

TROISIEME PARTIE: RESULTATS, DISCUSSION ET SUGGESTIONS 97

CHAPITREVI. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS SOUS PLUIES SIMULEES .98

6.1. Résultats du ruissellement et de l'érosion sur différents sites	..98
6.1.1. Site de vieilles plantations d'eucalyptus	98
6.1.1.1. Etats de surface des sols	..98
6.1.1.2. Temps d'imbibition	100
6.1.1.3. Coefficient de ruissellement	..100
6.1.1.4. Turbidité et érosion mécanique	.101
6.1.2. Site de savane non brûlée et brûlée	..102
6.1.2.1. Etats de surface	102
6.1.2.2. Temps d'imbibition	102
6.1.2.3. Coefficient de ruissellement	..104
6.1.2.4. Turbidité du ruissellement et érosion mécanique	..104
6.1.3. Site de jeune plantation d'eucalyptus brûlée et non brûlée	..... 6
6.1.3.1. Etats de surface	.105
6.1.3.2. Temps d'imbibition	105
6.1.3.3. Coefficient de ruissellement	..106
6.1.3.4. Turbidité du ruissellement et érosion mécanique	..106
6.1.4. Site de piste	..... 70
6.1.4.1. Etats de surface	.107
6.1.4.2. Temps d'imbibition	108
6.1.4.3. Coefficient du ruissellement	.108
6.1.4.4. Turbidité du ruissellement et érosion mécanique	..... 8
6.1.5. Site de coupe-feux	108
6.1.5.1. Etats de surface	108
6.1.5.2. Temps d'imbibition	110

6.1.5.3. Coefficient de ruissellement	..110
6.1.2. Relation ruissellement, érosion et variables explicatives.....	110
6.1.2.1. Influence de la pente sur le ruissellement et l'érosion	..114
6.2. Résultats du ruissellement et de l'érosion de l'ensemble des sites	116
6 .2.1. Ruissellement	..116
6.2.2. Erosion hydrique	..117
6.3. Variabilité inter –sites et extra-sites du ruissellement	117

CHAPITRE VII. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS SOUS PLUIES NATURELLES

PLUIES NATURELLES	..120
7.1. Précipitations	120
7.2. Résultats du ruissellement et l'érosion sur différents sites	.....1
7.2.1. Ruissellement	..121
7.2.1.1. Site de vieille plantation d'eucalyptus	..122
7.2.1.2. Site de jeune plantation d'eucalyptus en taillis	123
7.2.1.3. Site de jeune plantation d'eucalyptus replanté	..123
7.2.1.4. Site de savane	.....4
7.2.2. Concentration et pertes en terre	125
7.2.2.1. Estimation de l'érosion par équation de Wischmeier	..126
7.2.2.1.1. Limites de l'équation de Wischmeier	127
7.3. Comparaison des résultats à différentes échelles de mesures	..128
7.3.1. Ruissellement	129
7.3.2. Érosion	130

CHAPITRE VIII. L'EROSION HYDRIQUE A L'INTERIEUR ET AUX ABORDS DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS ET METHODES DE LUTTE ANTIEROSIVE...131

8. 1. La dynamique de l'érosion hydrique au tour des plantations d'eucalyptus	131
8.1. 1. Les ravinements	..131
8.1.2. Les ensablements	..135
8.1.3. Les cirques d'érosion	.. 137
8.2. Suggestions sur les méthodes de lutte	..139
8.2.1. Gestion des eaux de ruissellement dans les plantations d'Eucalyptus.....	139

8.2.2. Gestion des eaux de ruissellement sur les pistes et coupe-feux.....	140
8.2.3. Gestion des ruissellements par une meilleure organisation de l'espace : utilisation des courbes de niveau dans l'occupation de l'espace.....	141
8.2.4. Description et analyse de certaines méthodes de lutte contre les ravinements	142
Conclusion partielle.....	144
Conclusion générale et perspectives	147
Conclusion générale.....	148
Perspectives.....	150
Références bibliographiques.....	152
Liste des figures	174
Liste des tableaux.....	177
Liste des photos	179
Annexes.....	182