ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET AGRICULTURE

_____

TECHNIQUES DE CONSERVATION DES SOLS ET DE GESTION INTEGREE DE LA FERTLITÉ EN APPUI AU PROGRAMME DE SECURITE ALIMENTAIRE

_____

GUIDE PRATIQUE DE TERRAIN

Par

Dr Syaka SADIO

AFEN-CONSULT.INC

ELEMENTS DE REFLEXION

Quand on regarde un sol, la première chose que l'on remarque ce sont les constituants solides: des argiles, des sables, des limons, qui résultent essentiellement de l'altération des roches.

« **Claude Cheverry*, Directeur de Recherches, IRD-ORSTOM, Paris** »

La matière organique, c'est à la fois les réserves énergétiques et les substances humiques, la « colle » qui fait le lien entre les minéraux. Quand on l'étudie, on voit qu'elle est en général très ancienne (en moyenne plusieurs centaines d'années), mais ce n'est pas autant un compartiment passif. A l'intérieur de cette matière organique, la moitié a mille ou deux mille ans d'âge moyen, mais il ya aussi des éléments qui se renouvellent très rapidement, issus de la décomposition rapide des résidus végétaux. Ce sont eux qui servent d'aliment à tous les organismes qui vivent dans le sol et qui travaillent ce sol.

« **P. Lavelle*** »

Ces organismes sont donc très importants pour constituer le sol, mélanger ses composantes et faire en sorte qu'il soit de bonne qualité, biologique et physique.

« Françoise Breton* »

Le sol se forme, vieillit et meurt. Alors qu'il met des centaines de milliers d'années pour se former, il lui suffit de quelques années pour disparaître et parfois irréversiblement lorsqu'il est agressé.

« Syaka Sadio »

*: In « La dégradation des sols, ou les sols ne sont pas éternels: La science et les hommes. France culture, 03/09/97 »

PREAMBULE

Depuis la fin des années 80s, les pays d'Afrique Centrale, à l'instar des autres pays de l'Afrique Sub-saharienne, font face à une insécurité alimentaire et une pauvreté grandissante, toutes deux dues au déficit de production et à la baisse des revenus agricole.

La dégradation des sols figure parmi les principales causes de manque de performance du secteur agricole. Elle serait favorisée à la fois par la fragilité et la sensibilité à l'érosion des principaux types de sols, notamment les Sols ferallitiques fortement désaturés et les Sols ferrugineux tropicaux lessivés. Les effets pervers de la dégradation, combinés à la forte acidité et faible fertilité originelles des sols affectent sérieusement la performance des cultures à tel point qu'en l'absence d'une fertilisation adéquate les rendements des cultures restent nettement en-deçà de leur performance.

La dégradation des sols demeure ainsi un défi de taille à relever pour permettre la relance du secteur agricole et le développement d'une agriculture productive durable. Toutefois, même si l'érosion et la baise de la fertilité sont perçues par les acteurs comme une sérieuse menace, les questions de conservation et d'aménagement des sols retiennent très peu l'attention des décideurs et des acteurs et sont souvent occultées dans les stratégies et politiques de développement agricoles. Ainsi, en dépit des nombreux efforts déployés par la FAO pour améliorer la production agricole, les systèmes de production et les pratiques traditionnelles d'utilisation des sols ont très peu évolué.

Conscient de l'urgence dune meilleure prise en compte des questions pédologiques dans la mise en œuvre des programmes nationaux de sécurité alimentaire (PNSA), le Bureau Sous-régional de la FAO pour l'Afrique centrale, dans son rôle d'assistance à ses pays membres en matière de développement agricole, a commandité en 2007 (Juin-Novembre) une étude d'analyse-diagnostic de la problématique d'utilisation des sols et de gestion durable de la fertilité des sols dans les trois pays du centre du Bassin du Congo (Gabon, Congo et la République Démocratique du Congo). Les résultats et conclusions de cette étude ont permis de formuler un projet pilote visant à renforcer les capacités des acteurs et de démontrer des technologies appropriées en matière de conservation des sols et de gestion intégrée de la fertilité.

Du fait de ces faibles capacités institutionnelles et techniques dans les pays en matière de connaissance et d'aménagement des sols, il a été jugé indispensable d'accompagner la mise en œuvre du projet par un guide pratique de terrain à l'intention des agents d'encadrement et de vulgarisation des services techniciens agricoles et d'autres acteurs, notamment ONGs.

Le présent guide donne des notions de base sur la pédologie et les sols, les techniques de lutte contre l'érosion et de gestion de la fertilité. Il complète le processus d'appui à la mise en œuvre des programmes nationaux de sécurité alimentaires.

SOMMAIRE

	Pages
Introduction	11
CHAPITRE 1: CONSIDERATIONS GENERALES	13
1.1. Situation géographique	13
1.2. Climat et zones agro-écologiques	13
1.3. Réseau hydrographique	15
1.4. Unités morpho-pédologiques et principaux types de sols	15
1.5. Systèmes de production	18
CHAPITRE 2: PROBLÉMATIQUE D'UTILISATION DURABLE DES RESSOURCES EN SOLS	20
2.1. Connaissance des sols	20
2.2. Dégradation des sols	20
CHAPITRE 3: NOTION DE BASE SUR LA PÉDOLOGIE ET LES SOLS	23
3.1. Pédologie	23
3.2. Notion de sol et pédogénèse	23
3.3. Profil et horizons pédologiques	24
3.4. Types de matière organiques ou humus	26
3.5. Propriétés physiques	27
3.6. Propriétés chimiques	33
3.7. Classification	37
CHAPITRE 4 : EVALUATION DES SOLS ET CHOIX DES SITES	40
4.1. Principes spécifiques	40
4.2. Buts de l'évaluation des terres	40
4.3. Études nécessaires	40
4.4. Approche méthodologique	40
4.5. Classes des aptitudes	45
4.6. Cartographie	46
CHAPITRE 5: CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS	47
5.1. Principes directeurs	47
5.1. Notion de base	49
5.2. Mesures préventives	51
5.3. Préparation du sol	52
5.4. Ouvrages antiérosifs	54
CHAPITRE 6: FERTILISATION DES CULTURES	56
6.1. Notion de fertilité du sol	56
6.2. Besoins des cultures en éléments nutritifs	57
6.2. Objectifs de la fertilisation	58
6.3. Amendement des sols	59
6.4. Fertilisation des cultures	60

6.5. Systèmes intégrés agriculture-élevage 63

6.4. Façons culturales 63

CHAPITRE 7 : TECHNIQUES AGROFORESTIÈRES 65
7.1. Objectifs 65

7.2. Amélioration de jachères traditionnelles 65

7.3. Le parc agroforestier 65
7.4. Les cultures en couloirs 66
7.5. Cultures sur friches de plantations forestières 66

CHAPITRE 8 : VALORISATION DE LA MATIERE ORGANIQUE 68
8.1. Source de matière première 68
8.2. Conditions de compostage 68
8.3. Description du procédé 68
8.4. Les différentes méthodes de compostage 69

TABLEAUX

Pages

Tableau 1. Taux d'érosion pluviale en fonction du type de végétation à Lubumbashi. 21

Tableau 2. Épaisseur de sol décapé par l'érosion sur sol sableux dans la région de Kinshasa 21

Tableau 3 : Termes de caractérisation de la structure du sol 27

Tableau 4: Corrélation entre la texture du matériau sol et sa vitesse d'infiltration 29

Tableau 5a: Caractérisation et valeurs de pH, ainsi que les couleurs correspondantes de papier pH servant à la mesure du pH sur le terrain. 33

Tableau 5b : pH optimum pour les différentes cultures 33

Tableau 6 : Formes d'acidité du sol 34

Tableau 7: Valeurs de CEC, S et V, en fonction du pH 35

Tableau 8: Limites des classes de salinité des sols 35

Tableau 9: Pertes en terres en fonction du couvert végétal et de la pente du terrain 51

Tableau 10: Taux de matière organique totale, carbone et azote 56

Tableau 11: Classes et proportions des différents éléments nutritifs 58

Tableau 12: Besoins en azote, phosphore et potassium de quelques cultures pratiquées dans les pays. 59

Tableau 13 : Quantités (tonnes/hectares) de chaux à appliquer par hectare pour les différents sols 61

Tableau 14 : Formules théoriques préconisées par SENAFIC pour les différentes cultures en RDC 9Sur la base des résultats des expériences du PNE, FAO, 1972-1992) 64

Tableau 15 : Différentes phases et agents de transformation du compost 70

FIGURES

	Pages
Figure 1a: Profil pédologique et succession des différents horizons	26
Figure 1b: Profil d'un sol ferrugineux profond	26
Figure 1c : Profil d'un sol peu évolué superficiel : présence de racines, Macroporosité et bloc de roche-mère	26
Figure 2: Cycle de la matière organique dans les conditions naturelles	27
Figure 3a: Diagramme de texture (Source: USDA, 1962) D'une particule (argiles < 0,002mm; limons = 0,002-0,05mm, sables = 0,05-2mm)	28
Figure 3b : Histogramme montrant la distribution des Chaque côté du triangle représente le pourcentage des particules (en microns).	28
Figure 3b : Histogramme montrant la distribution des particules (en microns).	28
Figure 4. : Complexes argilo-humiques	34
Figure 5 : Structure de la classification des aptitudes	44
Figure 6: Exemple d'une carte d'aptitude. On différencie 6 unités : Unité 1, Unité 2, Unité 3, Unité 4, Unité 5 et Unité 6	45
Figure 7 : Bilan hydrique : cas de végétation pérenne à ruissellement faible (KR = 1-5%) et en cas de culture à fort ruissellement (KR = 20-40%)	49
Figure 8 : Représentation de la pluviométrie et de l'infiltration	50
Figure 9 : Simulation de pluie et effet sur la dégradation des sols	50
Figure 10 : Ruissellement des eaux de pluies le long d'une pente et effet sur l'érosion	50
Figure 11 : Influence du ruissellement sur l'érosion sur un sol travaillé	53
Figure 12: Schéma d'aménagement progressif d'un talus planté (Graminées, légumineuses, arbres). Modèles évolutifs de structures Antiérosives	55

GLOSSAIRE

Capacité de rétention en eau: quantité d'eau retenue par le sol et soit utilisable par les plantes, soit liée à des particules solides par des forces physiques qui empêchent cette utilisation.

Carbonates libres: ce sont des produits alcalins dont le pH est élevé. Ils réagissent avec un acide pour former du dioxide de carbone

Consistance: décrit la facilité avec laquelle on peut désagréger un ped du sol en le comprimant entre le pouce et l'index

Couche arable: terme courant faisant référence à la couche superficielle cultivable du sol

Effervescence: les bulles produites par la libération d'un gaz contenu dans un sol, par exemple le dioxyde de carbone produit par la réaction des carbonates recouvrant les éléments pédologiques lorsque l'on y verse de l'acide chlorhydrique

Fertilisation : La fertilisation est le processus consistant à améliorer la disponibilité en éléments nutritifs d'un sol donné, en apportant les éléments minéraux nécessaires au développement des cultures. Ces éléments peuvent être de deux types, les engrais et les amendements.

Horizon: couche de sol possédant des caractéristiques (couleur, structure, texture et autres propriétés) qui la différencie des autres couches du profil pédologique

Matière organique: toute matière animale ou végétale ajoutée au sol

Ped: agrégat naturel de la structure du sol (granulaire, polyédrique, colonnaire, prismatique ou feuilleté)

Perméabilité: dépend de la structure du sol, c'est sa capacité à laisser passer l'eau vers les couches inférieures.

Porosité: volume total des espaces laissés libres entre les agrégats ou les particules solides. Elle conditionne la circulation de l'eau, des gaz et de certains animaux dans le sol.

Pouvoir absorbant: capacité à fixer des ions et à rendre ainsi plus aisé le passage de ces ions de l'humus aux racines des plantes, notamment par la création de complexes argilo-humiques, aussi appelés complexes absorbants, qui fixent des ions positifs apportés par les engrais. Leur présence dans le sol est un facteur essentiel de sa fertilité.

Profil pédologique : la "face" d'un sol coupé verticalement, montrant les horizons individuels et les propriétés du sol en fonction de la profondeur

Structure: façon dont ses constituants sont agencés les uns par rapport aux autres. Dans un sol brun, on a des agrégats de sable et de complexe argilo-humique qui peuvent être agencés de façon plus ou moins fragmentée.

Texture: composition granulométrique du sol, c'est à dire la proportion de chacun de ses constituants solides (argiles, sables, graviers, etc.), qui ont des tailles différentes.

INTRODUCTION

Les trois pays du centre du Bassin du Congo visés par le Programme de Sécurité Alimentaire de la FAO disposent d'un important potentiel de production agricole estimé à plus de 120[1] millions d'hectares y compris de nombreux cours d'eau et des massifs forestiers très productifs parmi les plus importants de l'Afrique subsaharienne.

Paradoxalement, depuis les années 80s ces pays font face à une faible production agricole résultant à une insécurité alimentaire grandissante associée à une pauvreté devenant de plus en plus préoccupante. Même si l'on constate au cours de ces cinq dernières années une certaine tendance à la reprise de la production agricole avec une contribution du secteur agricole au PIB de près de 59 % en 2003 en RDC et un PIB de 5439 $ par habitant en 2004 au Gabon, la question de la sécurité alimentaire reste entière, comme en témoignent la situation en RDC où près de 63 et 73% de la population, soit plus de 37 millions de personnes, ont été affectés par l'insécurité alimentaire en 2001 et 2002, respectivement (Tollens, 2003). Pour compenser le déficit vivrier, les gouvernements doivent payer de lourds tributs en important des quantités élevées en denrées de première nécessité, notamment le riz, la farine de blé, l'huile d'arachide, etc.

Au-delà des dysfonctionnements institutionnels et du faible niveau des investissements, cette mauvaise situation serait due par une multitude de facteurs, entre autres:

- le faible taux (< 25% des terres arables) de mise en culture des terres et les pratiques traditionnelles itinérantes peu productives. En effet, au Gabon sur un potentiel de 22,8 millions d'hectares de terres cultivables, environ 6 millions seraient sous exploitation principalement sous forme traditionnelle dont seulement 13.000 ha de terres sous-irrigation. Quant à la RDC, les 80 millions d'hectares de terres arables dont 4 millions aptes à l'agriculture irriguée sont très peu exploitées (Muland et al. 2007);
- les systèmes itinérants de production basés sur des apports limités d'intrants et peu d'investissement;
- les outils de travail rudimentaires dont l'utilisation tend à fragiliser davantage la stabilité structurale des sols à l'origine très faible, constituant ainsi une véritable menace pour l'utilisation durable des sols.

Les deux derniers facteurs sont considérés comme représentant les sérieuses menaces et contraintes de la relance de la production agricole dans la mesure elles conduisent dans la majeure partie des cas à des dégradations multiformes des sols. En effet, de part les importantes pertes en terres provoquées par l'érosion hydrique consécutive aux déboisements massifs et à des pratiques culturales inappropriées, les sols perdent progressivement leur fertilité et leur potentiel de production agricole. Même si de manière générale en zones forestières le degré de dégradation reste peu perceptible en raison de l'importance du couvert végétal, les défrichements et pratiques agricoles inadaptées constituent une menace sérieuse pour le maintien de la productivité et l'utilisation durable des sols. En effet, les récentes études (Sadio, 2007a et b) menées au Gabon, RDC et Congo dans le cadre de l'appui aux programmes nationaux de sécurité alimentaire ont révélé partout des manifestations de phénomènes d'érosion.

En dépit de la prise de conscience de la part des décideurs et des services techniques quant aux menaces de la dégradation sur la production agricole et des nombreux efforts déployés par la FAO pour améliorer la situation, les systèmes de production et les pratiques traditionnelles d'utilisation des sols ont très peu évolué. Au niveau de la gestion de la fertilité, les pratiques sont basées sur l'exploitation des éléments minéraux issus des cendres des brûlis forestiers avec quelques apports limités de fumure organique d'origine animale (bovins, ovins et caprins) ou de compost. Même si la matière organique paraît à prime abord la solution idéale et à portée de mains des paysans pour corriger la fertilité des sols, son utilisation reste confrontée à sa

[1]: RDC: 80 millions de terres arables; Gabon: 22,8 millions et Congo: 17,2 millions de terres arables.

mauvaise qualité (car elle est utilisées souvent à l'état brut) et à son application à de fortes doses nécessaires pour relever le pH. En effet, pour produire 2-5 tonnes de compost (quantités nécessaires pour amender un hectare), le paysan doit collecter et composter 8-10 tonnes de biomasse végétale. En outre, du fait de manque de moyen adéquat de transport, le paysan doit transporter toute cette quantité par des moyens de fortune (charrette, vélo, etc.) pour la faire composter à la maison pendant 2-3 mois dans les fosses compostières, avec toutes les contraintes d'entretien et de conditionnement que cela impose..

Ainsi, la dégradation des sols demeure un défi de taille à relever pour permettre la relance du secteur agricole et le développement d'une agriculture productive durable. A cet effet, il convient de noter que sans la prise en compte effective et la maîtrise des facteurs pédologiques, il sera très difficile, voir impossible, d'atteindre les résultats et les objectifs visés par les politiques agricoles et les différents programmes ou projets nationaux initiés par les différents gouvernements des pays.

Tout ceci atteste de l'urgence dune meilleure prise en compte des questions pédologiques et de la mise à la disposition des services techniques chargés de l'encadrement des producteurs des outils méthodologiques dans la mise en œuvre des programmes de développement agricole. Ainsi, le Bureau Sous-régional de la FAO pour l'Afrique centrale, dans son rôle d'assistance à ses pays membres en matière de développement agricole, a commandité en 2007 (Juin-Novembre) une étude d'analyse-diagnostic de la problématique d'utilisation des sols et de gestion durable de la fertilité des sols dans les trois pays du centre du Bassin du Congo (Gabon, Congo et la République Démocratique du Congo). Les résultats et conclusions de cette étude ont permis de formuler un projet pilote visant à renforcer les capacités des acteurs et de démontrer des technologies appropriées en matière de conservation des sols et de gestion intégrée de la fertilité. Du fait des faibles capacités institutionnelles et des connaissances très limitées des agents d'encadrement et vulgarisation agricole des différents pays en matière de connaissance et d'aménagement des sols, il a été jugé indispensable d'accompagner la mise en œuvre du projet par un guide pratique de terrain à l'intention des agents d'encadrement et de vulgarisation des services techniciens agricoles et d'autres acteurs, notamment ONGs.

Le présent guide s'inscrit donc en droite ligne de l'assistance de la FAO en matière de développement agricole et de sécurité alimentaire. Il a pour objectif de renforcer les capacités techniques et opérationnelles des acteurs par une meilleure connaissance des sols et une maîtrise des techniques/méthodes de gestion des sols. Il est attendu que ce guide servira de référence dans la mise en œuvre dans la mise en œuvre des programmes nationaux de sécurité alimentaire (PNSA) pour accompagner les producteurs dans l'utilisation et l'aménagement des sols.

Il comprend 9 chapitres, présentant une synthèse de la situation actuelle, la problématique de gestion des sols et les différentes techniques à mettre en œuvre. Il vise à donner aux agents les notions et capacités nécessaires devant leur permettre de mener à bien les actions de conservation et de gestion de la fertilité, entre autres:

- Savoir décrire un sol et comprendre son fonctionnement hydrique,
- Etre capable de reconnaître et de différencier les principaux types de sols,
- Etre capable de porter un jugement sur les aptitudes d'un sol et faire un choix d'utilisation et des aménagements possibles du sol,
- déterminer la spéculation la plus apte à développer en fonction des caractéristiques et des aptitudes du sol.

CHAPITRE 1: CONSIDERATIONS GENERALES

1.1. Situation géographique

Situés au cœur de l'Afrique Centrale à cheval entre l'équateur les trois pays (Gabon, Congo et RDC) visés par ce projet bénéficient d'un climat très humide propice à la production agricole, des ressources naturelles très productives, particulièrement forestières (75-85% des pays) et des écosystèmes très riches en biodiversité et figurant parmi les plus importants du monde.

1.2. Climat et zones agro-écologiques

Le climat comprend deux zones bioclimatiques: (i) zone de climat équatorial chaud et humide localisé de part et d'autre de l'équateur dans la partie centrale du Gabon et Congo et la partie nord de la RDC et, (ii) zone de climat tropical humide dans le reste de la zone, avec une grande influence océanique au Gabon (885 km) et au Congo (170 km). On distingue deux saisons sèches, de juin à septembre puis de décembre à janvier, alternant avec deux saisons humides (septembre-décembre et mars-juin).

1.2.1. Gabon

Le climat comprend trois variantes: (i) variante équatoriale pure, (ii) variante équatoriale de transition de la zone centrale, (iii) variante équatoriale du sud-ouest et du littoral centre atlantique. Il est caractérisé par :

- pluviométrie moyenne annuelle, variant de 1400-3200 mm/an. Celle-ci est très variable d'une région à l'autre avec 1800-3200 mm dans les régions côtières et 1400-2000 à l'intérieur du pays;
- températures moyennes mensuelles de 21 à 27°C;
- hygrométrie moyenne de 80 à 90% et minimale < 60% (en Saison Sèche);
- insolation variant entre 1200 et 1600 H/an;
- évapotranspiration de 600 à 900 mm;
- vents d'une vitesse moyenne de 5m/s.

On distingue quatre saisons plus ou moins tranchées:
- Grande saison des pluies : Septembre-Décembre
- Petite saison sèche: Janvier-Février
- Petite saison des pluies : Mars-Juin
- Grande saison sèche : Juillet-Septembre

A ces zones bioclimatiques correspondent cinq grandes zones agro-écologiques (ZAE) plus ou moins différenciées, à savoir :
- **Nord et Nord-est** (SZAE-NNE): comprises entre l'est des Monts de Cristal et le nord du parallèle Mitzic-Booué, avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1500 à 1800 mm.
- **Nord-ouest (SZAE-NO)**: comprise entre l'estuaire et les Monts du Cristal, avec une pluviométrie annuelle supérieure à 2500 mm et 3 mois secs;
- **Centre (SZAE-C)**: comprise entre l'axe Estuaire-Mayombe-Frontière Congolaise et le Massif du Chaillu, avec une pluviométrie annuelle de 1500-2500 mm et 3-4 mois secs;
- **Sud-est (SZAE-SE)**: comprise entre le Haut-Ogooué et Ogooué Lolo, avec une pluviométrie annuelle de 1600-1800 mm et trois mois secs.
- **Côtière (SZAE-Co)**: s'étendant depuis l'équateur jusqu'à la frontière avec le Congo, avec une pluviométrie de 1700-2400 mm et 4-5 mois secs vers le sud. Elle couvre les provinces de l'Estuaire, Ogooué Maritime et Nyanga.

Le drainage estimé à l'aide de la formule Hénin-Aubert[2] est de l'ordre 350-3035 mm. Ceci donne suffisamment d'humidité pour le développement des cultures, à l'exception de caféier et cacaoyer qui sont plus exigeants en eau.

1.2.2. Congo

Le climat est caractérisé, sur presque toute l'étendue du pays, par un régime pluviométrique de type équatorial chaud et humide et tropical humide avec deux saisons pluvieuses (grande et petite) et deux saisons sèches (grande et petite), comme suit:

- le climat équatorial dans le nord du pays, caractérisé par une forte humidité et une pluviométrie supérieure à 1700 mm avec une température moyenne comprise entre 24°C et 26°C.
- le climat tropical humide dans le sud-ouest, où les précipitations moyennes annuelles varient entre 1200 mm dans le sud et 1700 mm sur les reliefs proches du Gabon; la température moyenne mensuelle est comprise entre 21°C et 27°C ;
- le climat subéquatorial, au centre du pays et dans les régions des plateaux et de la cuvette centrale, est intermédiaire entre les deux précédents; les précipitations moyennes annuelles y sont de l'ordre de 1 600 mm avec une saison sèche très marquée.

Sur une année, quatre types de saisons se relaient

- la grande saison des pluies d'octobre à décembre, avec des températures allant de 25° à 35° et des pluies fréquentes.
- la petite saison sèche, de janvier à février, avec des températures élevées.
- la petite saison des pluies, de mars à avril, avec des températures élevées et orages violents.
- la grande saison sèche, de mai à septembre, avec une quasi absence de pluies et des températures qui peuvent descendre jusqu'à 15/16°.

En termes de répartition spatiale des pluies, l'ensemble du territoire congolais est bien arrosé avec des précipitations moyennes annuelles nationales de 1600 mm. Les valeurs moyennes annuelles de l'évapotranspiration potentielle oscillent autour de 1300 mm.

Au niveau des zones agro-écologiques (ZAE), on distingue sept (7) zones plus ou moins tranchées:

- ZAE de la plaine littorale déboisée (ZAE-PL) qui se termine sur la mer par une côte basse ;
- ZAE de Mayombe: c'est une zone parallèle à la côte et formée par des gorges presqu'entièrement couvertes de forêts tropicales ;
- ZAE de la vallée du Niari, caractérisée par un versant nord à pentes douces vers le massif central gabonais très boisé et par un versant sud dénudé sur une bonne partie avec des massifs forestiers des cataractes à la frontière avec le Congo-Kinshasa;
- ZAE du Pool, région de collines largement déboisée (par l'homme) qui fait face vers le nord à une succession de plateaux herbeux ;
- ZAE des Plateaux Téké: caractérisée par des massifs variés, séparés les uns des autres par les vallées profondes des affluents de la rive droite du fleuve. Il s'agit d'une zone plus sèche, avec des saisons plus marquées;
- ZAE de la Cuvette: zone semi-aquatique où les cours d'eau forment une ensemble de bras reliés les uns aux autres à travers une forêt dense presque toujours inondée;
- ZAE de l'extrême nord: vers les frontières avec la Cameroun et la Centrafrique, une zone traversée de nombreux cours d'eau et couvertes de forêts vierges.

[2] : Formule: YP3/1+YP2; avec P en mm/an, Y=@/0,15T-0.13, T=température moyenne, @ = 0,5 (sol argileux) et 2 (sol sableux).

1.2.3. République Démocratique du Congo

Le pays est caractérisé par un bioclimat équatorial au nord et nord-est et tropical humide dans le reste du pays. Les précipitations varient entre 1000 et 2500 mm par an.

Au niveau agroclimatique, la Revue du Secteur Agricole de 2006 a dégagé cinq grandes zones agro-écologiques (ou axes) sur la base de critères objectifs et scientifiquement valides:

- Zone agro-écologique 1 (axe 1): allant de l'Océan Atlantique au Cabinda (Kasaï Oriental) ;
- Zone agro-écologique 2 (axe 2): couvrant la province de Katanga ;
- Zone agro-écologique 3 : (axe 3): couvrant la région des Grands Lacs ;
- Zone agro-écologique 5 (axe 4): couvrant la région de l'Equateur dans le nord ouest ;
- Zone agro-écologique 5 (axe 5): s'étendant de l'Hinterland de Kisangani au Pool Malebo.

A ces différentes ZAE correspondent différentes spéculations agricoles vivrières, commerciales et industrielles, ainsi que des façons culturales.

1.3. Réseau hydrographique

La sous-région dispose d'un réseau hydrographique figurant parmi les plus importants de l'Afrique, constitué de plusieurs grands fleuves qui traversent et irriguent les pays et dont les plus importants sont (i) en RDC: le Fleuve Congo[3] (au centre et au nord du pays), long de 4614 km. C'est le fleuve du monde le plus puissant après l'Amazone; (ii) au Gabon: le Fleuve Ogooué, d'une longueur de 1200 kms drainant 75% du territoire national avec environ 800 kms navigables et La Nyanga arrosant un bassin d'une superficie de 22500 km2, au Gabon et; (iv) Au Congo: en plus des Fleuves Congo et Oubangui, on note d'autres fleuves et rivières d'importance nationale, notamment le Kouilou et son affluent, le Niari, long de 320 kms.

Il existe d'importants autres réseaux de cours d'eau constitués de nombreuses lagunes, des lacs et mares, des rivières et des marigots qui viennent pondérer l'influence équatoriale et tropicale du climat.

1.4. Unités morpho-pédologiques et principaux types de sols

Le milieu naturel est caractérisé par un relief généralement accidenté présentant diverses formes de paysages:

- montagnes, d'altitude oscillant entre 1000 et 3000m et dont les plus importantes sont les Monts de Cristal au Gabon, le Massif du Chaillu au Gabon et Congo et la chaine du Congo à l'est de RDC);
- hauts plateaux de surfaces d'aplanissement, dont le plus important est le plateau Batéké[4] qui couvre les trois pays;
- bassins sédimentaires, d'altitude moyenne (<200m) sur la partie ouest et le long de la côte atlantique et comportant des systèmes de lacs et lagunes et des zones deltaïques;
- Cuvettes, dont les plus importantes sont la Cuvette du Francevillien et la Cuvette centrale du Congo, occupant de vastes étendues à travers les trois pays.

Ces différentes formes de paysages comportent une multitude d'unités et de faciès géomorphologiques, notamment des plaines, des vallées, des dépressions (mares, lacs, etc.) entaillées de fleuves, rivières et marigots qui irriguent les pays. A ces unités géomorphologiques correspondent divers types de sols, différenciés par les conditions écologiques et la nature de la roche-mères dont les plus courantes sont: (i) roches-mères sédimentaires caractéristiques des bassins sédimentaires sur la partie ouest et le long de la côte atlantique, (ii) roches-mères du socle cristallin précambrien dans la partie centrale et surtout dans les parties nord et nord-est. Il

[3] : Le Fleuve Congo est le plus important au monde après l'Amazone (avec un débit dépassant 70 000 m3/seconde)
[4] : Appelé aussi au Congo sous le nom de plateau Téké

s'agit généralement de grès sableux, quartzites, schistes, amphiboles et des dolérites. On y trouve également aussi beaucoup de recouvrements de colluvions plus ou moins remaniés provenant des surfaces anciennes d'abrasion.

D'après les études menées dans les pays par divers auteurs (Aubert et al., 1966[5]; Muller, 1972 t 1974, Mutsinga, 1987; FAO, 1996 et 1975, Vancuttsen et al., 2006 ; Martin, 1981[6] ; Driesch en 1946[7], Aubert et Segalen (1966) etc.), la couverture pédologique comprend neuf grandes classes différenciées sur la base des critères de la classification française, notamment le type de pédogénèse, le degré d'évolution, la nature de la roche-mère, etc. Il s'agit de:

1. **Sols Ferrallitiques fortement et faiblement désaturés (séries jaune et rouge)**: ces types de sols sont dominants dans tous les pays et se rencontrent dans toutes les zones de forêts denses ombrophiles humides et équatoriales, avec une végétation herbacée caractéristiques à base de fougères et de *Aframomum sp*. Ils sont souvent sableux à sablo-limoneux, profonds et bien drainés avec des pH très acides (pH inférieurs à 4,0-5,5). Les horizons de surface riches en humus (matière organique) ont des pH généralement moins acides, de l'ordre de 5.0-6.0. Sur les surfaces d'aplanissement ils sont peu épais et parfois indurés en profondeur. Sur les massifs montagneux et les bassins sédimentaires, ils sont souvent rajeunis par des apports colluviaux ou par l'érosion. Ce sont de bons sols agricoles pour le manioc, le plantain (position de plaine basse), ananas, caféier, cacaoyer, etc. Mais l'acidité peut être un facteur limitant agricole. En outre, à cause de leur texture sableuse, ils sont très sensibles à l'érosion et peuvent perdre facilement leur fertilité dès qu'ils sont dénudés et cultivés sans mesures de protection antiérosive. Dans certains cas de pénéplaines à surface glacée marquée par une érosion en nappe, la structure compacte des horizons de surfaces (due à un décapage de la partie humifère et une forte présence de plaques d'argiles) peut être une sérieuse contrainte au travail manuel du sol surtout en saison sèche.

   Plusieurs groupes sont distingués, notamment:

- Sols ferrallitiques appauvris modaux: ce sont des sols formés sur grès, de couleur rouge et rencontrés dans l'extrême nord du Congo à la frontière Congo - République centrafricaine. Le profil présente un horizon faiblement humifère peu épais et sableux. Le pH est acide, inférieur à 5.

- Sols ferrallitiques remaniés modaux: occupant près de 30 % de la superficie du pays et représente trois quarts de tous les sols rouges (2 YR à 3 YR), dans le nord du pays (région de la Sangha). On observe la série rouge sur les plateaux et les sommets des collines et montagnes, la série rouge brun foncé sur les pentes moyennes, la série jaune sur les pentes fortes et la série gris jaunâtre dans les bas-fonds. Ces sols sont formés sur du grès ou des quartzites. Ce type de sol est caractérisé par des horizons de surface humifères peu importants et par un horizon d'accumulation d'argile et de fer. La texture y est sablo-argileuse; la structure est en général grumeleuse en surface et polyédrique à prismatique en profondeur.

  La fertilité chimique de ces sols est extrêmement pauvre. En outre, les mauvaises propriétés physiques associées â un niveau de fertilité médiocre rendent délicate l'utilisation de ces sols â des fins agricoles. Leur mise en valeur de façon intensive exigerait des intrants assez considérables en engrais. En raison de leur forte acidité, il est indispensable de recourir à des amendements organiques pour améliorer leurs propriétés physico-chimiques et tirer partie de

[5]: Aubert Guy et P. Segalen, 1966: Projet de classification des sols ferralltiques. Cahier ORSTOM, série pédologie, Vol IV. no.4, 97-110pp.; Muller J.P., 1972 : Etude macromorphologique des sols ferrallitiques appauvris en argiles du Gabon. Cahier ORSTOM, série pédologie, Vol. no.1, 77-93pp.; Muller J.P., 1974 : Morphologie des horizons supérieurs des sols ferrallitiques du Gabon (appunites et épi-structurons dyscrophes). Cahier ORSTOM, série pédologie, Vol.XII. no.3/4, 277-287pp.

[6]: Martin D., 1981: Les sols du Gabon : pédogénèse, répartition et aptitudes; carte au 1 :2.000.000

[7] : Cité par Odongo (1988).

leurs potentiels. Ces sols sont aptes à la culture du palmier â huile et de l'arboriculture, grâce à leur texture sableuse que semble préférer le palmier à huile.

- Sols ferrallitiques remaniés sur roches granito-gneissiques: la série rouge est le plus représenté de ces types de sols, caractérisée par un horizon humifère généralement peu épais, brun foncé reposant sur un horizon ocre-rouge ou jaunâtre suivant la position topographique. Les sols de pente sont habituellement caractérisés par la présence dans leurs profils d'éléments d'apports colluviaux.

  La richesse chimique de ces sols est d'une manière générale bonne, avec des teneurs en matière organique de l'ordre de 2,5 et 3,5 % dans la couche superficielle et qui lui assure une bonne stabilité structurale. Le pH se situe entre 4,5 et 5,5. Bien que faibles, les taux de bases échangeables paraissent intéressants, parce que bien équilibrés en calcium et magnésium. Du point de vue de leur mise en valeur, ces sols peuvent se prêter à la culture de palmier à huile, du caféier et même du cacaoyer.

- Sols ferrallitiques issus d'amphibolites: de couleur brun-rouge foncé relativement constante dans tout le profil. Les possibilités d'utilisation à des fins agricoles sont assez considérables car leur bonne structure, liée à une teneur en argile élevée (50 %), à une bonne porosité et à une alimentation en eau convenable, constitue un critère régulateur de la fertilité. Ces sols sont réservés à la culture intensive du cacaoyer, plus exigeant.

- Sols ferrallitigues issus de dolérites: Ce sont des sols de couleur rouge foncé sur tout le profil. Leur texture est argilo-sableuse à argileuse, leur structure grumeleuse à nuciforme est excellente.

2. **Sols Ferrugineux tropicaux lessivés et non lessivés:** ces sols occuperaient la seconde place après les sols ferrallitiques et dominent dans la zone de savanes arborées et de forêts plus ou moins denses. Ils sont très répandus et viennent du point de vue importance en deuxième position après les sols ferrallitiques. Selon leur position topographique, leur profondeur ou leur occupation, ils se subdivisent en plusieurs groupes, notamment Groupe modal, remaniés, à taches et concrétions, à cuirasses, etc. Les sols profonds sont aptes pour la polyculture, notamment le manioc, plantain, maïs, le mil, arachide, soja, caféier, etc. Toutefois, les pH assez bas et la présence d'horizons indurés ou de cailloux à faible profondeur peuvent entrainer des limitations physiques et chimiques à la production agricole. Les sols superficiels et à cuirasse sont souvent réservés aux parcours.

3. **Sols hydromorphes (à pseudogley et à Gley**: caractéristiques des zones des vallées, plaines alluviales et des bas-fonds humides inondables en saison des pluies ou par les marées hautes des cours d'eau. Ils occupent les vastes étendues alluviales des vallées des fleuves, dans la cuvette centrale du Congo et les bas-fonds inondables. On distingue deux sous-groupes : (i) Sols hydromorphe à pseudogley, avec une hydromorphie temporaire; (ii) Sols hydromorphes à Gley, avec une hydromorphie permanente (Gley). Ils ont des pH plus ou moins bons (> 5 en surface grâce à la matière organique), de bonnes réserves hydriques (grâce à leur texture argilo-sableuse ou limoneuse) qui constituent un atout important pour leur utilisation agricole surtout en saison sèche. Leur fertilité chimique peut se dégrader facilement en cas d'irrigation par submersion non maîtrisée (mauvais drainage) et en présence d'une eau d'irrigation très chargée en sodium (Na+) ou carbonates. Du point de vu agricole ce sont les meilleurs sols pour la plupart des cultures vivrières (riz, maïs, tarot, manioc, patate douce, etc.) et les cultures maraîchères (tomate, oignon, poivron, piment, etc.) lorsque la texture est plus légère.

4. **Vertisols**: souvent rencontrés dans les mêmes zones que les sols hydromorphes, mais moins étendu et localisés dans les cuvettes de décantation plus ou moins inondées. Ils se différencient des sols hydromorphes par leurs propriétés de dessication et de gonflement et par leurs fortes teneurs en argiles (>80%). Ce sont d'excellentes terres de riziculture.

5. **Sols Minéraux bruts d'érosion** (lithosols): superficiels, voir squelettiques, ils sont généralement localisés sur des sommets des collines d'abrasion (érosion hydrique) à fortes pentes, les crêtes montagneuse des Monts de Cristal et sur les massifs montagneux à buttes témoins. Ce sont des sols très sensibles à l'érosion, avec des pH variables et des teneurs en matière organiques plus ou moins faibles. La végétation forestière est plus ou moins spécialisée à base de combrétacées. Leur faible altération et profondeur font qu'ils sont sujets à des déficits hydriques chroniques pendant la grande saison sèche, d'où des aptitudes agricoles presque nulles.

6. **Sols peu évolués d'apports colluviaux/alluviaux**: localisés sur les bas de pentes, les talwegs, surfaces aplanies et des zones de pénéplaines sur matériaux colluvio-alluviaux plus ou moins profonds, avec un drainage très bon à moyen. Ces sols sont ainsi constitués d'un complexe de matériaux complexes (sableux, limoneux, argileux) selon la nature des apports. La matière organique est souvent faible et limitée aux horizons de surface. Ils supportent une végétation arbustive plus ou moins claire et parfois rabougrie (sols colluviaux), accompagnée de tapis graminéen assez dense. Leur richesse en éléments nutritifs dépend de la nature des matériaux et de la matière organique. Leurs pH sont assez variables, très acides à peu acides, dépendant des types d'alluvions ou des colluvions. Toutefois, ils présentent de bonnes aptitudes pour certaines cultures, notamment manioc, tarot, poivron, maraîchères (légumes feuilles, etc.) et des cucurbitacées.

7. **Sols bruns eutrophes**: ils sont caractéristiques des zones des plateaux Batéké et des plaines herbeuses à saison sèche marquée, à savanes à végétation arbustive plus ou moins dense accompagnée de tapis herbacé dont la décomposition rapide de la biomasse sèche conduit à la formation d'humus de type «Mull eutrophe», très riche en calcium. Ce sont de très bonnes terres agricoles pour la production de céréales et pour le pâturage du bétail.

8. **Sols calcimagnésiques**: ils sont soit formés sur des roches-mères riches en magnésium et calcium, soit formés sur des matériaux à faible drainage interne favorisant l'accumulation de calcium et de magnésium dans le profil. Ils présentent de bonnes potentialités agricoles pour certaines cultures, mais leur structure massive et leur faible perméabilité sont des facteurs limitants.

9. **Andosols**: ces sols sont formés principalement dans les zones de montagnes sur des coulées de laves volcaniques issues des phénomènes géologiques volcaniques. Ce sont les sols les plus riches, grâce aux cendres volcaniques qui contiennent du calcium, magnésium, potassium, phosphore, etc.

Il faut noter que les trois derniers types de sols (Sols bruns eutrophes, Sols calmagnésiques et Andosols) sont localisés à des zones spécifiques.

En ce qui concerne leur distribution spatiale, il faut noter que les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux sont influencés par le climat, alors que les autres sont conditionnés par leur position stationnelle.

1.5. Systèmes de production

La production agricole est généralement pluviale et dominée par des cultures vivrières (manioc, mais, bananier plantain, riz, mil, sorgho, haricot, niébé, etc.)

Selon les zones agro-écologiques ou le milieu socio-économique, ces cultures sont accompagnées de cultures secondaires ou d'appoint notamment la patate douce, le tarot, le gombo, le piment, l'oseille, etc.

En zones périurbaines la production est orientée vers les cultures maraîchères avec des pratiques culturales plus ou moins modernes basées sur une bonne préparation du sol et une gestion équilibrée de la fertilité des sols.

On distingue généralement quatre systèmes de production:

- Système itinérant sur friches et brûlis forestiers: c'est le système traditionnel le plus répandu dans la sous-région, transmis de génération en génération. Elle est orientée essentiellement vers la subsistance avec le manioc, le plantain et le mais comme cultures de base pratiquées sur des friches et brûlis. Quelle que soit la ZAE ou les traditions locales, les techniques consistent à défricher périodiquement de nouveaux champs sur des terres forestières ou de savanes pendant la saison sèche en abattant tous les arbres. La biomasse végétale ainsi défrichée est mise en andains et brûlée sur place avant le début de la saison des pluies. Les cendres organiques sont enfouies soigneusement dans le sol soit par labour manuel superficiel sous forme de billons, de buttes (monticules) de terre ameublie à l'aide de houe traditionnelle, soit dans des trous (5-10 cm de profondeur) de plantation des boutures de manioc ou plantain, creusés à l'aide de machettes. Ce système repose essentiellement sur l'exploitation des éléments nutritifs contenus dans les couches humifères et les cendres organiques issues des brûlis forestiers qui constituent la partie nourricière assurant la fertilité du sol. En effet, les cendres organiques sont assez riches en éléments nutritifs, notamment la potasse (83%), l'azote (16%) et le magnésium, etc., qui permettant ainsi d'amender le pH du sol en réduisant sensiblement l'acidité libre du sol (50%) et d'améliorer l'assimilation des nutriments par les cultures (Strongaard, 1984)[8]. Le manioc considéré comme la principale spéculation dans la région peut occuper le sol pendant 2 à 3 ans avec des récoltes périodiques selon les besoins alimentaires ou de revenus. Il est cultivé soit en monoculture, soit en association avec d'autres spéculations secondaires (maïs, ananas, tarot, etc.). Au bout de deux 2-4 ans d'exploitation, le champ est abandonné, à cause de la baisse de la fertilité et l'augmentation de l'acidité du sol qui remonte à son niveau avant les brûlis (Lungu et Chinene, 1993)[9]. Si cette pratique convient bien aux paysans en raison de son coût de production assez faible et limité à la force de travail pour le défrichement, la préparation du sol et le désherbage, elle s'avère de plus en plus destructrice de l'environnement forestier et écologique à cause de la forte pression foncière et de la dégradation du climat.

- Système Agro-Sylvo-Pastoral: elles sont basées sur l'intégration de l'élevage à l'agriculture dans les zones de savanes et de forêts claires où les paysans pratiquent l'élevage des petits ruminants et des bovins. Selon les ZAE et les traditions culturales, soit les animaux sont mis dans des étables et les paysans collectent les excréments pour les utiliser comme fumure organique dans les champs, soit les animaux sont mis directement dans les champs (pacage) ce qui permet de fertiliser directement les sols grâce aux excréments produits sur place. Toutefois, le développement de ce système est limité du fait de manque de structures organisées de prophylaxie et de soins vétérinaires qui menacent l'élevage (Tollens et al. 2004) et la longue période de la régénération de la jachère forestière.

[8]: Strongaard, P.; 1984: L'effet immédiat du brûlis et de l'amendement des terres par les cendres. Plant and soil, No.80; 307-320pp
[9]: Lungu, O.I et V.R.N Chinene, 1993: Les systèmes de cultures et de gestion et leurs effets sur la productivité des sols en Zambie.

- Système agroforestier: en zone de savanes, les systèmes agraires traditionnels étant par nature des systèmes intégrés, les paysans laissent généralement pousser des arbres et arbustes à usage multiple dispersés dans les champs cultivés avec des cultures vivrières. Ces arbres contribuent à l'amélioration de la fertilité et à la lutte contre l'érosion des sols.

- Système irrigué: moins répandu, mais en train de prendre de l'importance, surtout au niveau des bas-fonds grâce à la mise en œuvre de projets de petite irrigation pour la riziculture et les légumes et surtout grâce au développement rapide des cultures maraîchères au niveau des zones périurbaines des grandes villes, notamment Kinshasa, Brazzaville et Libreville.

L'exploitation est généralement de type familial, sur de petites superficies (1 à 1,5 ha) et centrée sur des cultures vivrières. Même au niveau des cultures maraichères où l'on note une certaine maîtrise de l'eau, la plupart des exploitations sont de petite taille avec des superficies limitées à quelques (5-10) planches (plates bandes) de 20 m^2. Au cours de ces dernières années, le maraîchage a connu un rapide développement en zones périurbaines des villes telles que Brazzaville, Kinshasa et Libreville. Elles concernent principalement des cultures telles que laitue, oignon, tomate, les feuilles (amarantes, ciboule, etc.), pastèque, courgette, carotte, concombre, piment, etc. Ce système constitue une étape avancée de l'évolution vers une agriculture moderne, même si des améliorations sont encore nécessaires. Les techniques de production utilisées sont axées sur une bonne préparation du sol (ameublissement), des apports importants d'engrais organiques et minéraux, et une bonne maîtrise de la petite irrigation, ainsi que l'utilisation de semences améliorées et de pesticides.

CHAPITRE 2: PROBLÉMATIQUE D'UTILISATION DURABLE DES RESSOURCES EN SOLS

Comme indiqué plus haut la dégradation des sols demeure la question centrale à laquelle devra faire face la relance de la production agricole et particulièrement la mise en œuvre des PNSA. En effet, la majeure partie des sols sont de types ferrallitiques fortement désaturés et ferrugineux tropicaux lessivés, avec des pH très acides. Leur forte fragilité structurale qui les rend très sensibles à l'érosion et la faible fertilité originelle constituent une véritable problématique de leur utilisation durable.

Les déboisements et les mauvaises pratiques culturales, notamment les défrichements des terres de pentes, les brûlis et l'écobuage et la préparation superficielle des sols, apparaissent comme les principaux facteurs déclencheurs de l'érosion des sols et menaçant leur utilisation durable. De part les décapages des couches humifères et les importantes pertes en terres provoquées par l'érosion hydrique, les sols perdent progressivement leur couche arable ainsi que leur potentiel de production agricole.

La dégradation des sols est un processus très complexe qui met en jeu plusieurs facteurs pouvant s'enchaîner les uns après les autres ou de façon concomitante et se manifeste sous des formes multiples visibles et insidieux, avec des conséquences parfois très néfastes et irréversibles. Ainsi, sa maîtrise repose sur la bonne connaissance à la fois des caractéristiques physico-chimiques des sols et de la nature des différents phénomènes qui l'engendrent.

2.1. Connaissance des sols

La situation actuelle révèle que les ressources en sols du pays sont très peu connues par la plupart des acteurs, particulièrement les agents chargés de l'encadrement des producteurs agricoles. En outre, à part quelques études récentes, la majeure partie des études et des documents cartographiques sur les sols datent des années 70/80s (Aubert et al., 1966; uler, 1972 t 1974, Martin, 1981[10]; FAO, 1976, Vancutsem et al., 2006 ; White, 1983 ; Dresch en 1946[11], Aubert et Segalen, 1966 ; etc.) et ont été menées dans un objectif purement pédologique, donc centrées sur les caractérisations pédogénétiques, la distribution spatiale et la classification des sols dont la majorité est dominée par le type ferrallitique fortement désaturé et acide, donc pauvre à l'origine. Les quelques cartes pédologiques disponibles couvrant tout le territoire sont à des échelles très petites pour servir de référence à des interventions de terrain (E = 1:2000.000 à 3.000.000; Vancutsem et al., 2006 ; Martin, 1981, etc.). Néanmoins, il existe des cartes à moyenne échelle (E = 1:200 000) limitées au niveau local ou régional et élaborées sur la base des fonds de carte géographiques (IGN).

Cependant en ce qui concerne les cartes thématiques (cartes des contraintes, cartes de sensibilité à l'érosion, etc.) et des cartes d'évaluation des aptitudes culturales des sols, très peu d'études sont disponibles. Or de tels documents sont indispensables pour la planification des actions à moyen et long termes de l'utilisation des sols tels que les sols ferrallitiques si fragiles et sensibles à l'érosion.

Il convient de noter qu'aussi bien pour la lutte contre l'érosion que pour la gestion de la fertilité, rien ne peut se faire durablement et de manière efficiente sans une bonne connaissance de base des caractéristiques et aptitudes des sols. Il est important que les acteurs aient une bonne connaissance des sols et maitrisent les facteurs de production.

---

[10]: Aubert Guy et P. Segalen, 1966: Projet de classification des sols ferralltiques. Cahier ORSTOM, série pédologie, Vol IV. no.4, 97-110pp.
Muller J.P., 1972 : Etude macromorphologique des sols ferrallitiques appauvris en argiles du Gabon. Cahier ORSTOM, série pédologie, Vol. no.1, 77-93pp.
Muller J.P., 1974 : Morphologie des horizons supérieurs des sols ferrallitiques du Gabon (appunites et épi-structurons dyscrophes). Cahier ORSTOM, série pédologie, Vol.XII. no.3/4, 277-287pp.
Martin D., 1981: Les sols du Gabon : pédogénèse, répartition et aptitudes; carte au 1 :2.000.000

[11] : Cité par Odongo (1988).

2.2. Dégradation des sols

2.2.1. Dégradation physique des sols

L'érosion toucherait la plus grande partie de la zone et provoquerait d'importantes pertes en terres, comme en témoignent diverses études de nombreux auteurs (Rose, 1992; Vancutsem et al. 2006; Sadio, 2007 ; etc.). Elle affecte particulièrement les terres des plateaux sablo-limoneux, des sommets des collines déboisées, des versants à pentes fortes, ainsi que les talus des routes (planche photo 1). Près de 5% des terres cultivées seraient affectés par l'érosion hydrique, particulièrement dans les zones de savanes et celles à forte densité de population, notamment les zones périurbaines des grandes villes, notamment Kinshasa, Brazzaville et Libreville où se développe depuis quelques années une forte expansion des activités agricoles, particulièrement les cultures maraichères.

Parmi les principaux facteurs causant la dégradation des sols figurent, entre autres, les déboisements des massifs forestiers à des fins de production forestière et principalement les pratiques agricoles (défrichements champêtres, préparation des sols et les façons culturales). De manière générale quel que soit le système de production, il n'y a pas à proprement parler de techniques normalisées de conservation des sols et de gestion de la fertilité. Les systèmes traditionnels itinérants basés sur l'exploitation des brûlis forestiers et une préparation sommaire des sols à l'aide d'outils rudimentaires exposent la couche superficielle du sol à l'érosion et à la perte des éléments nutritifs.

L'érosion se manifeste différemment d'une ZAE à une autre, avec des conséquences plus ou moins sévères dépendant de la nature des sols, des types d'utilisation et des pratiques culturales. On distingue généralement trois formes caractéristiques de dégradation:

- **Rigoles**: ce sont des tranchées assez profondes (40-50 cm) creusées par la circulation de l'eau le long des pentes abruptes;
- **ravinements plus ou moins profond (1 à 2 m)** observables le long des pentes raides, des zones de rupture de pentes (planche photo 1), le long des pistes et sur les talus des routes, dans les champs agricoles labourés dans le sens de la pente;
- **érosion en nappe** très marquée sur les plateaux (planche photo 1) à sols limoneux et aussi présente dans certaines terres cultivées. A ce niveau on note un amincissement de la couche arable (parfois moins de 20cm d'épaisseur) par décapage des couches supérieures (humifères) du sol, ainsi qu'une tendance généralisée à la baisse de la fertilité des sols.

Selon une étude récente menée en RDC par Vancutsem et al. (2006), l'érosion hydrique entrainée par les déboisements et les pratiques culturales serait responsable chaque année de près de 160 à 220 tonnes de terres (0,75 à 4 cm d'épaisseur) décapées et transportées par les eaux de ruissellement vers les cours d'eau (planche photo 1).

Tableau 1. Taux d'érosion pluviale en fonction du type de végétation à Lubumbashi.

TYPES DE VEGETATION	PERTES EN TERRES PAR AN
Forêt dense sèche	3 à 5 tonnes
Forêt claire	7 tonnes
Savane à Loudetia	27 à 32 tonnes
Sol nu	159 à 220 tonnes

Source : Soyer et al. (1982); Miti et al. (1984)

Tableau 2. Épaisseur de sol décapé par l'érosion sur sol sableux dans la région de Kinshasa

TYPES DE FORÊT	Épaisseur (cm)
Forêt	0,75 cm
Sol nu	2-4 cm

Source : Van Caillie X.; 1983

Ces données attestent de l'importance de maintenir une couverture végétale adéquate à la surface du sol pour minimiser les risques d'érosion et les pertes en terres. Même si pour l'instant dans la majeure partie des zones, la densité du couvert forestier permet de freiner l'érosion et de minimiser les pertes en terres, on peut craindre que la pression foncière et l'accélération du rythme des déboisements à des fins agricoles conduisent à une érosion très agressive avec des conséquences désastreuses et irréversibles sur les sols.

2.2.2. Baisse de la fertilité des sols

L'érosion a aussi des conséquences très néfastes sur la fertilité du sol, en ce sens que ce sont le plus souvent les horizons supérieurs humifères qui sont les plus affectés par le décapage. Le décapage de ces horizons conduit à une perte totale de la fertilité du sol, les éléments nutritifs ayant été entrainés avec la terre décapée. Il s'ensuit à une modification des équilibres biochimiques et une acidification des sols. Dans certains cas, notamment les terres irriguées, la dégradation se fait à travers des processus spécifiques tels que la salinisation ou l'alcalinisation.

A travers la sous-région, la dégradation de la fertilité toucherait toutes les terres cultivées et serait considérée comme le principal affectant la production agricole, de part la baisse des rendements des cultures. En effet, les pratiques d'agriculture itinérante, consistant à brûler sans discernement la biomasse végétale et les couches humifères du sol et à exploiter principalement les cendres des brûlis forestiers, sont apparues au fil du temps comme étant les principales causes de dégradation de la fertilité des sols en système traditionnel de production. Il est reconnu que les forêts équatoriales et tropicales humides ont un puissant et rapide turnover de renouvellement de la matière organique grâce à la production d'importantes quantités (près de 850 tonnes/ha) de biomasse à travers leurs canopées qui peuvent produire annuellement jusqu'à 9-15 t/ha une litière. Mais à cause du climat chaud et humide et de l'intensité des activités microbiennes (méso- et microfaune), cette matière organique est très vite décomposée et minéralisée en donnant un humus très labile de type mull eutrophe riche en éléments nutritifs (ca++, Mg++, K+, Na+, P2O5, etc.).

Les brûlis, en accélérant la minéralisation et la libération de ces éléments contribuent à accentuer la perte des éléments nutritifs hydrosolubles, soit par lessivage/lixiviation à travers l'eau qui percole dans le sol, soit par soustraction excessive par les cultures surtout en système de monoculture. En outre, le fait que la plupart des sols ont des pH à l'origine très acides et que la production soit basée principalement sur l'exploitation de ces brûlis, sans apports ou très peu d'engrais, au bout d'une ou deux campagnes de production, la fertilité du sol peut baisser drastiquement à un niveau très bas avec des pH en-deçà du niveau minimum acceptable (pH = 5.5) pour satisfaire les besoins des cultures et assurer une production agricole optimale.

Les tentatives d'amélioration de la fertilité qui ont été menées çà et là sur cultures vivrières et maraichères ont été très disparates et timides, limitées à quelques apports localisés de fumure animale (dans les zones d'élevage de caprins, porcins et volailles) ou d'engrais minéraux dont les prix élevés ont vite découragé les paysans.

CHAPITRE 3:
NOTION DE BASE SUR LA PÉDOLOGIE ET LES SOLS

3.1. Pédologie

La pédologie est la science qui s'occupe de l'étude de l'origine, des constituants, de la structuration, des propriétés physico-chimiques, des fonctionnements des couvertures pédologiques et de leurs variations spatiales et temporelles, ainsi que de la classification des sols. C'est une science pluridisciplinaire.

3.2. Notion de sol et pédogénèse

Le sol représente la couche superficielle, meuble, de la croûte terrestre qui résulte de l'altération des roches sous-jacentes et de la dégradation des matières organiques, sous l'influence des agents biologiques (végétation, faune du sol, etc.), chimique et physique (précipitations, variations de température…

Il constitue l'une des bases les plus importantes de la production agricole. Il assure au végétal un rôle de fixation (ancrage) et de croissance par l'approvisionnement d'éléments nutritifs et de l'eau. C'est aussi un milieu dynamique, complexe et fragile dont la genèse est caractérisée par des processus d'altération et de maturation biogéochimique spécifiques et fonction de la nature de la roche mère et des conditions climatiques.

Schématiquement, la formation d'un sol peut se décomposer en trois phases qui se chevauchent, plus ou moins, dans le temps:

- Altération: décomposition de la roche-mère;
- Humification: introduction de matières organiques (humus);
- Différenciation: migrations et accumulation de certains éléments.

Au cours de ces trois phases, la formation du sol est la résultante de l'interaction de plusieurs facteurs naturels et anthropiques qui dépendent à la fois de la roche, du climat, de la morphologie, des agents biologiques et du temps:

- Roche-mère: le sol nait de l'altération d'une roche cristalline, métamorphiques et sédimentaires sous l'influence des agents météorologiques et des agents biologiques (microfaune, macrofaune, microorganismes, etc.) et dont il hérite les caractéristiques physico-chimiques. Selon le climat et les agents biologiques l'altération peut être plus ou moins complète et aboutir à la formation de différents types de sols. Alors que sous climat tempéré l'altération est peu poussée, sous climat tropical humide et équatorial elle est complète, avec une hydrolyse des minéraux primaires.

- Climat: le climat imprime son influence au sol tant au niveau de sa formation originelle que sur son évolution temporelle. Leur distribution dans un pays ou à travers le globe correspond généralement à la répartition des climats. Ainsi à chaque type de climat correspond des types de sols donnés, notamment les sols tropicaux que l'on rencontre dans les pays tropicaux. Toutefois, ce ne sont pas tous les sols dont la distribution et la pédogénèse dépendent de l'étagement du climat. Certains sols se voient leur pédogénèse être étroitement liée à un climat donné et sont dénommés des Sols climatiques ou zonaux (cas des Sols ferrallitiques caractéristiques des climats tropical et équatorial chaud et humide), alors que d'autres sont soumis aux conditions (topographie, microclimat, végétation, hydrographie, etc.) de leur station de formation et sont dénommés des Sols non climatiques ou azonaux (cas des Sols hydromorphes, liés à la présence d'excès d'eau due à une nappe perchée ou permanente dans le profil).

- Temps: la formation, la maturation et l'évolution (lessivage, appauvrissement, lixiviation, érosion, etc.) demande du temps. Ces processus peuvent prendre des milliers d'années (plus de 100.000 ans). En Afrique, l'unité de durée, en pédogenèse, est le million d'années voire la dizaine de millions d'années.

- Agents biologiques: ce sont les racines, vers de terre, macrofaune et mésofaune, champignons, bactéries, homme qui interviennent à des étapes variables et de manière différentielle. Ils agissent soit mécaniquement par brassage des éléments et des couches du sol, soit chimiquement. Grâce au gaz carbonique (**CO_2**) atmosphérique et à celui fourni par la respiration des organismes du sol, lequel en présence de l'eau produit de l'acide (**CO_2 + H_2O** donne **H_2CO_3** qui donne **H+ et HCO_3- qui donne CO_3--** et **H+**) qui conduit à son tour à la dissociation des minéraux.

- Topographie: les pentes participent à la circulation des eaux de pluies qui véhiculent à la fois des ions en solution et des matières en suspension. Alors que la présence des dépressions favorise l'accumulation des eaux de ruissellement et des éléments transportés, les pentes abruptes entrainent des décapages de matériaux sous l'effet des eaux de pluie.

La décomposition de la roche en place (*roche-mère géologique*) fournit un matériau, plus ou moins meuble (roche-mère pédologique), qui est colonisé progressivement par une végétation et des microorganismes, se différencie et s'approfondit sous les actions combinées de l'humus, des microorganismes, du climat (eau de pluies, température, humidité, etc.). Selon l'actions de ces facteurs, il peut se former un sol épais, profond ou superficiel, constitué de couches successives plus ou moins différenciées, appelées Horizons. Alors que sous climat tempérés l'altération est moins agressive et incomplète, résultant à des sols plus riches en éléments solubles (**Na, K, Ca, Mg**), en milieu tropical et équatorial humide et chaud les minéraux primaires subissent une hydrolyse totale jusqu'à la soustraction massive du milieu des éléments nutritifs, laissant ainsi en place un cortex de silice et d'alumine infertiles. C'est le cas des sols ferrallitiques qui malheureusement couvrent la plupart des pays d'Afrique centrale.

Sous l'action du climat et des utilisations agricoles, le sol peut évoluer positivement vers des formes plus matures ou négativement par phénomènes de dégradation. Il arrive que l'infiltration de l'eau dans lequel provoque un entrainement des composés de l'humus sous forme de complexes organo-minéraux hors du profil ou dans les couches sous-jacentes. Ces mouvements provoquent des migrations et des accumulations, en créant ainsi des horizons appauvris et des horizons enrichis. La variation de la couverture pédologique, suit donc les variations climatiques et des unités géomorphologiques.

Il faut noter que toute utilisation irrespectueuse des conditions du milieu et des aptitudes du sol, peut entrainer une dégradation résultant à des modifications profondes des propriétés physiques et géochimiques avec des conséquences parfois très redoutables pour l'environnement écologique, les équilibres écosystémiques, les eaux de surface (qualité et quantité) et l'utilisation durable des terres.

3.3. Profil et horizons pédologiques

Le sol se développe à partir de l'altération de la roche-mère dont les matériaux vont s'accumuler en des couches successives superposées de la surface vers le bas jusqu'à la roche-mère, appelées *horizons*. L'empilement vertical successif de ces horizons constitue ce que l'on appelle le *profil pédologique*. Au fur et à mesure de l'évolution du sol, les horizons se différencient morphologiquement, physiquement et chimiquement en s'approfondissant. Dans le cas des sols zonaux, il s'établit un équilibre relativement stable entre le sol et son environnement et les différents horizons du sol prennent les caractéristiques du climat local ou des conditions de la station de pédogénèse.

La description du sol se fait généralement de haut en bas à l'aide d'une coupe verticale (1mx1mx1,2 - 1,5m) qui permet de visualiser l'empilement des différents horizons et d'observer

les caractéristiques morphologiques et physiques du sol. Elle porte sur les paramètres suivants: épaisseur, couleur, teneurs ensables, limons et argiles, structure, consistance, colonisation par les racines des plantes, présence de taches, concrétions ou de cailloux, etc. Les différents types de sols ont des profils caractéristiques et des d'horizons spécifiques qui reflètent le climat, le milieu, la nature de la roche sous-jacente et la végétation (figure 1a & b).

- **Horizons fibreux (T)**: c'est une matière organique tourbeuse constituée des débris végétaux non décomposés et plus ou moins fossilisés, qui se trouver à la surface du sol ou dans enterrés en profondeur dans le sol.
- **Horizons organiques**: selon AFES (1995) dans son Référentiel pédologique français, il existe plusieurs types d'horizons organiques constitués de fragments de végétaux morts (feuilles, racines, écorces, etc.) plus ou moins transformés en conditions aérobies et anaérobies situés à la surface du sol. Selon le degré de transformation des débris végétaux, on distingue 3 types d'horizons **O** (ou **A0**):
  - √ OL: débris peu transformés, toujours reconnaissables ;
  - √ OF: débris mélangés avec de la matière organique fine sous forme de boulettes fécales;
  - √ OH: une majorité de matière organique fine formée de boulettes fécales et de microdébris non identifiables à l'oeil nu

- **Horizons listriques H:** définis par le référentiel pédologique français (1995) comme des horizons entièrement constitués de matière organique (*Holorganiques*), formés en milieu saturé par l'eau pendant plus de 6 mois de l'année et composés principalement de débris de végétaux aquatiques ou hygrophiles. Ils sont caractéristiques des tourbes ou *histosols*;

- **Horizon organo-minéraux A**: ils sont constitués d'un mélange de matière organique et de matière minérale et sont situés dans la partie supérieure du sol depuis la surface. Ils peuvent être surmontés par les horizons O. Ce sont des horizons bien structurés par l'activité biologique (faune, racines, microorganismes, etc.) qui contribuent à la formation de complexes argilo-humiques;

- **Horizon B** : constitué de matières minérales et quelques substances humiques. Selon les migrations des matières des matières, on distingue plusieurs horizons B, dénommés Bt ou horizon argilic qui est enrichi en argiles provenant d'un horizon éluvial E sus-jacent, Bs enrichis en complexes d'oxy-hydroxydes de fer; Bg présentant des phénomènes de réduction du fer, dûs à un engorgement quasi-permanent, avec une teinte généralement grise à verdâtre ou des taches rouille; Bv , horizon vertique, trés riche en argiles gonflantes (smectites) qui lui confère des propriétés physiques particulières (à l'état humide gonflement, forte plasticité, faible taux d'infiltration; à l'état sec, rétraction avec profondes fentes de retrait; une forte Capacité d'échange Cationique); Bl ou horizon labouré constitué de mélange des horizons par le retournement et le brassage occasionné par le travail généralement mécanique du sol et auquel s'ajoutent les apports de substances allochtones qui sont incorporées au sol (engrais, amendements, épandages, traitements divers, etc.).

- **Horizon C/R/M** : constitué par les débris minéraux du matériau d'origine ou par la roche-mère inaltérée. La roche située à la partie inférieure du profil peut être peu altérée: elle est dénommée C si la roche est altérée et fragmentée**, R** pour une roche dure et massive, **M** pour une roche meuble. Des fragments de roche dure (comme des éboulis) sont désignés par **D**.

Certains pédologues utilisent des chiffres ou des lettes pour différencier les horizons caractéristiques (**A1**, **A00**, **A0**, **Ag**, **F**; **B1**, **B2**, etc.), comme dans le cas de la figure 1 ci-dessous.

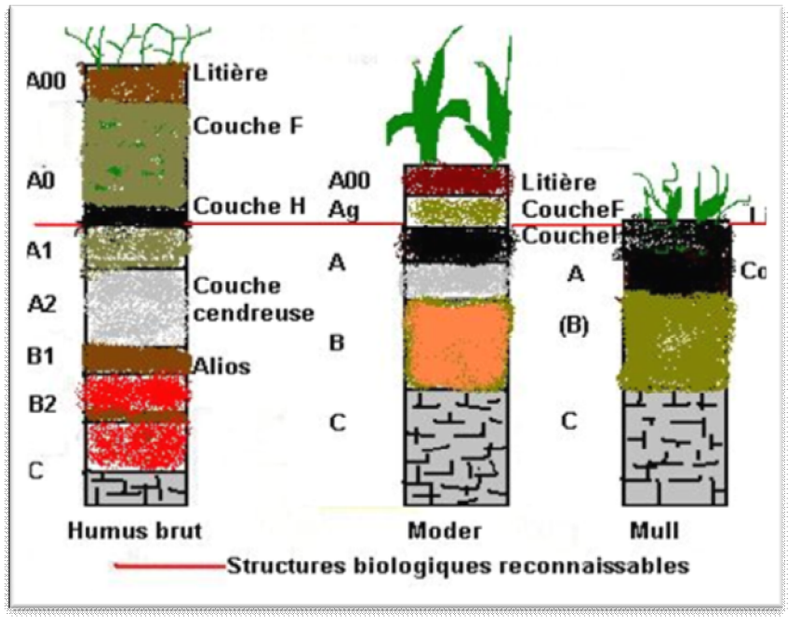


Figure 1a: Profil pédologique et succession des différents horizons

Figure 1b: Profil d'un sol ferrugineux profond

Figure 1c : Profil d'un sol peu évolué superficiel : présence de racines, macroporosité et bloc de roche-mère

3.4. Types de matière organiques ou humus

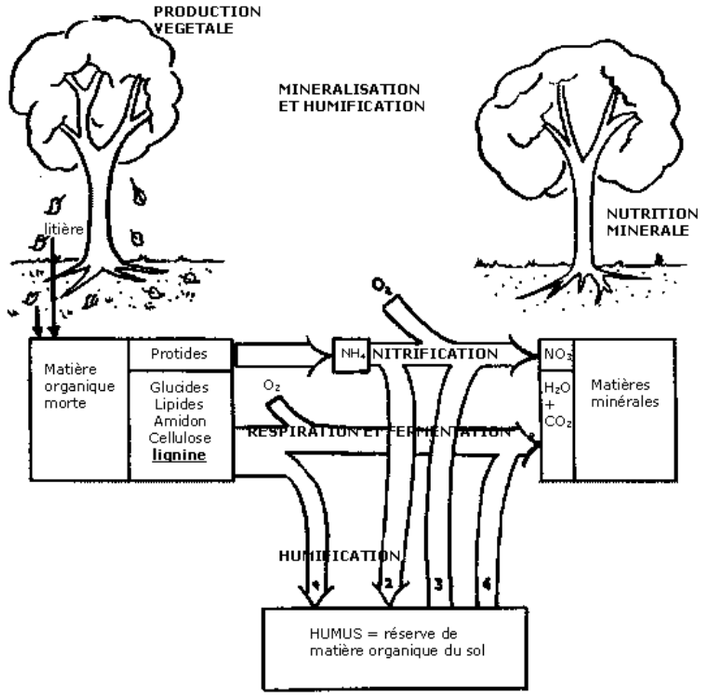
Dans les conditions naturelles, la végétation produit de la biomasse végétale constituée de feuilles, brindilles, tiges, etc. Cette biomasse subit une série de transformations sous l'action des microorganismes et du climat qui conduisent à la formation d'un type d'humus donné (figure 2). Les horizons organiques ou l'humus différent en fonction de leur saturation en eau et de la litière végétale. Ainsi, on distingue 4 types d'humus:

- **Mor**: humus brut en climat frais et humide provenant d'une litière difficilement décomposable et peu nutritive et résultant d'une faible activité organique ou animale;

- **Moder**: humus intermédiaire formé à partir d'une litière forestière de sapins pauvre en herbe et résulte d'une activité organique plus forte;

- **Mull ou humus doux**: provient d'une litière complètement décomposée de steppe ou de forêts riches en feuillus et en herbes. Cette litière est facilement minéralisée et nourrissante pour les organismes ce qui favorise l'activité organique.

- **Tourbe**: formée en milieux saturé (en eau). C'est une matière organique à activité organique très réduite.



1 et 2 :formation d'humus à partir de lignine et de glucides partiellement dégradés (et de produits azotés provenant des protides).
3 et 4 : minéralisation d'une partie de l'humus (1 à 2% par an).

Source:

Figure 2: Cycle de la matière organique dans les conditions naturelles

3.5. Propriétés physiques

Le sol comprend plusieurs constituants, entre autres : les minéraux primaires ou roches-mères, les argiles issues de l'altération de ces minéraux primaires, des composés organiques, de l'air et de l'eau, etc. La nature et la composition des minéraux primaires ainsi que la qualité de la matière organique déterminent le type et la fertilité du sol, en ce sens que les argiles et les composés humiques influencent la capacité d'échange cationique du sol, les quantités de bases échangeables, le taux d'éléments nutritifs, la capacité de rétention en eau, ainsi que le pouvoir de fixation des engrais.

3.5.1. Types d'argiles

Les argiles du sol sont de trois types, différenciés par leur réseau octaédrique qui est constitué soit de deux couches (minéraux di-octaédriques: 1/1) ou de trois couches (minéraux tétraédriques: 2/1) qui influencent leur capacité d'échange cationique. Leurs molécules sont chargées négativement, ce qui leur confère en fonction du type de réseau une capacité d'échange plus ou moins grande. A titre d'exemple, nous donnons ci-dessous les types d'argiles les plus courantes dans les sols:

- non gonglantes: Kaolinite (3-15 meq/100g); Halloysite 2H2O (5-10 meq/100g) et Sepiolite, Attapulgite, Palygorskite, (3-15 meq/100g;
- semi-gonflantes: Halloysite 4H2O(40-50/meq/100g), Illite (10-40 meq/100g) Chlorite (10-40 meq/100g);
- gonflantes: Smectites (80-150 meq/100g), Vermiculite (100-150meq/100g;

De part leur capacité d'échange cationique et selon leur importance dans le sol, ces argiles influencent les propriétés physicochimiques du sol et leur fertilité.

3.5.2. Texture

Les matériaux constitutifs du sol, suivant le degré d'altération des minéraux primaires sont constitués de particules de tailles différentes appelées particules et dont l'assemblage constitue la texture du sol. Il s'agit généralement de : argiles (diam <2microns), limons fins (2-20 microns), limons grossiers (20-50 microns), sables fins (50-200 microns) et sables grossiers (200-2000 microns).

La texture du sol se définit par les proportions relatives de particules de dimensions différentes. La texture peut s'apprécier sur le terrain ou être déduite de l'analyse granulométrique qui permet, précisément, de déterminer les proportions des diverses particules, réparties en classes de dimensions. Selon les proportions des différentes particules, on peut avoir :

- Texture fine argileuse (>70%), limoneuse (>90%),
- Texture moyenne (limons grossiers),
- Texture grossière sables (>90%),
- Textures complexes: constituées de l'association des différentes particules à des proportions plus ou moins équilibrées.

En matière d'utilisation des sols, la connaissance de la texture permet d'indiquer les tendances du sol quant à ses qualités physiques, par exemple:

- Les sols riches en sables sont perméables, filtrants, ce d'autant plus que le sable est grossier.
- Si la texture est composée d'éléments grossiers et beaucoup de sables fins et de limons, ceux-ci tendent à colmater les interstices entre les éléments grossiers, rendant ainsi le sol plus ou moins imperméable.
- Dans le cas de sols à fortes proportions d'argile, la présence de limons et de sables, surtout en présence d'humus, entraine la formation de structure fragmentaire, garantissant, à la fois, une perméabilité tout en retenant assez d'eau pour la végétation.

Les figures 3a & b ci-après donnent les différentes classes de texture selon le diagramme des textures constitué à partir des pourcentages (0-100) des particules représentant les côtés du triangle, ainsi que les histogrammes de la distribution des particules. Le10s donnés utilisées ont été obtenues à l'aide d'une analyse granulométrique d'un échantillon de sol.

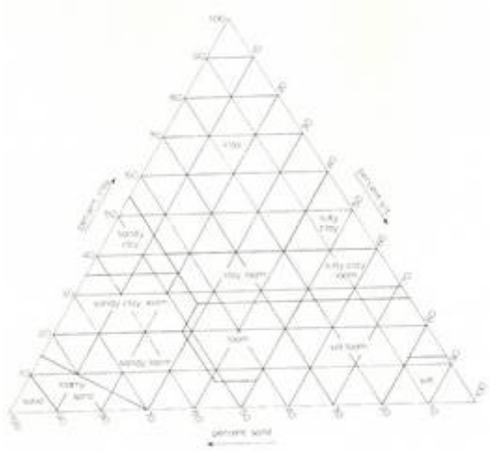


Figure 3a: Diagramme de texture (Source: USDA, 1962) Chaque côté du triangle représente le pourcentage d'une particule (argiles < 0,002mm; limons = 0,002-0,05mm; sables = 0,05-2mm).

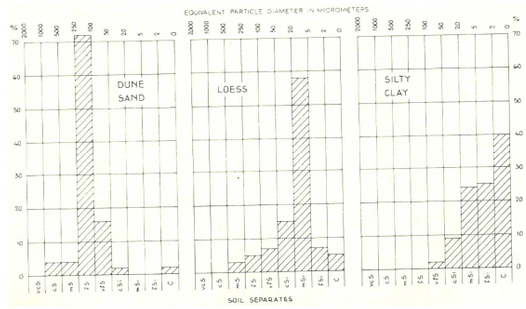


Figure 3b : Histogramme montrant la distribution des particules (en microns).

3.5.3. Structure

La structure d'un sol définit le mode d'agencement ou l'agrégation des différentes particules solides constituantes du sol (argiles, limons, sables) en composés ou mottes séparées par des fentes bien distinctes. Elle est due à la cimentation des grains grossiers (limons, sables) par éléments colloïdaux (argile et humus associés en complexes argilo-humiques). Elle est sujette à des modifications dans le temps, sous l'influence des facteurs favorables ou défavorables naturels et anthropiques.

La structure joue un rôle très important dans le comportement hydrodynamique et physico-chimique du sol. Elle détermine la porosité[12] du sol et par conséquent la capacité de circulation de l'air, pénétration des racines et d'infiltration de l'eau dans le profil.

La structure est généralement influencée par de multiples facteurs du milieu:

- **la matière organique** ou humus qui contribue à la formation d'agrégats organo-minéraux, sous forme de grumeaux fragiles;
- **les micro-organismes** dont l'action contribue à la formation de composés organo-minéraux qui améliorent la porosité du sol (micro et macroporosité);
- **la pluie**, qui par la force des gouttes d'eau qui tombent sur le sol peut causer une destruction de la structure du sol, soit par obstruction des pores à la surface du sol, soit par décapage de la partie supérieure du sol par l'érosion hydrique;
- **le travail du sol**, qui peut perturber ou détruire la structure originale lorsqu'il n'est pas fait dans les règles de l'art. Par contre, un bon travail manuel ou mécanique du sol accroit la macroporosité et l'infiltration de l'eau dans le sol;
- **la présence** en excès de produits nocifs (engrais à base sodium) qui peuvent entrainer une destruction de la structure. En effet, l'excès de sodium dans le sol cause une destruction de la structure par des phénomènes d'alcalinisation.

La structure joue un rôle très importation en ce qui concerne, notamment :

[12] : Porosité : c'est la proportion en % des vides ou pores par rapport à la densité volumique du sol

- **l'augmentation de la porosité du sol**, c'est-à-dire, le volume non occupé par les constituants solides du sol. La porosité du sol est d'importance primordiale pour la circulation de l'eau, de l'air et l'expansion des racines, ainsi que les activités biologiques (microflore, faune, microorganismes, etc.).
- **la résistance à l'érosion**: une bonne structure facilite l'infiltration des eaux des pluies et réduit le ruissellement à la surface du sol.
- **Les échanges thermiques** entre le sol et l'atmosphère.

Tableau 3 : Termes de caractérisation de la structure du sol

TERMES	TAILLE DES PARTICULES				
	TRÈS FINE	FINE	MOYENNE	GROSSIERE	TRES GROSSIERE
PLASTIQUE	<1	1-2	2-5	5-10	>10
PRISMATIQUE	<10	10-20	20-50	50-100	>100
COLUMNAIRE	<10	10-20	20-50	50-100	>100
ANGULAIRE	<5	5-10	10-20	20-50	>50
POLYEDRIQUE	<1	1-2	2-5	5-10	>10

3.5.4. Cohésion

La cohésion détermine la force d'assemblage des différentes particules (argiles, limons, sables, humus, etc.) et la résistance à la destruction mécanique. Elle dépend donc de la nature de la texture du sol, de l'humidité du sol et particulièrement le taux d'argile. Ainsi un sol argileux aura une plus forte consistance qu'un sol sableux.

Pour caractériser la cohésion sur le terrain, on soumet généralement un échantillon de sol à une pression à la main en le serrant fermement. Les termes utilisés pour définir la cohésion sont:

A l'état humide:
- Non collant : suite à une pression à la main, le sol n'adhère pas à la main; cas des sols sableux. A l'état sec, le sol est sous forme de particules séparées;
- Peu collant : laisse quelques traces sur les doigts, cas des sols sablo-argileux ou sablo-limoneux;
- Collant : adhère aux doigts et peut être malaxé et étiré à l'état humide. A l'état sec, le sol est très dur et peut former des mottes dures peu friables. C'est le cas des sols argileux ou limoneux (limons fins).
- Très collant : adhère très fortement aux doigts et est très malaxable. A l'état sec, le sol est très dur et difficile à travailler, surtout manuellement.

A l'état sec:
- Non-cohérent: cas des sols sableux
- Très friable: cas des sols sablo-argileux ou sablo-limoneux, donnant des mottes ou grumeaux très fragiles.
- Friable: cas des sols argilo-sableux ou limono-sableux, donnant des mottes fragiles et que l'on peut briser par pression aux doigts.
- Dur: cas des sols limoneux (limons fins) ou limono-argileux, donnant des mottes difficiles à détruire par pression aux doigts.
- Très dur: cas des sols argileux, donnant des mottes très difficiles à détruire

3.5.5. Perméabilité et infiltration

La perméabilité du sol, appelée aussi conductivité hydraulique caractérise la vitesse avec laquelle l'eau circule dans le sol quel que soit le sens de l'écoulement (horizontal ou vertical). Elle dépend des conditions auxquelles le sol est soumis. Par contre la vitesse d'infiltration cherche à définir la vitesse avec laquelle l'eau quitte la surface libre du sol pour percoler dans le profil et rejoindre la nappe.

La méthode de mesure de la vitesse d'infiltration reconnue comme étant la plus appropriée pour le dimensionnement des systèmes d'infiltration est la méthode de mesure in situ, à charge variable, à l'aide d'un cylindre (Muntz). La mesure doit être réalisée selon un protocole expérimental défini afin de fournir une valeur de vitesse d'infiltration la plus proche des conditions réelles de fonctionnement.

Les étapes suivantes décrivent la procédure d'un test standard:

1. creuser un trou de 15 cm de ø à la profondeur proposée pour le fond de la tranchée (généralement 0,8 m) le trou doit être cylindrique sur une hauteur minimum de 30 cm, dans la zone d'absorption prévue de sol ;
2. griffer les parois et le fond du trou afin de retrouver la texture naturelle du sol.
3. enlever toute la terre excédentaire à la surface du trou;
4. placer au fond du trou une couche de 5 cm de gravier fin (ø = 1,2 à 1,8 cm);
5. remplir le trou avec de l'eau claire sur une hauteur minimum de 30 cm ;
6. laisser le sol se pré-saturer pendant au moins 4 h mais de préférence pendant une nuit. L'eau doit être claire, exempte de produits organiques ou de fortes teneurs en sodium;

7. effectuer la mesure :

√ si l'eau demeure dans le trou après la période de pré-saturation. On ajuste la profondeur de l'eau à 15 cm. On mesure ensuite la baisse du niveau d'eau toutes les 30 minutes. Continuer l'essai jusqu'à ce que la dernière lecture soit identique à la précédente ou alors après 4 heures ;

√ s'il ne reste plus d'eau dans le trou après la période de pré-saturation, on ajoute 15 cm d'eau dans le trou. On mesure ensuite la baisse du niveau d'eau par intervalle de 30 minutes, et on ajuste la hauteur d'eau à 15 cm en apportant l'eau manquante. Continuer l'essai jusqu'à ce que la dernière lecture soit identique à la précédente ou alors après 4 heures;

√ si les 15 cm d'eau apportés ont disparu avant que le délai de 30 minutes ne se soit écoulé, dans ce cas, l'intervalle de temps entre les mesures doit être de dix minutes.

8. calculs: le taux de percolation (min/cm) = Temps (en minutes)/abaissement du niveau d'eau (cm).
9. au moins deux essais de percolation doivent être réalisés, un essai à chaque extrémité de l'emplacement proposé du système d'infiltration et à profondeur d'installation du système. Ils doivent être réalisés dans des conditions météorologiques normales, sans pluie ni gel.

La conversion des vitesses d'infiltration en vitesse d'application des eaux est approximative seulement (tableau 4)

Tableau 4: Corrélation entre la texture du matériau sol et sa vitesse d'infiltration.

TEXTURE DU MATÉRIAU (SOL)	**TAUX DE PERCOLATION (MIN/CM)** [1]	**VITESSE D'INFILTRATION (M/S)** [1]
Gravier, sable grossier	< 0,4	> 4.10^{-4}
Sable moyen	0,4 à 1,6	4.10^{-4} à 1.10^{-4}
Sable fin	1,6 à 2,1	1.10^{-4} à 8.10^{-5}
Sable limoneux	2,4 à 5,6	7.10^{-5} à 3.10^{-5}
Limon sableux	5,6 à 16,7	3.10^{-5} à 1.10^{-5}
Limon argileux	16,7 à 23,8	1.10^{-5} à 7.10^{-6}
Argile sablonneuse [3]	18,5 à 23,8	9.10^{-6} à 7.10^{-6}

Argile limoneuse	23,8 à 47,2	7.10^{-6} à 4.10^{-6}
Argile, marne	> 47,2	< 4.10^{-6}

3.5.6. Eau du sol

Différentes formes d'eau du sol

Lors d'une pluie les eaux qui tombent à la surface d'un sol subissent quatre processus: interception par le couvert végétal, infiltration, ruissellement, et évaporation. L'équation de la distribution de l'eau ou du bilan hydrique s'écrit comme suit:

$$\mathbf{P\ (mm) = C + I + R + E}$$

P = pluviométrie enregistrée pendant la durée de la pluie
C = eau interceptée par les canopées des plantes et arbres
I = quantité d'eau infiltrée dans le sol
R = quantité d'eau ruisselée
E = quantité d'eau évaporée directement

La partie qui s'infiltre dans le sol circule à travers la macroporosité (ø supérieur à 2µ) et remplit les macropores et les micropores. A cet effet, on distingue deux types d'eau :

- **Eau gravitaire**: c'est l'eau qui circule dans les macropores durant la pluie et qui se vident dès que la pluie s'arrête. On parle de ressuyage. Cette eau ne séjourne que peu de temps dans le sol, car elle est très facilement évaporée ou absorbable par les végétaux.
- **Eau capillaire**: elle correspond à l'eau retenue dans les micropores (ø 2µ) après ressuyage du sol. On parle de l'eau à la capacité au champ. Elle constitue les réserves hydriques du sol et qui vont alimenter les plantes.

Alimentation en eau des plantes

L'eau eau capillaire qui constitue les réserves hydriques du sol est plus ou moins fortement retenue dans le sol par des particules minérales et complexes organo-minéraux. Au fur et à mesure qu'elle est utilisée par la plante, sa disponibilité diminue du fait de la taille plus fine des pores. Pour satisfaire ses besoins en eau, la plante est donc obligée de développer une force énergétique pour pouvoir extraire les molécules d'eau fortement retenues par les particules. Cette force est connue sous le nom de la tension de l'eau. A ce stade, la plante doit fournir un effort de plus en plus grand pour se procurer l'eau dont elle a besoin.

Les réserves hydriques du sol peuvent se mesurer de deux manières :

- **Humidité actuelle du sol**: elle détermine l'importance des réserves hydriques, c'est-à-dire la quantité d'eau disponible pour les plantes. Elle se mesure à l'aide de pesées. On prélève un échantillon de 100g de sols que l'on met à sécher à 105 oC dans l'étuve ou à l'air libre après avoir mesuré le poids à l'état frais. On procède à des mesures du poids de l'échantillon séché jusqu'à l'obtention de poids constant. La différence entre le poids frais et le poids sec constant de l'échantillon constitue le poids de l'eau évaporée. Celui-ci est exprimé en pourcent de sol.

- **Potentiel capillaire**: l'eau contenue dans les micropores du sol est liée aux molécules minérales et organo-minérales par une certaine énergie appelée la force de tension ou force de succion. Cette force peut être appréciée au laboratoire par la mesure du POTENTIEL

CAPILLAIRE (**pF**[13]**:** flétrissement). Le potentiel capillaire définit l'énergie nécessaire pour déplacer les diverses formes d'eau des interstices du sol (eau capillaire). Cette énergie correspond à la hauteur d'une colonne d'eau et représente le logarithme de la colonne d'eau, exprimée en cm ou pour cent d'eau. On soumet un échantillon de sol à une pression atmosphérique, allant de 1 à 16 atmosphères. Généralement l'humidité de l'eau est mesurée à trois pressions différentes: pF4,2 (16 atmosphères, et correspondant au point de flétrissement des plantes); pF2,5 (1 atmosphère; correspondant au capacité au champ) et pF0 (0 atmosphère, correspondant au point de saturation des pores d'un sol non perturbé).

Les réserves hydriques potentielles (RHP) du sol sont estimées comme suit:

- Sols sableux : RHP (%) = pF2,5 – pF4,2/100;
- Sols argileux: RHP (%) = pF3,0 – pF4,2/100: la tension de l'eau est plus forte dans le sol argileux que dans un sol sableux.

Facteurs influençant les réserves hydriques et l'alimentation des plantes

L'alimentation en eau des plantes dépend de plusieurs facteurs:

- La profondeur (Pcm) du sol: joue un rôle important sur l'ancrage des plantes et le stockage de l'eau dans le sol. Les classes de références sont :

  √ Sol très superficiel : P < 15cm;
  √ Sol superficiel : P = 15-30 cm;
  √ Sol modérément superficiel : P = 30-60 cm;
  √ Sol moyennement profond : P = 60-90 cm;
  √ Sol profond : P = 90-120 cm;
  √ Sol très profond : P > 120 cm

- la quantité d'eau météorique infiltrée dans le sol qui varie en fonction notamment:

  ✓ du climat (quantité, nature et répartition des précipitations);
  ✓ des pertes par évaporation directe d'eau n'atteignant pas le sol (10-40% en forêt);
  ✓ du ruissellement en surface dépendant lui-même de la pente, de la porosité, de la texture, etc.;

- la quantité d'eau emmagasinée sur l'épaisseur correspondant au développement du système radiculaire et dépendant, entre-autres de:

  ✓ la texture;
  ✓ taux de matière organique,
  ✓ la perméabilité (galeries diverses),
  ✓ l'évaporation, etc.

La connaissance des réserves hydriques du sol et des facteurs influençant leur disponibilité est indispensable dans la mise en valeur agricole des terres, particulièrement dans le cas des aménagements hydro-agricoles et d'irrigation des sols.

3.6. Propriétés chimiques

3.6.1. Matière organique du sol

La matière organique brute est composée, entre autres, de :

[13]: pF = - logarithme du % de l'eau du sol

- Débris constitués d’organes végétaux très peu modifiés, non fragmentés portant des taches plus ou moins colorées ou décolorées;
- Résidus d’organes végétaux en voie de transformation, plus ou moins fragmentés, déchiquetés, décolorés, compactés en couches feutrées mais toujours identifiables à l'oeil nu;
- Substances fines constituées de matières très colorées (brun foncé-noir) ayant perdu toute trace, visible à l'oeil nu, d'organismes végétaux; pouvant s'accumuler en surface, en couches distinctes, ou être plus ou moins incorporées au substrat minéral.

L’humus est un bon reflet fidèle du pédoclimat, de la végétation colonisatrice et de l'ensemble des activités biologiques participant à la transformation de la matière organique. C'est pourquoi le type d’humus constitue un très bon critère de différenciation des horizons et renseigne sur les caractéristiques des conditions des stations naturelles (microclimat, végétation, etc.). Suivant ces conditions, le type de végétation et les processus et les agents d’humification, on distingue cinq types d'humus:

TYPES D’HUMUS	**CARACTÉRISTIQUES**
MULL	Humus de bonne qualité des forêts feuillues sur sol suffisamment riche et peu acide (aussi des bonnes terres de culture et des prairies). Disparition rapide des débris organiques apportés en surface. Formation abondante de complexes argilo-humiques (vers de terre). Minéralisation rapide. En forêt, à la fin de l'été, il n'y a pratiquement pas de litière: très mince couche L sur horizon humifère.
MODER	Humus dû, essentiellement, à l'action de petites espèces fauniques (larves d'insectes, vers Enchytréides, vers non fouisseurs). La masse de l'humus est constituée de fins débris coprogènes, plus ou moins remaniés. Plus riche en acides fulviques. Peu de complexes argilo-humiques. Les processus de décomposition-humification sont nettement ralentis et il y a formation d'horizons holorganiques (litière): couches L,F et H en proportions variables.
MOR	Humus formé en conditions climatiques et chimiques défavorables. L'action des champignons inférieurs est très importante. Peu de produits humiques de synthèse. La décomposition est très lente et il y a accumulation importante de litière brute: dominance de la couche F.
ANMOR	Humus formé en conditions semi-permanentes de saturation par l'eau et dû à l'activité alternée d'une microflore aérobie et anaérobie, d'une faune aquatique et terrestre. La décomposition est lente mais l'incorporation des substances fines au substrat minéral est très forte. il n'y a pratiquement pas de litière: un peu de L. L'anmoor est gris foncé à noir; gorgé d'eau, il présente un aspect boueux; il paraît terreux à l'état modérément humide (frais).
TOURBE	Humus formé en conditions de saturation quasi-permanente, à partir de végétations à base de mousses, de laîches, de roseaux, etc. La décomposition et l'humification sont très lentes et très incomplètes. Débris et résidus s'accumulent en couches épaisses (plusieurs mètres, parfois), constamment imbibées d'eau, à structure fibreuse.

Entre toutes ces formes, il existe plusieurs types intermédiaires liées à d'autres facteurs du milieu (exemple: moder mulleux, dysmoder, mull calcique, anmoor calcique).

L’humus fournit au sol des éléments nutritifs, notamment Ca++, K++, Mg++, N, P, S; des ions acides H+ et diverses substances humiques. La présence dans le sol de composés humiques et de colloïdes favorise la formation des complexes organo-minéraux hydrosolubles ou fixés sur le complexe absorbant du sol (argile, humus). Comme l’argile, les molécules de l’humus sont chargées négativement, ce qui leur confère un certain pouvoir absorbant d’éléments minéraux et diverses autres substances. Ainsi, plus le sol contiendra de l’humus eutrophe et d’argiles de type gonflant (2/1), plus il sera riche en éléments nutritifs. Et inversement, moins le sol sera riche en humus et en argiles de type non gonflant (1/1) fins, plus le pool des éléments nutritifs sera faible. L’humus joue dans le sol quatre fonctions essentielles, notamment:

- **Fonction pédogénétique**: désagrégation des roches et minéraux, horizons humiques du profil, migration des sesquioxydes;
- **Fonction physique**: thermoprotection superficielle (mulch), structuration et porosité du sol, protection contre certaines formes d'érosion;

- **Fonctions nutritives**: source d'éléments nutritifs libérés au cours de l'humification, contribution au pouvoir absorbant, répartition verticale des éléments nutritifs avec répercussions sur les activités radiculaires, attaque des réserves minérales du sol;
- **Fonction physico-chimique**: action sur l'acidité/alcalinité, action sur les phénomènes d'oxydoréduction.

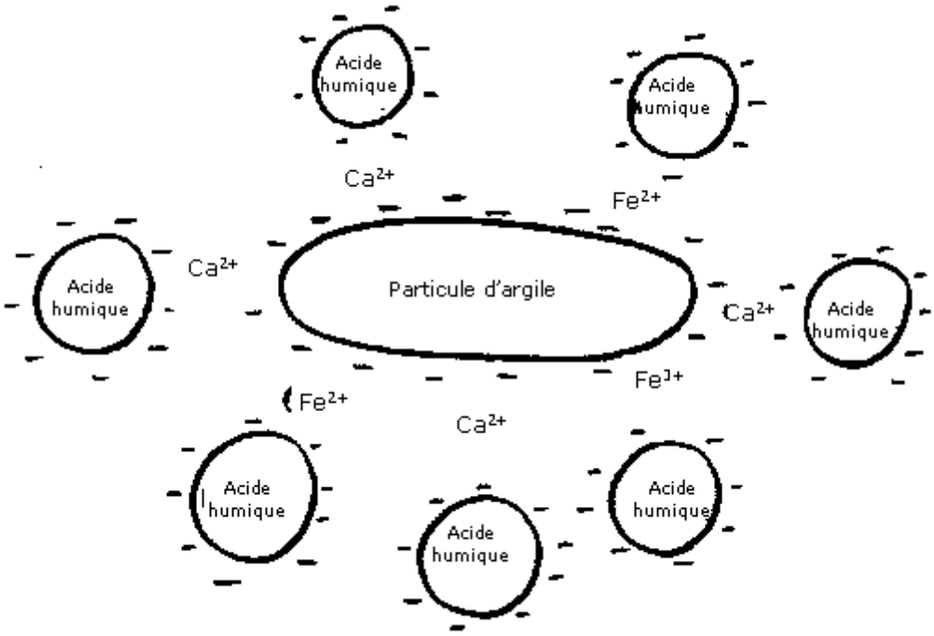


Figure 4. : Complexes argilo-humiques

3.6.2. pH

Le pH (potentiel d'hydrogène) mesure le degré d'acidité ou d'alcalinité du sol. Il détermine la quantité ou la concentration d'ions hydrogène contenus dans le sol. Les valeurs correspondent au logarithme négatif (10-1 à 10-12 mol/l) de la concentration des ions H+. Idéalement, le pH se mesure au moyen d'un potentiomètre, mais l'utilisation des méthodes colorimétriques de terrain peut donner des résultats suffisants, pour autant que l'on se contente de les interpréter en fonction de classes, assez larges, de valeurs (0.5 à 1 pH). Au laboratoire, les valeurs du pH standard sont mesurées à l'aide de pH-mètre dans une solution d'eau ou de KCl contenant 100g de sol sec dans un rapport de 2,5[14]. La différence entre le pH eau et le pH KCl donne la quantité d'acide libre du sol. Sur le terrain on peut utiliser un pH-mètre portatif ou du papier pH (qui donne des couleurs de référence pour la lecture des valeurs approximatives de pH). Le tableau 5 ci-après donne les différentes classes de pH, ainsi que les couleurs de papier pH correspondant aux différentes classes.

Tableau 5a: Caractérisation et valeurs de pH, ainsi que les couleurs correspondantes de papier pH servant à la mesure du pH sur le terrain.

Caractérisation	pH2,5 (eau)	Papier pH (Couleur)
Hyper acide	< 4,5	Rouge

[14] : Dans le cas des sols salés ou alcalins la mesure du pH peut se faire dans des solutions saturées (1 :1 ou 1 :1,5) lorsque l'on veut mesurer en même temps la salinité ou l'alcalinité.

Très acide Moyennement acide	5,1-5,0 5,6-6,0	Orange
Acide Peu Acide	6,1-6,5 6,5-6,9	Jaune
Neutre Alcalin Moyennement alcalin	7,0 7,1-7,3 7,4-7,8	Jaune/vert
Modérément alcalin Très alcalin Hyper alcalin	7,9-8,4 8,5-9,0 >9,0	Vert Bleu Mauve

Tableau 5b : pH optimum pour les différentes cultures

CULTURES	ZONE DE pH OPTIMUM
Manioc	5,0-7,0
Maïs	5,5-7,0
Riz	5,0-6,5
Haricot	6,0-7,5
Niébé	5,0-6,5
Arachide	5,2-6,5
Soja	6,5-7,0
Pomme de terre	5,5-6,5
Canne à sucre	6,0-8,0
Banane	5,0-7,0

Source : FAO(1996), RDC

Acidité du sol

Rappelons qu'un milieu acide est caractérisé par la présence d'ions H+ et un milieu alcalin, par la présence d'ions OH+. Lorsque ces deux types d'ions sont en proportions équivalentes, le milieu est dit neutre.

Tableau 6 : Formes d'acidité du sol

FORMES D'ACIDITE DU SOL	DÉFINITION
ACIDITÉ ACTUELLE	Reflète la quantité d'ions H présents dans la solution du sol. Elle s'exprime par le pH ou le titrage d'un extrait aqueux de sol.
ACIDITÉ D'ÉCHANGE	Représente la somme des ions H présents dans la solution et dans la phase échangeable du sol. Elle est exprimée par le pH ou le titrage d'un extrait salin de sol. Cette expression paraît la plus intéressante, du point de vue écologique, car elle intéresse des échanges se passant dans les conditions naturelles du sol.
ACIDITÉ TOTALE	Représente la quantité totale d'ions H dissociables et titrables par une base forte. Exprimée par le titrage d'un extrait salin de sol à pH élevé.
ACIDITÉ POTENTIELLE	Représente la qualité d'ions H dissociables au delà du pH naturel du sol, au fur et à mesure de la neutralisation. Exprimée par différence

	entre acidité totale et acidité d'échange.

Expressions du pH sur les cultures

Le pH du sol revêt une grande importance capitale en matière d'utilisation des sols, car au fur et à mesure que les éléments nutritifs sont prélevés par les plantes, le sol tend à s'acidifier. Il est à la fois un bon indicateur de l'acidité et de la fertilité du sol.

Il faut signaler que la tolérance au pH des cultures est fonction de leur capacité à tolérer dans le complexe d'échange un excès d'ions acides (H+, Al++, Fe+++, etc.) ou alcalins (Na+, CO3-). La majeure partie des espèces végétales et des microorganismes se développement convenablement dans des sols à pH de 6-7,5 qui offrent de meilleure disponibilité en éléments nutritifs.

Les valeurs extrêmes de pH acides (<4,5) conduisent à des concentrations excessives d'ions toxiques tels que l'aluminium (Al), manganèse (Mn) et les protons H+, alors que les pH alcalins (>9,0) entrainent une toxicité en ions NH3, Na+, CaCO3. Certaines cultures peuvent s'accommoder de sols acides, mais leurs rendements s'en trouvent affectés, notamment: Hévéa (pH3,5), thé (4,0), caféier (4,5), pomme de terre (4,8), riz, sorgho, mil, coton, ananas, petit pois, patate douce (pH5,0), maïs, tabac, arachide, aubergine, tomate, courge et laitue (pH5,5). Seules quelques espèces peuvent se développer dans des sols à pH de 7,6-8,0: coton, hévéa, canne à sucre, blé, etc.

3.6.3. Capacité d'échange cationique

Le pouvoir d'absorption en éléments du sol est connu sous le nom de capacité d'échange cationique (CEC). Il est exprimé en milléquivalents grammes pour 100 g de sol. Il dépend de plusieurs paramètres dont les principaux sont la nature et la proportion des argiles, ainsi que le taux et la qualité de l'humus. Les composés organiques (complexes argilo-humiques) ont une grande capacité d'absorption d'éléments qui fait que leur présence dans le sol a tendance à augmenter la CEC.

La CEC est mesurée au laboratoire sur des pH 8,2 ou pH7,0. Elle est généralement désignée par la lettre T.

Les différents éléments hydrosolubles dans le sol sont composés de (i) bases échangeables constituées essentiellement de calcium (ca++, Mg++, K=, Na+, etc.) dont la somme est désignée par la lettre S et (ii) anions. Les valeurs sont exprimées en milliéquivalents pour 100g de sol).

Le rapport entre la CEC et la somme des bases (S) détermine le taux de saturation en base: V = S/T. Cette valeur est très importante dans l'interprétation des résultats d'analyse chimique, de la fertilité et l'utilisation dus sol. Plus le pH est acide, plus ce taux est bas. Généralement les sols à pH compris entre 6,0-7,5 ont des taux de saturation assez bons, supérieurs à 50%.

Tableau 7: Valeurs de CEC, S et V, en fonction du pH

CLASSES	CEC pH (8,2) (T meq/100g)	SOMME DES BASES ECHANGEABLES (S meq/100g)	TAUX DE SATURATION (V%)	pH EAU CORRESPONDANTS
Très élevé	> 40	> 30	81-100	6,5-7,2
Élevé	26-40	15-30	61-80	6,0-6,5
Moyen	13-25	7,5-15	41-60	5,5-6,0
Faible	6-12	3,0-7,5	21-40	5,0-5,5

Très faible	< 6	< 3,0	< 20	< 5,0

3.6.4. Salinité/Alcalinité

La salinité et l'alcalinité sont des situations rencontrées dans des cas spécifiques de sols dont la formation ou l'évolution est influencée par la présence de sels solubles de chlorures ou de sodium. Leur présence dans le sol affecte les propriétés chimiques et physiques (sols alcalins) de celui-ci.

La salinité est mesurée au laboratoire à l'aide de conductivimètre ou salinomètre sur des extraits de sol dans un rapport de sol/eau de 1 :1 ou 1 :1,5. Sur le terrain on utilise des conductivimètres ou salinomètres portatifs.

Tableau 8: Limites des classes de salinité des sols

CLASSES	**SELS** (Résidus secs, en %)	**C.E** (ms/cm)	**CL-** (mg/l: extrait saturé)	**REMARQUES**
Classe 0 : non salé	0-0,06	0-2	0-700	aucun effet
	0,06-0,15	2-4	700-1600	affectent cultures sensibles
Classe 1 : peu salé	0,15-0,35	4-8	1600-3400	affectent plusieurs cultures
Classe 2 : salé	0,35-0,65	8-16	3400-6900	Cultures tolérantes
Classe 3 : très salé	> 0,65	> 16	> 6900	Cultures très tolérantes

Source : USAID (1954)

L'irrigation des sols limoneux et argileux ou la remontée d'une nappe phréatique à eau chargée en sodium (Na+) entraine la dégradation de la structure du sol par des processus d'alcalinisation. Le calcul du taux de fixation de l'ion sodium sur le complexe d'échange se fait à partir des résultats d'analyse de laboratoire sur des extraits saturés de sol, à l'aide de la formule:

TSE (ESP): Na+ (meq/100 g sol) x 100/CEC (meq/100 g sol)

L'alcalinisation survient généralement en cas d'irrigation ou drainage non maîtrisé du sol, notamment argileux ou limoneux (limons fins). A titre d'exemple, les argiles de type montmorillonite (2/1) ont un taux de saturation de 8%, illite-vermiculite 15% et Kaolinite 22%.

Dans le cas d'un aménagement sous irrigation des sols argileux ou limoneux, il est important de calculer le taux d'absorption du sodium. A partir des résultats d'analyse des extraits saturés de sels ou de l'eau d'irrigation, on procède au calcul du TAS (plus connu sous le nom de SAR), par la formule:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{([Ca^{2+}]+[Mg^{2+}])}{2}}}$$

Na+ + : concentration du Sodium dans l'extrait (meq/l)
Ca++ : concentration du calcium dans l'extrait (meq/l
Mg++ : Concentration du magnésium dans l'extrait (meq/l)

Les deux équations sont liées par l'équation:

ESP (TSE) = 100 (0,0126 + 0,01475 x SAR)/1 + (-0,0126 + 0,01475 x SAR)

ESP (TSE) et SAR (TAS) varient en fonction des variations de la concentration des différents éléments. Elles diminuent avec la diminution de Na+ ou lorsque les concentrations de Ca++ et Mg++ augmentent.

Il faut distinguer les sols salés alcalins (pH > 8,5 et CE >4 mS/cm, SAR<13) des sols alcalins non salés (pH > 8,5 et CE <4 mS/cm, avec SAR > 13).

3.7. Classification

Il existe plusieurs systèmes de classification des sols dont trois sont les plus couramment utilisés à travers le monde: la Classification américaine (USDA, 1978), la Classification Française (CPCS, 1974; AFES, 1995) et la Classification mondiale des sols de la FAO (1975). Ces systèmes diffèrent les uns des autres par leurs critères et objectifs de classification.

3.7.1. Classification française

Ce système est basé sur une série de critères hiérarchisés et détaillés de classification. L'approche est basée sur la définition unités de classification successives sont:

- Ordre: basé sur le stade d'évolution du profil. Il permet, notamment, de distinguer des sols jeunes, immatures et matures, des sols zonaux et des sols azonaux en équilibre avec les conditions du milieu (pédoclimat).

- Classe: basée sur (i) le mode d'altération des minéraux, (ii) les propriétés d'humidification, (iii) la présence de Gley ou pseudogley (hydromorphie), (iv) la présence de sel (halomorphie).

- Groupe : basé, notamment, sur la différenciation en horizons.

3.7.2. Classification américaine (U.S.A).

Les critères de classification sont basés sur la notion d'*horizons de diagnostic*. Ceux-ci étant définis, décrits et analysés selon des normes bien déterminées et standardisées basées sur des objectifs précis d'utilisation du sol. Ces horizons de diagnostic se répartissent en deux groupes:

- les horizons de surface ou "**épipédon**": englobant les horizons superficiels du profil, où la présence de matière organique est directement décelable;
- les horizons de profondeur : horizons B et horizons C (moindre degré).

3.7.3. Classification F.A.O-UNESCO (1985[15]).

Le système de classification de la F.A.O est une synthèse des différentes classifications pratiquées par les pédologues. Elle se base sur l'existence d'horizons de diagnostic (USDA) et l'usage des noms empruntés aux autres systèmes. C'est ce système qui a été utilisé dans la classification pour la carte des sols du monde (1975).

Il comporte 26 ordres, dont les plus communs sont:

- **Fluviols**: sols formés sur alluvions récentes;
- **Gleysols**: sols humides;
- **Régosols**: sols non évolués;
- **Rendzines**: sols à horizon mollique reposant directement sur une roche-mère calcaire;
- **Cambisols**: sols à horizon cambique (Bw ou (B))
- **Luvisols**: sols à horizon argillique (Bt);
- **Ferralsols**: sols tropicaux ferrallitiques et ferrugineux;

[15] : Légende de la carte mondiale des sols, Echelle : 1,5 million

- **Histosols**: sols à horizon histique (sols organique)
- **Andosols** : sols formés sur des cendres volcaniques.

Compte tenu du fait que les trois pays concernés par les projets PNSA et que la majeure partie des pays de l'Afrique centrale utilisent la classification française, nous reproduisons ici les principales classes définies par ce système, selon le Référentiel Pédologique de 1995. Dans la mesure du possible, les correspondants avec la classification de la F.A.O sont donnés entre parenthèse:

1. Sols minéraux bruts: formés sur des matériaux non ou très peu altérés mis en place récemment ou en cours de dépôt. Le profil a deux horizons peu nets, de type (A)C ou (A)R. C'est le cas des dunes de sables ou des colluvions et éboulis rocheux.

2. Sols peu évolués: amorce des processus pédogénétiques par une faible altération des minéraux, la présence de matière organique. Le profil a deux types d'horizons distincts mais plus nets que dans le cas précédents et de type AC ou AR. Leur évolution est freinée soit par des apports fréquents d'alluvions et de colluvions, soit par des phénomènes d'érosion par décapage de la partie supérieure.
3. Colluviosols: sur colluvions de pente formées de portions de sols érodés et de roches altérées ou non.
4. Fluviosols: sur alluvions fluviatiles; profils à horizon de type J ou A sur une roche meuble à base de limons et de graviers (M).
5. Sols bruns subarides: formés sous climat tropical aride à saison sèche marquée
6. Sols Bruns eutrophes (Cambisols, FAO) : de couleur brune foncée dans la partie supérieure, avec un profil de type ABC
7. Sols tropicaux ferrugineux (U.S.D.A : Ultisols; F.A.O.: Ferrasols)
8. Sols tropicaux ferrallitiques (U.S.D.A. Ultisols, Oxisols; F.A.O.: Ferralsols)
9. Sols calcimagnésiques: formés sur roches-mères calcaire ou calcaro-magnésiennes, sous une végétation d'espèces diverses, avec un humus mull eutrophe ou mull calcique. Le profil est detype AR, AC, A(B)r or A(B)C
10. Vertisols (U.S.D.A.: Vertisols; F.A.O.: Andosols): formés sous climat chaud, avec une saison sèche marquée, la présence de fortes proportions d'argiles gonflantes (montmorillonite). Le profil est du type A(B)C, A(B)gC; A(B)Cg;
11. Andosols (U.S.D.A.: Andepts; F.A.O.: Andosols): sols dérivés de cendres volcaniques. Le profil est de type A(B)C
12. Sols hydromorphes (U.S.D.A.: Préfixe Aqu-; F.A.O.: Gleysols): sols dont la formation et l'évolution sont influencées par des conditions d'excès d'eau liées à la présence d'une nappe aquifère et qui entrainent des réductions chimiques. On distingue :

    - Sols à Gley: nappe aquifère plus ou moins permanente (engorgement pendant plus ou moins 9 mois par an); humus hydromull, hydromoder, anmoor.
    - Sols à pseudogley: nappe aquifère temporaire (nappe perchée, frange de battement surmontant une nappe permanente); avec une alternance de périodes sèches de réduction) et humides d'oxydation; ce qui confère au profil un aspect tacheté ou panaché.

13. Sols hydromorphes tourbeux (U.S.D.A.: Histosols; F.A.O.: Histosols): ce sont des sols imbibés d'eau et constitués de matière organique tourbeuse, avec des horizons holorganiques H, épais parfois de plusieurs mètres. Ils sont caractéristiques des zones humides des lacs ou rivières à végétation de cypéracées ou de papyrus.
14. Sols halomorphes (U.S.D.A.: préfixes Natr-, Sulf-; F.A.O.: Halosols): la formation de ces sols est dominée par la présence de quantités importantes de sels de chlorures, sulfates ou de carbonates. Leur formation peut aussi être liée soit (i) à la présence d'une nappe aquifère salée (mers, lacs salés), (ii) à des dépôts de matériaux d'apports éoliens ou présence de roche-mère saline (d'origine géologique), sous un climat aride et semi-aride. Ils se rencontrent principalement dans les climats arides et semi-arides principalement dans les sebkhas continentales, les lacs, les tannes des estuaires, les zones de mangroves le long du

littoral et dans les zones deltaïques même des climats humides comme ceux de l’Afrique centrale. La végétation qui s'y installe est dite halophyte et peut supporter de fortes pressions osmotiques. Au niveau des mangroves, le sol est souvent de couleur noirâtre, pH neutre quand ils sont encore engorgés d’eau.

CHAPITRE 4 : EVALUATION DES SOLS ET CHOIX DES SITES

La fonction de l'évaluation des terres[16] est précisément de faire comprendre ces relations et de permettre aux planificateurs de comparer les modes d'utilisation les plus prometteurs.

L'évaluation des terres a pour objet de juger du comportement de la terre lorsqu'on l'utilise à certaines fins. Elle suppose l'exécution et l'interprétation d'études de base sur le climat, les sols, la végétation et ainsi de suite, en fonction des exigences de diverses utilisations.

Avant d'entreprendre une évaluation, il convient tout d'abord reconnaître la nécessité de modifier l'usage que l'on en fait, tel que l'élaboration de nouveaux types d'utilisation productive, par ex. des projets de production agricole, projet de plantation, etc. Une fois cette nécessité reconnue, on procède à la définition des objectifs de la formulation du projet.

4.1. Principes spécifiques

L'aptitude des terres est évaluée et classée en fonction de modes précis d'utilisation:

- En effet, l'évaluation des aptitudes des terres n'a de sens qu'en termes de modes d'utilisation précis, dans la mesure où chaque mode peut avoir ses propres exigent ces (humidité du sol, profondeur d'enracinement, etc.);

- L'évaluation des terres demande la comparaison des avantages obtenus par rapport aux inputs exigés par les différents types de terres : il s'agit de comparer les apports nécessaires avec les produits ou autres avantages obtenus;

- Une approche multidisciplinaire s'impose : l'évaluation des terres fait appel à plusieurs disciplines et de ce fait doit comprendre plusieurs spécialistes (pédologues, agronomes, génie rural, irrigation, sociologues, etc.);

Principe fondamental 1 :
Bonne connaissance des sols

L'exploitation durable des sols ne peut se réaliser que si l'on a une bonne connaissance des sols, de leur potentiel d'irrigation, leurs aptitudes culturales et productivité; ce qui n'est pas le cas présentement. Il importera donc à que les gouvernements, à travers leurs structures compétentes, prennent des mesures nécessaires permettant la mise en œuvre de programme d'actions prioritaires d'évaluation des aptitudes agricoles des terres et de promotion des technologies modernes de production agricoles.

- L'évaluation doit tenir compte des caractéristiques physiques, économiques et sociales de la zone en question. Il faut tenir compte des facteurs tels que climat, les niveaux de la vie de la population, la disponibilité et le coût de la main-d'œuvre, la situation de l'emploi, le marché local et d'exportation, les systèmes de régimes fonciers acceptables du point de vue social et politique et la disponibilité des capitaux;

- L'aptitude doit être déterminée sur une base d'une utilisation continue: il faut tenir compte de la dégradation de l'environnement et les risques des différentes actions;

- L'évaluation des terres exige que l'on compare plusieurs modes d'utilisation: entre agriculture, forestière ou pastorale.

4.2. Buts de l'évaluation des terres

L'évaluation doit porter sur le comportement actuel dans certains cas, des modifications à l'utilisation et parfois à la terre elle-même, ainsi que leurs effets. Elle prend en considération les aspects économiques des activités proposées, leurs conséquences sociales pour la population et répondre aux questions suivantes:

[16]: La terre désigne l'environnement physique, y compris le climat, le relief, les sols, l'hydrologie et la végétation naturelle.

- Comment la terre est-elle aménagée et qu'adviendra-t-il si les techniques actuelles restent inchangées?
- Quelles sont les améliorations que l'on pourrait apporter aux techniques actuelles d'aménagement des terres, tout en continuant à les utiliser de la même manière?
- Quels autres modes d'utilisation sont physiquement possibles et économiquement et socialement compatibles?
- Lesquels offrent des possibilités de production continue ou autres avantages?
- Quels sont les effets nuisibles, physiques, économiques et sociaux, présentés par chaque mode d'utilisation?
- Quels sont les intrants renouvelables et non renouvelables?
- Quels sont les avantages présentés?
- Quelles sont les modifications possibles?

Le processus d'évaluation n'entend pas déterminer les modifications qu'il faut apporter à tel ou tel mode d'utilisation, mais fournit plutôt des données permettant de prendre des décisions à ce sujet. Elle doit permettre de:

- Formuler des propositions offrant plusieurs utilisations possibles et établir leurs principales exigences;
- Identifier et délimiter les différents types de terres de la zone en question;
- Comparer et évaluer chaque type de terre en fonction des différents modes d'utilisation.

4.3. Études nécessaires

Dans le cas d'une évaluation détaillée et à grande échelle, on procède en trois étapes jugées nécessaires, à savoir:

- Études de reconnaissance: elles consistent à faire l'inventaire général des ressources et des possibilités de mise en valeur au risque régional et national, en se limitant à une évaluation qualitative;
- Études semi-détaillées: les objectifs sont plus précis principalement la faisabilité de projets de mise en valeur et peuvent comporter des enquêtes agricoles, l'analyse économique et des aspects quantitatifs;
- Études détaillées: concerne principalement la planification et à la conception effective, ou encore à l'organisation des exploitations.

4.4. Approche méthodologique

L'évaluation comprend trois phases principales et plusieurs étapes.

4.4.1. Phase préparatoire

Etape 1: Listing des informations et données nécessaires

Avant la phase terrain, on procède tout d'abord à l'élaboration d'un listing des documents, matériels, informations et données nécessaires à la réalisation de l'évaluation, devant comprendre:

- cartographies, photographies, images satellites
- études et rapports techniques
- relief, topographie, géomorphologie, hydrologie, etc.,
- données climatiques
- utilisation des terres et mode de gestion
- défrichements
- préparation du sol
- cultures pratiquées, systèmes de production, calendrier cultural, rendements, etc.,

- ppropriétés physiques des sols (texture, structure, cohésion, profondeur, perméabilité, infiltration, réserves hydriques, etc.)
- propriétés chimiques des sols (pH, CEC, S/T, salinité, alcalinité, etc.)
- fertilité des différents sols (éléments nutritifs, matière organique, C/N, etc.)
- réserves hydriques
- profondeur d'enracinement
- conditions de germination
- facilité de travail du terrain
- sensibilité des terres à l'érosion, degré d'érodabilité, formes d'érosion, etc.
- types de dégradation des sols
- nappes et risques d'engorgement ou d'inondation
- Fiches de description du paysage et des sols.

Etape 2: Rassemblement et connaissance des documents de référence

Il s'agit de procéder à une collecte d'informations et de données auprès des services techniques et administratifs de la zone d'étude:

- **cartes** : géographiques, topographiques, d'occupation des sols, végétation, etc. ;
- **documents techniques**: études monographiques, utilisation des sols, production agricole, rapports de missions, projets, politique, code foncier et textes réglementant l'accès aux ressources naturelles, etc.

Etape 3: Préparation du maillage de sondage

Etape 4: Inventaire de matériel de terrain nécessaire

1. Récepteur GPS
2. Boussole
3. Clisimètre,
4. Altimètre
5. Table de l'échelle des couleurs des sols
6. Appareil photo (facultatif)
7. Ruban ou règle à mesurer en bois (150 cm)
8. Ruban métrique de 50m
9. Flacons en plastiques (mesure de pH in situ, prélèvement d'échantillons d'eau)
10. Sachets plastiques (prélèvement d'échantillons d'eau de nappe)
11. pH-mètre
12. Papier indicateur de pH
13. salinomètre
14. Flacon plastique contenant du vinaigre blanc
15. Flacon plastique contenant de l'eau du robinet
16. Truelle
17. Bêche ou pelle
18. Tarière pédologique
19. Pioche de géologue
20. Marqueur indélébile
21. Étiquettes
22. Fiches de description des profils

4.4.4. Phase de terrain

La démarche consiste à procéder sur le terrain à:

- Auteur de la description
- Date de description

- Identifier le profil: numéro, position (coordonnées géographiques, chemin d'accès, agglomération la plus proche, etc.)
- Positionner le n° des profils sur la carte de prospection ou sur les photos aériennes utilisées
- Décrire l'environnement du profil : topographie, végétation, état des surfaces, utilisation actuelle, etc.

Etape 5: Description du milieu biophysique

Données sur l'environnement

Il s'agit de décrire les différentes formes de relief et de paysages au niveau du bassin versant, collecter des données, entre autres:

- topographie (pentes, altitudes, etc.),
- unités de paysages (talwegs, vallées, bas-fonds, versants, etc.),
- hydrologie (cours temporaires et permanents),
- végétation, ainsi que les documents cartographiques références et rapports (études techniques, etc.).

Données climatiques

Il s'agit de collecter auprès des services météorologiques de la zone d'étude, les données sur le climat général:

- pluviométrie mensuelle et annuelle (Pmm),
- intensité horaire des pluies,
- durée de la saison des pluies,
- différentes saisons de la zone,
- températures (moyennes, minimales, maximales mensuelles en degré Celsius),
- humidité (moyenne, minimale et maximale mensuelle),
- vitesse des vents (m/s),
- évapotranspiration potentielle (ETP) et/ou évaporation (PICH)

La signification de ces données est leur conséquence sur les réserves hydriques du sol. A partir des données collectées, on peut estimer le drainage (D), c'est-à-dire la quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol. Il est estimé à l'aide de la formule dite «Hénin-Aubert»:

$$D_{(mm)} = YP3/1 + YP2$$

P en mm/an,
Y=@/0,15T-0.13: @ = 0,5 (sol argileux) et 2 (sol sableux).
T=température moyenne,

Données socio-économiques

Il s'agit de collecter des données sur:
- population et nombre de ménages,
- types d'exploitation agricole,
- utilisation des terres, mode de gestion foncière, principales cultures et rendements, autres activités,
- systèmes de production ;
- spéculations pratiquées par les paysans et superficies emblavées par les différents exploitants

- estimation des revenus agricoles et hors champ,
- analyse sommaire des caractéristiques des différentes zones agro-écologiques,
- intrants agricoles : semences, engrais, matière organique, pesticides, etc.
- matériel agricole utilisé par les paysans
- inventaire des différents marchés existant dans la zone et leur mode de fonctionnement, etc.

Etape 6: Description des sols

La description des sols se fait au moyen d'un profil. Il s'agit d'ouvrir une section verticale dans le sol, de dimensions: 120-150 cm de profondeur, 100-120 cm pour le côté opposé au soleil et 100 cm pour les deux autres côtés. Elle consiste à :

- différencier les différents horizons ((Ah, E, Bt, C, 2C, R, M, F, etc.) à l'aide de changements de la couleur, la quantité de racines, la taille et le nombre de cailloux ou gravillons, la présence ou non d'activité biologique (mésofaune, galeries de vers de terre et de termites, etc.);
- numéroter les horizons, le premier étant celui qui affleure la surface et le dernier celui au fond du profil;
- mesurer l'épaisseur de chaque horizon (cm), en précisant où se situe son début et sa fin. Si l'épaisseur d'un horizon est inférieur à 3cm, inclus-le avec le précédant ou le suivant, selon la plus proche ressemblance;
- déterminer la couleur de chaque horizon (à l'œil nu ou code Munsell);
- signaler la présence de matière organique
- apprécier la texture de chaque horizon, par la sensation tactile produite par un échantillon de sol en le frottant entre les doigts ou sur la paume de la main: argileuse (A), sableuse (S), limoneuse (L), Sablo-argileuse, Limono-argileuse, Argilo-sableuse, Argilo-limoneuse, Limono-sableuse, Sablo-limoneuse;
- apprécier le degré de pierrosité (abondance de cailloux…);
- apprécier sa structure: la façon dont les constituants du sol sont assemblés, en utilisant les termes: massive, prismatique, polyédrique, angulaire, etc.
- apprécier la consistance/cohésion: lâche, friable, ferme, extrêmement ferme, molle, pâteuse, plastique, etc.
- noter la présence d'autres caractéristiques : revêtements, pores, taches, concrétions, nodules calcaire, sels, etc.
- tester la présence de calcaire : en cas de présence de nodules dans le profil on procède à un test d'effervescence à l'aide de l'acide chlorhydrique sur la terre et les concrétions et observer les effervescences déterminer la présence et nature d'activité biologique (présence de racines, de galeries d'animaux, etc.);
- déterminer la transition des horizons vers les horizons sous-jacents: nette, graduelle, rectiligne, ondulée, etc.;
- faire une esquisse de classification soit sur la base de la classification pédologique (§3.7: FAO, AFES) ou sur la base de la texture : sols argileux, sols sableux, sols limoneux, sols sablo-argilieu, etc.

Etape 7: Prélèvement des échantillons

A la fin de la description morphologique, lorsque l'on désire effectuer des analyses au laboratoire, on procède à des prélèvements d'échantillons de sol au niveau des différents horizons. La démarche consiste à :

- pour chaque horizon prélever des échantillons, de bas en haut, en commençant par le dernier horizon du profil. Ceci permet d'éviter la contamination des échantillons.
- Mettre les échantillons dans des sacs plastiques portant le no du profil, l'horizon et la date, au moyen d'étiquettes ou de marqueur.

Etape 8: Evaluation du niveau de la nappe

Lorsque l'évaluation est faite à des fins d'irrigation, il est important de connaître la profondeur, la distribution et la qualité de l'eau de la nappe phréatique.

Il est admis qu'une épaisseur de sol non saturé d'au moins 100 cm peut entrainer des risques de remontée de la nappe phréatique lors que l'irrigation conduit à une forte infiltration régulière d'eau dans le sol. Cette remontée entraine des modifications notables sur la qualité du sol et son utilisation, notamment en présence d'une nappe d'eau salée ou alcaline.

Pour ce faire, il est donc important d'évaluer le niveau et l'impact de la remontée de la nappe avant de se lancer dans tout processus d'aménagement et d'irrigation des terres.

Des sondages à la tarière (10 cm de diamètre) sont alors menés au niveau du bassin versant avec un maillage de 1 sondage pour ½ - 1 ha, jusqu'à atteindre la nappe phréatique. La profondeur de sondage dépend de la nature du terrain, mais elle est généralement de 150-200 cm.

4.4.5. Phase d'analyse et de synthèse au bureau

Étape 9: Analyse de laboratoire

Si cela est nécessaire, les échantillons prélevés sur le terrain sont analysés au laboratoire pour déterminer les différents paramètres:

- pH et acidité
- granulométrie: sables grossiers, sables fins, limons grossiers, limons fins et argiles
- matière organique : totale, carbone et Azote, rapport C/N
- capacité d'échange cationique (CEC) ou T
- somme des bases échangeables (S): Ca++, Mg++, K+, Na+
- taux de saturation du sol, selon les différents horizons : Rapport S/Tx100
- réserves hydriques du sol :
  - ✓ Humidité du sol
  - ✓ Potentiel capillaire et eau utile
- Salinité : conductivité électrique (mS/cm)
- Alcalinité

Étape 10 : Dépouillement et synthèse des résultats

Les résultats des études de terrain et d'analyse sont dépouillés et mis en cohérence en procédant à la synthèse des différents paramètres. En fonction des facteurs favorables et des contraintes des sols (§3.5 et §3.6), on procède à l'évaluation des aptitudes agricoles et culturales des sols, en les regroupant en classes homogènes (§4.5).

Lorsque l'établissement d'une carte pédologique est requis, on procède au dessin de la carte des sols ou des aptitudes des sols, sur la base des classes d'aptitudes définies.

4.5. Classes des aptitudes

Il existe plusieurs types de classifications d'aptitudes et d'utilisation des terres, notamment FAO, USAID, CPCS/AFES, etc. Nous utiliserons dans ce qui suit les directives de la classification de la FAO (1976). La FAO distingue quatre niveaux de classification:

1. Ordre d'aptitude des terres : indique les types d'aptitudes (agricoles, forestières, pastorales, etc.). On distingue deux ordres :
   - S : terres aptes à la production agricole
   - N : terres inaptes (dans les conditions actuelles).
2. Classe d'aptitude des terres : indique les degrés d'aptitudes à l'intérieur d'un ordre

3. Sous-classes d'aptitude des terres : indique les types de limitations ou les principaux types d'amélioration nécessaire à l'intérieur d'une classe
4. Unité d'aptitude des terres : indique les différences mineures d'aménagement à l'intérieur d'une sous classe.

Les meilleurs sols sont ceux à texture plus ou moins équlibrée (avec 25-35% d'argiles, de limons et sables), une structure grumeleuse, une profondeur supérieure à 60 cm.

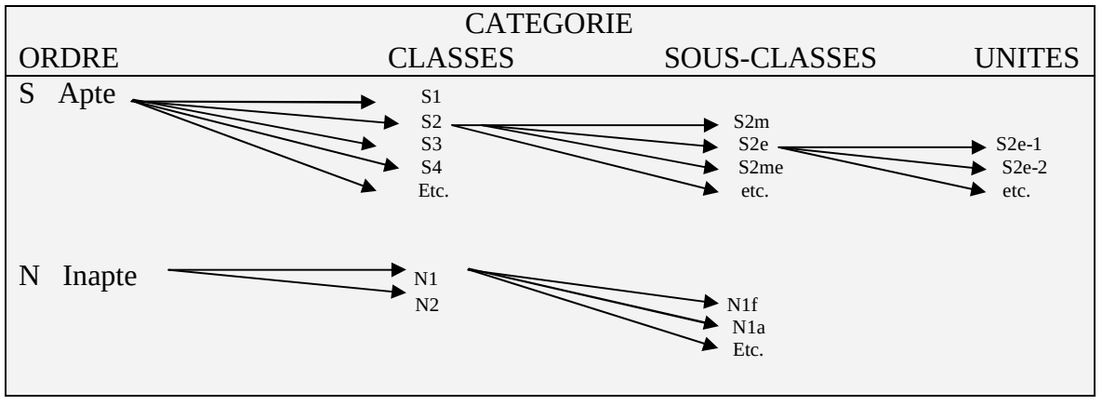
Les différentes classes expriment le degré d'aptitudes à l'intérieur de chaque ordre et numérotées de 1 à X., indiquant le degré décroissant de la qualité des sols. Il est recommandé de ne pas en distinguer plusieurs. La classe est représentée par la lettre S et l'aptitude par le nombre 1..x. Il s'agit:

- Classe **S1**: aptitude très bonne: les terres n'ayant pas ou très peu de limitations sérieuses qui ne peuvent réduire sensiblement la productivité ou les avantages et ne nécessitant pas d'inputs importants;
- Classe **S2**: Aptitude moyenne: les terres présentent un ensemble de limitations moyennement sérieuses à u certain niveau et mode d'utilisation qui pourraient réduire la productivité ou augmenter les inputs nécessaires, de façon à donner des avantages moins que dans la classe S1;
- Classe **S3**: les terres présentent un ensemble de limitations sérieuses à un type d'utilisation donné, qui entrainement beaucoup d'inputs et réduiraient sensiblement la productivité comparé à S2 et S1
- On peut ajouter d'autres classes (S4, S5, etc.) lorsque la nécessité s'en fait sentir.
- Classe **N1**: terres ayant des limitations sérieuses mais surmontables avec le temps, mais que l'on peut résoudre à l'état actuel de connaissance ou des moyens dont on dispose ;
- Classe **N2**: Terres ayant des limitations très sérieuses qui semblent interdire toute possibilité de mise en valeur profitable.

Comme indiqué ci-haut, toutes ces classes sont basées sur l'analyse du contexte actuel et l'interprétation des résultats caractéristiques des sols (physiques, chimiques, morphologiques, etc.).

Les sous-classes font ressortir les différents types de limitations (ex : manque d'eau ou excès d'eau, risques d'érosion, etc.) et sont désignées par des lettres minuscules, ex. S2m, S2e, S3me (tab..).

Les unités permettent une interprétation détaillée au niveau des interventions et sont désignées au moyen d'un chiffre comme par ex : S2e-1, S2e-2.



Source : FAO (1976)

m : contrainte de disponibilité en eau

e : risque d'érosion

f : contrainte liée à la fertilité
a : contrainte liée à l'alcalinité

Figure 5 : Structure de la classification des aptitudes

4.6. Cartographie

Les résultats de l'évaluation des terres donnent souvent lieu à l'établissement de cartes d'aptitudes où sont répertoriées les différentes classes, sous-classes et unités définies, ainsi certaines données clés. Les types d'aménagements retenus sont aussi configurés sur la carte ou sur une carte spécifique dite d'aménagement, qui s'avère indispensable dans le cas de l'irrigation.

Il existe différents types de cartes : géographiques, géologiques, climatiques, pédologiques, végétation, aptitudes, de mise en valeur, etc.

Elles sont présentées à différentes échelles, en relation avec la nature et la complexité des problèmes à résoudre, l'étendue du territoire à aménager, la variation spatiale des sols ou des objectifs d'aménagement:

- très petite échelle > 1/1.000.000,
- petite échelle : 1/500.000-1.000.000
- moyenne échelle : 1/100.000-500.000
- grande échelle : 1/50.000-100.000
- très grande échelle : 20.000-50.000.
- très détaillée ou plan : < 20.000

La cartographie donne lieu à des observations systématiques de terrain, la description de profils ou des sondages à la tarière, et les analyses physico-chimiques au laboratoire. Aussi bien pour les cartes pédologiques que pour les cartes d'aptitudes, elles sont établies sur la base de la synthèse des résultats de prospection et d'évaluation des sols. La démarche consiste à former à partir des résultats de synthèse et sur la base de critères objectifs de classification définis au préalable durant la synthèse, des classes ou unités homogènes, appelées unités cartographiques. Les critères de définition de ces unités varient selon la complexité des types de sols et leur utilisation, ainsi que les objectifs d'aménagement et peuvent être :

- Le type de sols,
- La profondeur,
- La texture,
- La compacité
- Les classes d'aptitudes
- La végétation
- La présence d'une contrainte (nappe, carapace ferrugineuse, gravillons, etc.), etc.

Les différentes unités sont ensuite représentées à une échelle donnée et de façon structurée sur un plan schématique, appelé carte. La représentation est basée sur la délimitation des différentes unités homogènes qui sont identifiées par une couleur et une légende apposée sur la carte. Ainsi pour les cartes pédologiques on regroupera les sols par classe pédogénétique, avec des sous-unités définies à par des sous-groupes, etc. Alors que pour les cartes d'aptitudes les critères de formation des unités seront basés sur les facteurs de production (favorables et défavorables), les différentes spéculations et les actions d'aménagement.

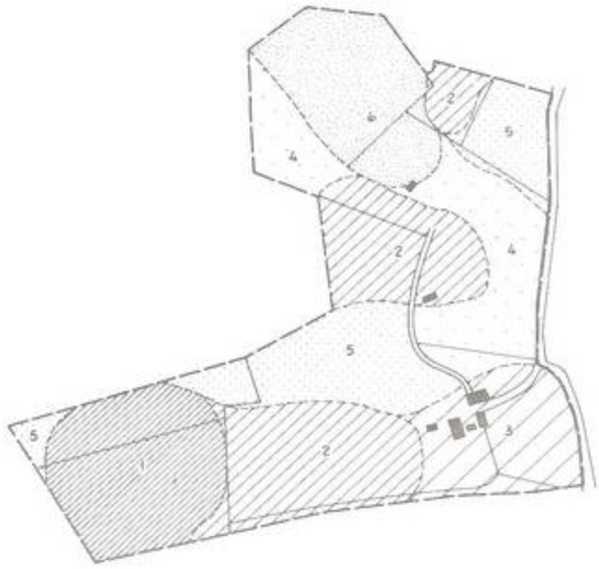


Figure 6: Exemple d'une carte d'aptitude. On différencie 6 unités : Unité 1, Unité 2, Unité 3, Unité 4, Unité 5 et Unité 6

La carte comporte donc toute sorte d'informations susceptibles de renseigner sur le milieu biophysique et socio-économique, ainsi que sur les aptitudes des sols, et les aménagements possibles, notamment :

- les types de sols,
- la végétation,
- le réseau hydrographique,
- infrastructures de communication et socio-économiques
- les classes des contraintes
- les classes des aptitudes
- les différentes spéculations
- aménagements nécessaires, etc.

Selon l'échelle, les cartes peuvent avoir des utilisations différentes :

- planification au niveau national: cartes à moyennes, petites et très petites échelles et sont généralement des cartes de synthèse;
- planification locale, élaboration de schéma directeur de développement local: cartes à moyennes échelles;
- études et prospection des sols, interventions de terrain: cartes à grandes échelles;
- aménagements: cartes à très grande échelle ou plans.

CHAPITRE 5: CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS

Il faut noter que la dégradation des sols est un processus graduel qui peut être apparent ou insidieux, avec des conséquences qui peuvent ne pas être ressenties sur place par les auteurs, mais ont souvent des répercussions parfois catastrophiques pour les générations futures ou à des centaines de mètres hors du système où elle se produit. C'est la raison pour laquelle très souvent les paysans ne sentent pas la nécessité de prendre les mesures nécessaires pour prévenir la dégradation des sols.

Les principales pratiques de conservation des sols sont les traditionnelles jachères forestières pratiquées partout dans le pays par les paysans et servant à régénérer les champs épuisés par les la culture itinérante. En zones forestières cette technique permet une repousse rapide de la végétation en assurant au sol une bonne couverture végétale permettant de lutter contre l'érosion hydrique.

Les mesures de prévention et de lutte contre la dégradation des sols sont aussi nombreuses et complexes, A cet effet, il faut noter qu'aucune technique n'est parfaite en soi, tout dépendant du contexte, des mesures opérationnelles et des objectifs de production. Ainsi, dans certaines situations il sera plus approprié d'opter pour tel ou tel système, alors que dans d'autres situations la solution consistera à combiner plusieurs techniques ou systèmes afin de pouvoir profiter des différentes opportunités.

La conservation des sols ayant pour but ultime d'améliorer la productivité des sols, il faudra nécessairement recourir tout d'abord à la restauration de la fertilité chimique des sols.

5.1. Principes directeurs

Principe 1 : Bien analyser le contexte de dégradation des sols

La dégradation des sols est un processus très complexe et graduel du fait qu'elle met en jeu plusieurs facteurs qui peuvent s'enchaîner l'un après l'autre, avec des conséquences parfois irréversibles. Elle peut être apparente ou insidieuse, selon les situations de terrain, le climat et les pratiques culturales avec des conséquences pouvant ne pas être ressenties par les auteurs sur place, mais ont des répercussions parfois catastrophiques à des centaines de mètres plus en aval du bassin versant. C'est la raison pour laquelle très souvent les paysans ne sentent pas la nécessité de prendre les mesures nécessaires à adopter des mesures et techniques de lutte préventive. Il convient donc de bien connaître l'environnement et les types de sols affectés et de l'appréhender avec beaucoup de discernement avant toute intervention.

Principe 2 : Avantages comparatifs

Pour assurer une adhésion consciente des paysans aux activités d'aménagement des sols, il est important que les travaux ou les ouvrages à entreprendre pour le contrôle de l'érosion aient des impacts significatifs sur l'amélioration de la production et répondent à leurs besoins de développement socio-économique.

Principe 3: Renforcement des capacités des acteurs

La gestion durable des sols requiert non seulement des capacités institutionnelles et opérationnelles, mais surtout une concertation et une stratégie de suivi-évaluation de l'utilisation des sols tant au niveau national que sous-régional.

5.1. Notion de base

5.1.1 L'érosivité des pluies (R)

L'érosivité d'une pluie est un indicateur de l'agressivité des pluies. Au cours d'une pluie, l'énergie cinétique ainsi que la quantité de mouvement dissipée lors de l'impact de gouttes entrainent le détachement des particules et leur déplacement par rejaillissement (Euroconsul, 1989). Elle dépend de plusieurs facteurs, entre autres :

- **énergie cinétique des précipitations**: **Ec = 1/2mV2**,
- **quantité des précipitations (durée et distribution)**: une grosse pluie résulte généralement à d'importants risques d'érosion,
- **intensité horaire des précipitations**: pour une pluie d'une intensité horaire de 30-60 mm/heure, environ 10% de la pluie est érosif. Toute pluie supérieure à une intensité > 100 mm/heure est érosive,
- **nature du sol**: un sol à structure stable est très sensible à l'érosion. Un sol profond et perméable, signifie une bonne capacité de stockage de l'eau, d'où moins d'érosion,
- **pente**: une pente suffisamment élevée pour laisser circuler l'eau peut conduire à l'érosion. Plus la pente est abrupte, plus l'eau circule à une grande vitesse et plus érosive,
- **végétative**: le couvert joue un rôle très important dans le contrôle de l'érosion,

A partir des données pluviométriques enregistrées au niveau d'une station donnée, on peut déterminer les valeurs de l'intensité maximale des pluies pendant un temps donné (30 minutes), ainsi que de l'énergie cinétique totale de la pluie. Le facteur d'érosivité des pluies, pour une pluie donnée, est défini comme le produit de l'énergie cinétique de la pluie par l'intensité horaire maximum de celle-ci en 30 minutes, le tout divisé par 100.

$$R = E \times I30/100$$

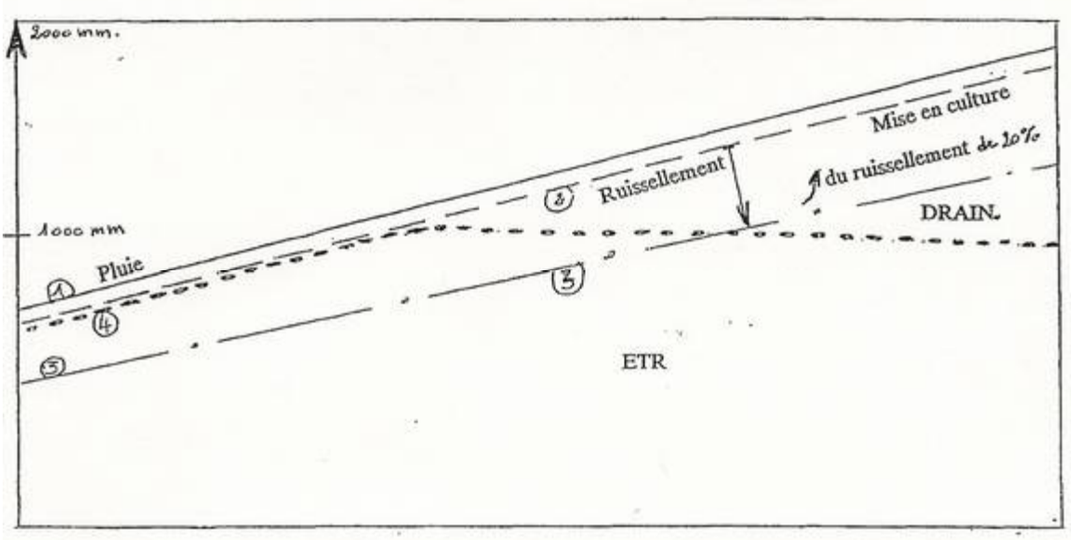
Où

R = Indice d'érosivité de pluie;

E = Énergie cinétique totale de la pluie;

I30 = Intensité maximale de pluie pendant 30 minutes.

Les figures 7-10 ci-après montrent les relations entre les pluies et les manifestations (ruissellements) des eaux et l'érosion des sols.

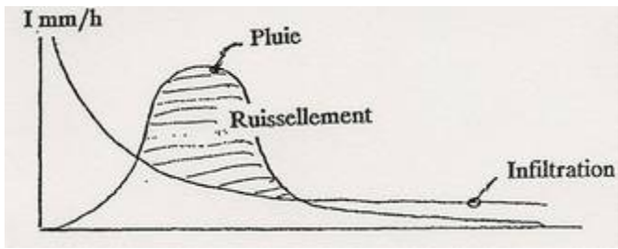


Source : Roose et al., 1991

Figure 7 : Bilan hydrique : cas de végétation pérenne à ruissellement faible (KR = 1-5%) et en cas de culture à fort ruissellement (KR = 20-40%)

(1) : pluie augmentant de 800 à > 2000 mm
(2) : pluie-ruissellement sous végétation naturelle
(3) : pluie-ruissellement sous culture, augmentant de 200 à 400 mm
(4) : Evapotranspiration réelle qui ne diminue que s'il y a du ruissellement en zone aride

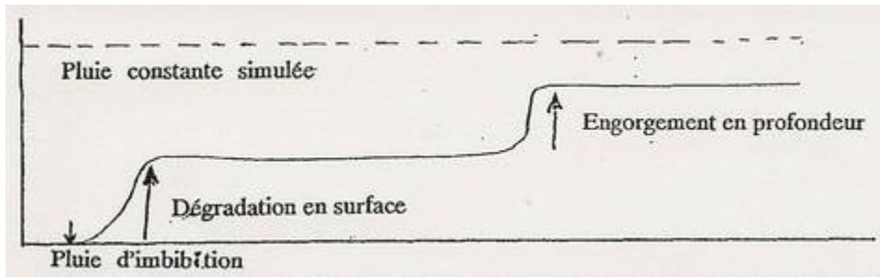
Le ruissellement se développe lorsque l'intensité horaire de la pluie dépasse celle de la capacité d'infiltration. Au bout du temps, la capacité d'infiltration du sol se dégrade vu l'éloignement du front d'humectation (diminution de la tension capillaire) et la dégradation de la structure à la surface du sol (croûte battance).



Source : Roose et al., 1991

Figure 8 : Représentation de la pluviométrie et de l'infiltration

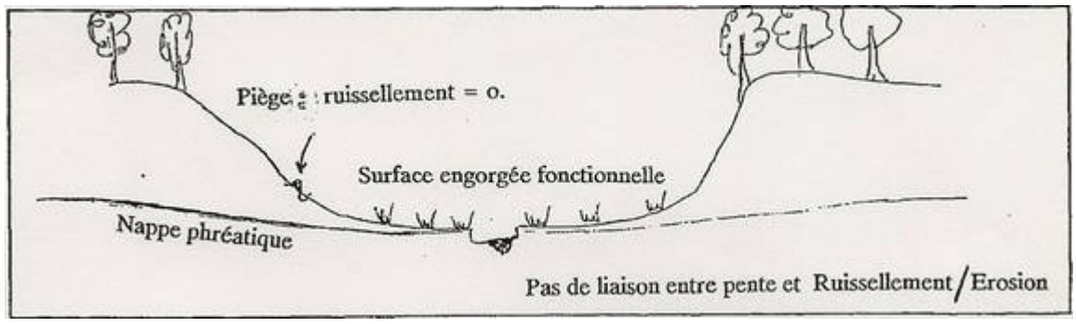
Ce type de fonctionnement ne s'observe que si l'infiltration dépend d'une pellicule de battance à la surface d'un profil parfaitement perméable.



Source : Roose et al., 1991

Figure 9 : Simulation de pluie et effet sur la dégradation des sols

Le ruissellement nait d'un remplissage des pores (débordement de la capacité de stockage).
Sur sol tassé, caillouteux ou présentant un horizon imperméable, une fois que la porosité est remplie d'eau, l'eau déborde quelle que soit l'intensité de la pluie et ruisselle à la surface du sol.



Source : Roose et al., 1991

Figure 10: Ruissellement des eaux de pluies le long d'une pente et effet sur l'érosion. Le ruissellement à lieu des versants vers le thalweg qui s'engorge d'eau.

5.1.2. L'érodibilité des sols (K)

L'expression des pertes en terres par l'érosion hydrique est très complexe. Il existe une étroite relation entre les différents facteurs et qui peut être mesurée par l'équation universelle de Wischmeier et Smith (1978):

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Où:
A = pertes en terres
R = facteur précipitation
K = facteur sol
L = facteur longueur de pente
S = gradient de pente
C = facteur cultural
P = facteur contrôle de l'érosion

L'étude de la distribution spatiale du facteur K peut se faire à partir des prélèvements de quelques échantillons (20-30) de sol (entre 0 et 25 cm) dans l'espace du bassin versant à étudier, en fonction des types de sols. Il existe plusieurs formules servant à déterminer le facteur

K, en se basant sur la texture des sols, la teneur en matières organiques, la structure du sol et la perméabilité:

$$1000K = 2,1 \times 10^{-4} \times (12 - a)\, M^{1,4} + 3,25\,(b - 2) + 2,5\,(c - 3)$$

Avec, comme paramètre :

M (texture du sol) = (% sable fin +% limon) * (100 -% argile)

a : taux de matière organique

b : structure du sol = 1 – 4

c : perméabilité du sol = 1 – 6

Cette formule est d'utilisation mondiale et sert à caractériser la sensibilité à l'érosion des sols sous des climats et végétation donnés. Le tableau 9 donne les pertes en terres en fonction du couvert végétal et de la pente.

Tableau 9: Pertes en terres en fonction du couvert végétal et de la pente du terrain

COUVERT VÉGÉTAL	PENTE (%)	RUISSELLEMENT (%)	PERTES EN TERRES[17] (t/ha/an)
HERBACÉ (100%)	36	6,9	0,026
HERBACÉ (20%)	20	20,0	12,0
FORÊT NATURELLE	7-15	2,4	0,24
AGRUMES + PAILLAGE	7	2,6	4,3
AGRUMES SANS PAILLAGE	7	9,2	18,9
CULTURES + PAILLAGE	7	13,9	13,0
CULTURES + SOL NU OU PÂTURAGES	7	21,0	43,6
SOL NU	7	39,0	89,4
PÂTURAGES NATURELS	7	-	5,3

Source : Euroconsul (1989)

5.1.3. Topographie (LS)

L'effet du relief (LS) est caractérisé par la longueur de la pente (L) et le degré de la pente (S), par la formule :

$$L = (x/22,13)^{m}$$

[17] : Pour une pluie d'une intensité horaire très élevée, les pertes en terres peuvent être plus considérables.

Où,

m = $\beta/(1+\beta)$ où β = $(\sin\theta/0{,}0896)/[3{,}0(\sin\theta)\ 0{,}8 + 0{,}56]$; où θ = angle de la pente.

Le degré de la pente peut être calculé de la manière suivante:

S = 10,8sinθ + 0,03; pente < 9%; **S = 16,88sinθ + 0,03; pente > 9%** (Renard et al., 1997).

5.1.4. Types d'érosion hydrique

Selon la nature des facteurs en jeu, l'érosion peut se manifester su différentes formes, notamment :

- Érosion en nappe : elle affecte la surface du sol sous forme insidieuse, c'est-à-dire diffuse, difficile à percevoir par un profane. Elle se manifeste par: (i) mise à nu de l'horizon sous-jacent l'horizon humifère, avec une couleur plus claire, (ii) apparition de cailloux en surface, sables grossiers, gravillons, etc. (iii) désagrégation des particules du sol, (iv) transport des particules vers le bas de pente ;
- Rigoles : elle se manifeste par l'apparition de petits chenaux tracés à la surface du sol par les eaux de ruissellement le long de la pente, de quelques centimètres voir des dizaines et qui peuvent se creuser au fur et à mesure que l'intensité horaire et le ruissellement augmentent;
- Ravinements : lorsqu'une grande quantité se concentre à la surface du sol, en présence d'une pente importante, la vitesse de ruissellement des eaux devient asse importante et entraine le décapage de la terre le long de son passage, en creusant des tranchées plus ou moins profonds, appelées ravins. Les ravins peuvent atteindre quelques centimètres à 1 m de profondeur, selon la nature des sols.
- Transports et accumulations : les pertes en terres sont transportées par les eaux de ruissellement jusqu'au bas du bassin versant où elles peuvent, soit s'accumuler dans le thalweg, soit au fond des cours d'eau en provoquant ainsi leur envasement progressif.

5.2. Mesures préventives

Des mesures préventives et curatives adéquates s'imposent pour limiter les causes et phénomènes de dégradation des sols. Dans les zones de pentes l'adoption de système de défrichement et de cultures par bandes isohypses (2-3 m de large selon la pente) alternant avec des bandes (espacées de 4-5 m de large) couvertes de végétation plus ou moins dense composée d'arbres, d'arbustes et/ou d'herbes, devrait être systématiquement recommandée pour contrôler l'érosion hydrique et le transport des sédiments par les eaux de ruissellement. Pour minimiser les risques de dégradation de sols, il faudra observer les mesures suivantes:

- Veiller à un bon travail du sol (choix du matériel, date d'intervention...) afin d'éviter un émiettement ou un compactage trop important (dans le cas de labour mécanique, il faut laisser des mottes en surface et travailler sur des sols bien ressuyés).

- limiter les labours et les passages des engins pour éviter le compactage ou la pulvérisation du sol;

- le binage qui est surtout utilisé pour lutter contre les adventices, permet également de briser la croûte de battance et ainsi de restituer au sol sa capacité d'infiltration.

- le sens du travail du sol si possible parallèle aux courbes de niveau afin de permettre d'augmenter la rugosité dans le sens le plus grand de la pente.

- les travaux du sol après récolte sont à réaliser le plus tôt possible pour redonner au sol sa capacité d'infiltration.
- Entretenir la fertilité des sols au niveau de la parcelle par amendement calcique (chaulage des sols acides) et/ou humique (restitution des résidus de récolte, pas de brûlage des pailles, apports de matière organique de type fumier, composts, etc.).

- Favoriser les successions de cultures permettant de limiter des sols nus durant les périodes érosives.

- Tenter d'éviter les sols nus : cultures intermédiaires, mulch et paillages, enherbement des zones non cultivées et des interlignes de cultures pérennes.

- Organiser le parcellaire et l'assolement : la taille et la répartition des parcelles, leur affectation peuvent permettre de réduire l'érosion. Un parcellaire morcelé permettra d'alterner entre des zones où l'eau pourra s'infiltrer et d'autres où la situation est plus critique (culture en bandes alternées).

- Entretenir les cordons de végétation et les zones boisées : ces zones freinent efficacement le flux d'eau, si elles sont disposées parallèles aux courbes de niveau. De plus ces milieux sont biologiquement actifs, assurant une bonne structure des sols et donc une bonne infiltration des eaux.

- Entretenir les retenues d'eau comme les mares, les retenues collinaires qui jouent un rôle dans le stockage et l'infiltration des eaux de ruissellement.

- Réaliser des aménagements à la parcellaires, raisonnés si possible à l'échelle du bassin versant : bandes enherbées, fossés enherbées, etc.

- Organiser des chemins d'écoulement pour la collecte des eaux : tassement de chemins préférentiels pour les écoulements (talwegs) débouchant sur une zone tampon (mares, zone boisée).

- Réaliser des rigoles d'écoulement superficiel en travers de la pente après le semis pour intercepter le ruissellement et l'évacuer latéralement vers les fossés de bordure.

- Créer des bourrelets de terre de protection ou entretenir et créer des fossés: ils permettent de protéger la parcelle contre les entrées d'eau provenant de l'amont et de canaliser les eaux vers des ouvrages de stockage (mares, retenues collinaires, zone boisée...) et donc de protéger les zones avals contre l'érosion et/ou les inondations.

5.3. Préparation du sol

Le travail du sol en modifiant l'état de surface par la rugosité crée, contribue à freiner les ruissellements et provoquer l'infiltration de l'eau dans le sol. Ceci a pour avantage non seulement de limiter les phénomènes d'érosion, mais améliore le stockage de l'eau dans le sol.

5.3.1. Labour profond

La production agricole repose la maîtrise des techniques culturales qui impliquent tout d'abord un ameublissement du profil cultural. Or celui-ci repose sur un bon travail du sol soit par labour à plat ou billonnage, soit localement autour du trou de semis ou plantation sous forme de poquets ou potets.

Pour améliorer l'infiltration de l'eau et l'expansion des racines des plantes dans un sol lourd ou compact, il est indispensable d'ameublir le sol par un travail du sol en profondeur par un labour mécanique à l'aide de tracteur ou bulldozer. Par contre, dans la plupart des cas des sols

sableux, il sera préférable de travailler le sol manuellement à l'aide d'outils aratoires légers ou de petits motoculteurs et des billonneurs à traction animale.

Principe 3 : Ameublissement du profil cultural

Un bon travail d'ameublissement de la partie supérieure du sol améliore le profil cultural, ainsi que les capacités d'infiltration et de stockage de l'eau dans le sol. Ceci est indispensable dans la mesure où le sol, après ressuyage, devient le seul pourvoyeur d'eau et constitue ainsi le siège des échanges physico-chimiques, l'interface racines, l'eau et les éléments nutritifs, en plus de l'encrage de la plante dans le sol. Un sol compact ne permet pas une bonne pénétration des racines de la plante et une expansion du système racinaire dont dépend son développement et sa productivité. La façon et les moyens utilisés pour préparer le son seront choisis en fonction des caractéristiques physico-chimiques du sol. Des pratiques de préparation mécanique à l'aide de traction animale, de petits motoculteurs, outils aratoires et des billonneurs manuels, permettront d'améliorer l'efficacité de la fertilisation minérale et organique, ainsi que l'irrigation des cultures.

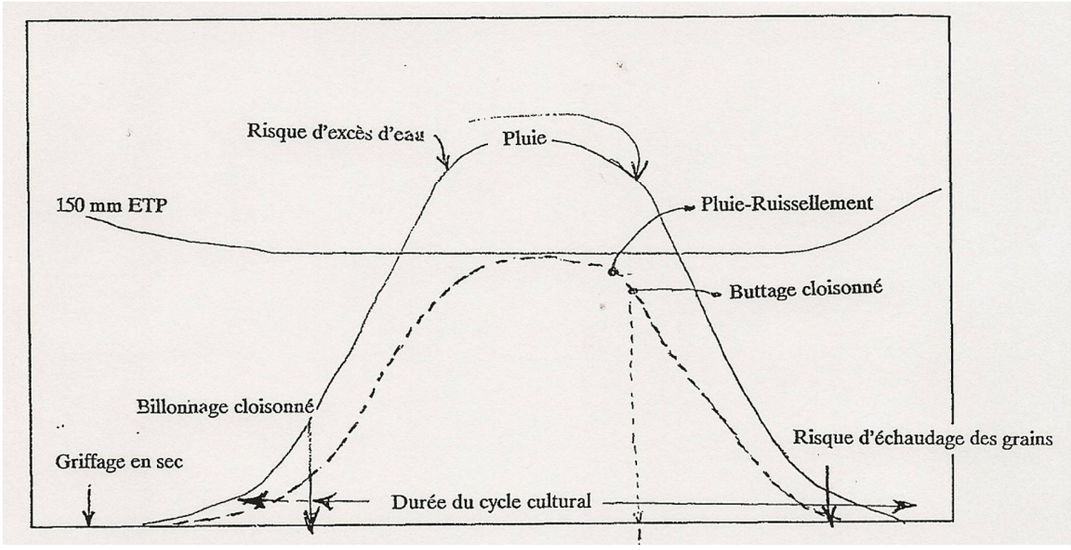
Dans le cas de la mécanisation, de manière générale, le labour devra se faire à une profondeur comprise entre 20 et 40 cm. Les travaux seront menés comme suit:

- Sols lourds de plaines basses et des bas-fonds ou indurés en bas de pentes douces (< 5%) : labour mécaniquement sans pulvérisation avec un sous-solage simple profond et dans le sens perpendiculaire aux courbes de niveau en utilisant soit la traction animale billonneuses, etc. En outre, il est préférable que le labour soit à plat avec des mottes grossières, car il permet d'augmenter considérablement l'infiltration et dissipe l'énergie des eaux de ruissellement.
- Sols des versants à pentes en long (5-10%) et des replats des hauts sommets des collines : labour de préférence manuellement à l'aide d'outils aratoires améliorés (daba, pic, pioches, etc.) plus efficaces que les outils actuels et ameublissement à 10 cm, au moins.

5.3.2. Buttes coniques

La technique consistera à confectionner manuellement et en quinconce des buttes (30-40 cm de hauteur et un diamètre à la base de 20-30 cm. La terre humifère de surface devra être soigneusement mélangée à la terre de profondeur. Ces buttes sont utilisées pour planter les boutures de manioc, de tarot, etc.

Le travail du sol est fait de manière légèrement inclinée et cloisonnée pour stocker une certaine lame d'eau (60-30 mm selon la pente, 1-30%) et drainer les eaux excédentaires sans provoquer de l'érosion.



20 cm de sol humide Buttage cloisonné

Labour grossier et billonnage cloisonné

Source : Roose et al., 1991

Figure 11 : Influence du ruissellement sur l'érosion sur un sol travaillé

5.3.3. Billons de plantation

Cette technique est recommandée pour les sols en pentes et des terrains plats, avec des écartements de 30-40cm. Sur sols de pentes des billons isohypses seront réalisés manuellement dans le sens perpendiculaire aux pentes de façon à provoquer une infiltration directe des eaux dans les sillons. Par contre sur sols de terrains plats, les billons seront réalisés soit manuellement soit à mécaniquement à l'aide d'une billonneuse. Les boutures de manioc seront plantées directement sur les billons et celles de plantain seront mises sur les sillons (planche photo).

Le billonnage parallèle à la pente (planche photo 1) augmente le drainage et provoque des rigoles dès que les pluies ont encroûté les flancs des billons. Cependant sur pentes fortes (>30%0, il réduit les risques d'érosion hydrique lors de fortes averses.

Le billonnage perpendiculaire à la pente améliore l'infiltration et le stockage des eaux de pluies lors des petites et moyennes averses, mais peut entrainer des phénomènes d'érosion lors de fortes averses. Pour éviter les risques d'érosion, il faut créer de gros billons d'une largeur et hauteur de 40 cm, entièrement protégés par une végétation rampante durant toute la saison des pluies.

Au niveau des cultures maraîchères, le labour est fait sous forme de plates bandes. La technique consiste à ériger un lit surélevé de terre ameublie sous forme de plate-bande de 1m de large, 10-20 cm de profondeur et 20 m de long (planche photo). La terre est enrichie avec des apports de matière organique plus ou moins humifiée (fumure animale, terreau, compost, etc.) combinée à des engrais minéraux soigneusement mélangés à la terre ameublie. L'excès de l'eau est évacuée par les sillons sans danger sur l'érosion des sols.

5.3.4. Stabilisation de la macroporosité et de la structure

Il s'agira d'enfouir les résidus organiques des récoltes et la biomasse végétale compostée dans le sol pour améliorer la structure du sol, augmenter la capacité d'échange cationique et le pouvoir de rétention de l'eau du sol. Cette technique nécessitera un bon travail du sol avec des outils permettant d'ameublir le sol en profondeur pour y enfouir la matière organique.

5.3.5. Sarclage des cultures

Un bon sarclage est un gage d'amélioration du bilan hydrique du sol, de minimiser les compétitions hydriques entre les cultures et les adventices et de minimiser les risques d'attaques par les insectes. Les techniques consisteront à enlever les adventices selon les différents stades de développement des cultures ou selon l'importance de la repousse des adventices. Il est important sur la base des observations de terrain et des expériences des paysans de bien cerner les périodes optimales de sarclage et de veiller au respect du calendrier cultural;

5.3.6. Paillage du sol

Il s'agira de d'étaler toute biomasse végétale (résidus de récolte, herbes sarclées, feuilles mortes, etc.) à raison de 2-6t/ha, à la surface du sol pour assurer en vue de freiner les phénomènes de ruissellement et de limiter l'évapotranspiration (planche photo.).

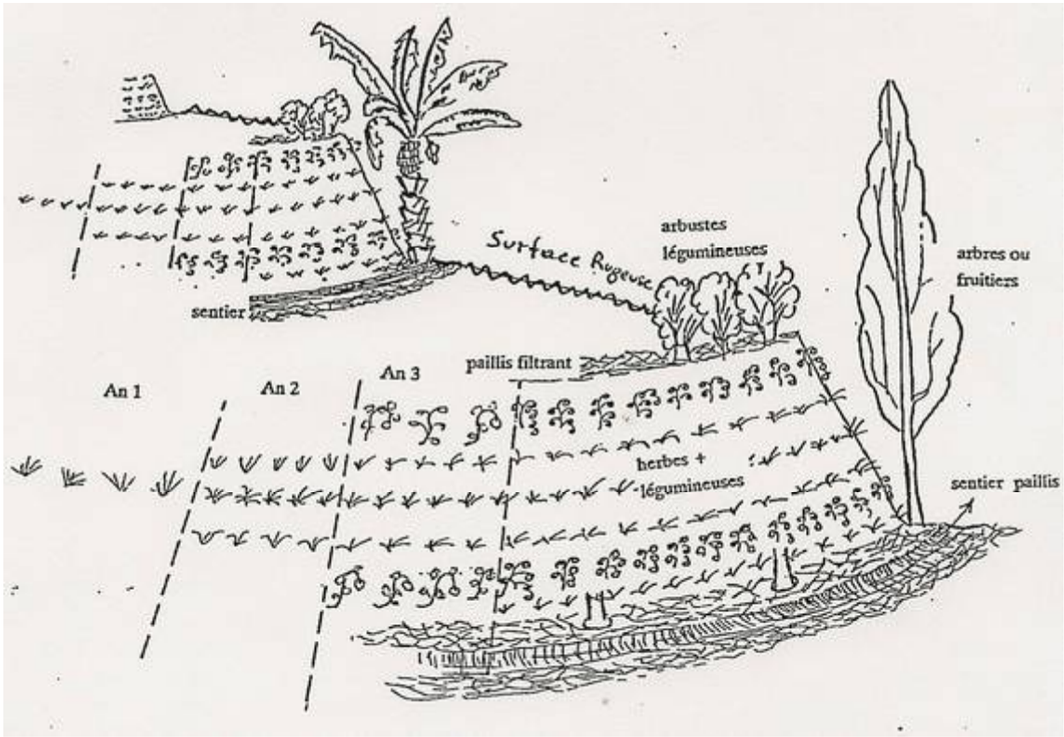
Cette technique freine sensiblement les ruissellements et l'évaporation directe de l'eau du sol par les remontées capillaires qui est ainsi stockée dans le sol puis restituée progressivement aux cultures, surtout pendant la saison sèche. Lorsque la paille est épandue en début de saison des pluies, elle dissipe l'énergie des gouttes de pluie et empêche l'érosion, provoquant ainsi une bonne infiltration des eaux, ainsi qu'une forte activité de la mésofaune. Elle devra être encouragée partout dans les systèmes paysans des cultures vivrières.

5.4. Ouvrages antiérosifs

Toutefois, dans les régions montagneuses de l'est du pays où on note une forte densité de population, la pression foncière fait que les paysans ont été obligés,
à l'image de leurs paires du Rwanda qui a développé au cours des années 70s des techniques antiérosives (NGenzi, 1992) qui ont améliorée le contrôle de l'érosion et la récupération des sols :

- **fossés d'infiltration ou d'absorption** : servent à intercepter les eaux de ruissellement sur les versants perméables avec des pentes < 20%. Mais leur installation demande beaucoup de travail (350 Hj), ainsi que pour leur entretien (50-100 Hj) par hectare avec des rendements faibles. Ce sont des tranchées de 30-50cm de large, 20-30cm de profondeur et 10-20 m de long, dépendant de la configuration du terrain;
- **terrasses agricoles radicales:** servent à absorber toutes les eaux de pluies (ruissellement si elles sont discontinues) et de capitaliser les engrais que l'on y applique. Leur largeur cultivable dépend de la pente, de la profondeur du sol et du type de culture. Par contre au niveau des versants à pentes raides (>40%), il faut des micro-terrasses en escalier (dh ~ 50cm, largeur = 50-100cm) sur lesquelles on peut développer des cultures vivrières. Elles permettent de stabiliser les versants à pentes raides, la hauteur des talus est < 1,5-2m ; (ii)
- **micro-barrages** (cordons de pierres, haies vives, etc.) : servent également à ralentir les eaux de ruissellement, de dissiper leur énergie et de les étaler. Ils demandent moins de main-d'œuvre (50 Hj). Ils n'arrêtent pas le ruissellement et ne protège pas les terres en aval. Toutefois, ils freinent beaucoup l'érosion hydrique. La figure 10 montre un schéma d'aménagement progressif d'un talus planté.
- **demi-lunes** : les demi-lunes sont réalisées dans le cas de terrain nu, affecté par l'érosion en nappe. Comme le nom l'indique, leur forme est en demi-lune, avec un rayon de 1-1,5m et une profondeur 10-20 cm. Elles servent à capter les eaux de ruissellement et provoquer leur infiltration sur place. Les cultures sont pratiques sur le bief de la demi-lune.
- **Banquettes** : elles sont confectionnées sur des terrains en pentes (2-8%) en courbe de niveau, à des distances variables, selon l'importance de la pente du sommet vers le bas du versant. Elles sont très efficaces pour la récupération des sols dans des zones à fortes densités de population et de pression foncière e conviennent bien aux petites exploitations.

Grâce à ces ouvrages les paysans parviendront à contrôler les eaux de ruissellement et d'assurer une bonne récolte des cultures même en années de déficit pluviométrique.



Source : Roose et al., 1991

Figure 12: Schéma d'aménagement progressif d'un talus planté (graminés, légumineuses, arbres). Modèles évolutifs de structures antiérosives

Hauteur des talus = 1m sur sol épais ou fragiles; 2m sur sols profonds et stables
Distance des talus = 5-20m selon la pente et l'épaisseur du sol
Talus incliné = environ 0,4m par mètre de hauteur, totalement planté en cultures et fourrages 920x20cm).

CHAPITRE 6: FERTILISATION DES CULTURES

Pour accomplir leur cycle végétatif, les cultures ont besoin en plus de l'eau, de près d'une vingtaine d'éléments nutritifs qu'elles trouvent sous forme minérale et organique que doivent leur fournir le sol, l'air (oxyde de carbone (CO_2)) et l'énergie solaire (photosynthèse chlorophyllienne).

Mais tous les sols n'ont pas le même pouvoir de pouvoir aux sols tous les nécessaires à leur croissance. Ainsi, pour compenser les déficiences, on recourt généralement à des pratiques de fertilisation consistant à apporter les éléments minéraux nécessaires au développement de la plante, à l'aide d'amendements et de minéraux.

L'objectif principal est de compenser les déficits en éléments nutritifs de façon à améliorer leur disponibilité dans le sol et de maximiser les rendements des cultures. Mais afin de ne pas bousculer les équilibres géochimiques du sol et environnementaux, il convient de tenir compte à la fois des caractéristiques du sol, des facteurs climatiques et hydrodynamique.

Les résultats des expériences menées dans les différents pays par les institutions de recherche et de développement mettent en évidence une réponse positive des cultures à la fertilisation, mais que celle-ci varie selon la nature du sol, la qualité et les doses des engrais apportés (engrais minéraux ou organiques).

Principe F1 :
Avantages comparatifs

La fertilisation exige que soient maîtrisées les pratiques culturales et les facteurs de production afin de pouvoir tous les avantages comparatifs.

Il se trouve que dans le contexte actuel la majeure partie des paysans sont de petits producteurs sans moyens et de surcroît illettrés et peu ouverts à l'agriculture de marché (commerciale). En outre, le fait que les principales cultures (manioc, mais, plantain, riz, etc.) pratiquées en pluvial par les paysans s'accommodent bien des systèmes traditionnels actuels peu exigeants en terme d'investissement (intrants, temps de travail pour les semis, la préparation des sols et l'entretien des cultures (1-2 sarclages par an), il sera difficile de convaincre les paysans à moderniser leurs outils de travail et renoncer à leurs pratiques culturales traditionnelles, si des mesures d'accompagnement offrant des avantages comparatifs, notamment l'appui technique et un meilleur accès aux intrants, ne sont mis en place.

6.1. Notion de fertilité du sol

On distingue la fertilité potentielle et la fertilité actuelle. La fertilité des sols est estimée au laboratoire à partir des analyses chimiques.

6.1.1. Fertilité potentialité

La fertilité potentielle du sol est la somme des éléments nutritifs que peut fixer un sol sur sol complexe d'échange cationique. Elle est influencée, entre autres facteurs par :

- Sa composition minérale : estimée par les analyses chimiques;
- La composition de la matière organique (tableau 10)
- La nature et la qualité des ions adsorbés sur le complexe d'échange (analyse s chimiques des bases échangeables).

Tableau 10: Taux de matière organique totale, carbone et azote

TAUX	MATIERE ORGANIQUE TOTALE (%)	CARBONE TOTAL (C%)	AZIOTE TOTAL (N%)	C/N
Très élevé	>6,0	>3,50	>0,300	>25
Elevé	4,3-6,0	2,51-3,50	0,226-0,300	16-25
Moyen	2,1-4,2	1,26-2,50	0,126-0,225	11-15
Faible	1,0-2,0	0,6-1,25	0,050-0,125	8-10
Très faible	<1,0	<0,6	<0,050	<8

Source : Euroconsul (1989)

6.1.2. Fertilité actuelle

La fertilité actuelle est la somme des éléments nutritifs hydrosolubles disponibles dans le sol, notamment Ca++, Mg++, K+, P2O5, N, bore, Zinc, soufre, etc. Elle dépend de l'humidité du sol, de la nature des argiles et de la capité d'échange cationique du sol. Le tableau 8 ci-après donne les proportions des différents éléments.

Tableau 11: Classes et proportions des différents éléments nutritifs

CLASSES	N (mg/kg)	P2O5 (ml/l) (assimilable)	Ca++ (meq/100g)	M++ (meq/100g)	K+ (meq/100g) (échangeable)	K+ (mg/kg) (assimilable)	Na+ (meq/100g)	NH4-
Très faible	<20		<2	<0,5	<0,1	<40	<0,1	-
Faible	20-40	0-5	2-5	0,5-1,5	0,1-0,3	40-80	0,1-0,3	<150
Moyen	40-60	5-10	5-10	1,5-3,0	0,3-,6,0	120-160	0,3-0,7	150-175
Elevé	60-80	10-15	10-20	3-8	0,6-1,2	160-240	0,7-2,0	175-200
Très élevé	80-100	15-20	>20	>8	>1,2	240-320	>2,0	>200
Extrêmement élevé	-	>20	-	-		>320		

Source : Euroconsul (1989)

6.2. Besoins des cultures en éléments nutritifs

Les principaux éléments minéraux utilisés par les cultures durant leur cycle végétatif sont l'azote, le phosphore, le potassium, le magnésium, le calcium et le soufre, ainsi que des éléments mineurs, dits oligo-éléments qui sont également nécessaires en quantité moindre, notamment: le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre, le bore et le molybdène. Mais, chaque culture a ses propres besoins en engrais minéraux (kg/ha). Le tableau 12 ci-dessous donne les besoins en N, P et K de quelques cultures.

Tableau 12: Besoins en azote, phosphore et potassium de quelques cultures pratiquées dans les pays, rendements, apports minimum.

CULTURES	RENDEMENTS (t/Ha)	BESOINS (Kg/Ha)			APPORTS MINIMUMS (Kg/Ha)		
		N	P	K	N	P	K
MAIS	4(grain); 6 paddy	100	40	130	60-100	50-100	30-60
RIZ IRRIGUÉ	4(grain); 6,5 paddy	60	30	90	75-100	25-50	25-50
POMME TERRE	25,0	115	45	200	50-100	50-100	75-150
MANIOC	25,0	125	30	150	50-90	60-75	80-120
MARAICHERE	3-40	30-50	30-70	100-200	50-100	50-100	75-150
Banane	30,0	60	15	200	50-90	60-100	150-250
Coton	2,0 (graines)	90	60	135	50-100	25-50	25-75
Arachide	1,0	(50)	15	15	0-25	50-100	35-75
Fruitiers	15,0	100	25	145	100-150	60-100	100-200
Café	2,0	30	5	48	35-60	25-50	75-110
Blé	3(graines);3,5 tige)	70	30	60	75-90	35-50	35-75

Source: Euroconsul (1989)

6.2. Objectifs de la fertilisation

Les éléments nutritifs dont a besoin la plante doivent être disponibles en quantités suffisantes et sous une forme assimilable, pour ne pas compromettre le cycle de croissance de la plante. En condition naturelle de croissance de la plante, les éléments minéraux prélevés au cours de la croissance sont restitués au sol à la fin du cycle de la plante. Les pertes d'éléments minéraux sont presque nulles. En revanche, lorsque le sol est cultivé à fins avec une récolte totale de la production et des résidus après chaque campagne agricole, une bonne partie des éléments prélevés par la plante n'est pas restituée au sol. Il faut donc pour les cultures ultérieures apporter de nouveaux éléments nutritifs pour compenser les manques en recourant à des apports de fertilisants.

Les engrais doivent apporter, en *justes proportions* :

- des éléments de base, azote (N), phosphore (P), potassium (K) qui sont les éléments majeurs font souvent défaut dans la plupart des sols tropicaux et qu'il faut donc apporter aux sols pauvres ou épuisés par des récoltes intensives et se succédant sans jachères.
- des éléments secondaires, calcium (Ca), soufre (S), magnésium (Mg). Ces éléments secondaires se trouvent habituellement en quantité suffisante dans le sol, et ne devraient être ajoutés qu'en cas de carence.
- Les plantes ont besoin de quantités relativement importantes des éléments de base (macroéléments).
- des oligo-éléments tels que le fer (Fe), le manganèse (Mn), le molybdène (Mo), le cuivre (Cu), le bore (B), le zinc (Zn), le vanadium (V) et le silicium (Si)

Principe F2:
Assurer la disponibilité de fertilisants de qualité

Dans des conditions de forte acidité du sol (cas sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux), l'amélioration de la fertilité des sols nécessite tout d'abord la restauration du pH (pH>5,5) par des amendements (organiques, phosphatés et calciques des sols), le maintien de la fertilité par des apports d'engrais minéraux de qualité, en tenant compte des facteurs hydrodynamiques (drainage, lessivage, etc.) des sols.

Même si l'utilisation de la matière organique paraît la solution idéale et à portée de mains des paysans pour corriger le pH acides et améliorer la fertilité des sols, son utilisation à l'état brut produit peu d'effets sur l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol et des cultures. En outre, pour produire les quantités nécessaires et appliquer les doses recommandées (2-5 tonnes par hectare) le paysan doit collecter et composter des quantités énormes (8-10 tonnes) de biomasse végétale à transporter et conditionner dans les fosses compostières de fortune. Tout ceci tend à décourager les paysans à s'investir pleinement dans l'adoption de nouvelles technologies.

Le défi à relever est comment restaurer et maintenir la fertilité des sols à un niveau convenable pour permettre une productivité soutenue des terres. Il faudra recourir à la fois à la restauration et l'entretien de la fertilité grâce aux apports de fertilisants organiques et minéraux permettant de restituer aux sols les éléments nutritifs soustraits (minéraux et organiques) afin de renouveler la fertilité.

Principe F3 : Mieux impliquer les acteurs

L'implication des producteurs dans l'élaboration et la mise en œuvre des stratégies de gestion intégrée de la fertilité des sols apparaît comme un impératif pour assurer la durabilité de la production. Elle implique la prise en compte des aspects socio-économiques et fonciers, des besoins et priorités des paysans et de l'accès au système de crédit et aux intrants.

6.3. Amendement des sols

Pour améliorer le pH des sols acides, il faut neutraliser l'acidité produite par les ions Al+++ et H+ , hydroxydes de fer fixés dans le complexe d'échange cationique par au moyen d'amendements phosphatés, calcaires ou organiques. Les fertilisants sont soigneusement mélangés à la terre dans les 25 premiers centimètres du sol.

6.3.1. Amendements phosphatés

L'utilisation de phosphates naturels est très courante pour relever le pH du sol à des niveaux acceptables. Toutefois, en raison des faibles pH (4,8-5,5) de la plupart des sols, notamment les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux, il faut apporter d'importantes quantités de phosphates bruts ou phosphogypse (2-5 tonnes par hectare) pour relever les pH à des valeurs supérieures à 5.5. Ces apports doivent être renouvelés, une fois tous les 4-5 ans.

A cause de la qualité très médiocre des sources de phosphates utilisés dans les trois pays, les apports massifs de phosphates risqueront d'entrainer des phénomènes de dégradation chimique des sols.

6.3.2. Amendements calcaires

Les amendements calcaires sont les types les plus connus, sous le nom de chaulage. La

qualité des sources de calcaires généralement utilisés dans les différents pays est très médiocre. Les sources de calcaire sont assez nombreuses. Certaines sources, telles que les poussières calcaires émanant des cimenteries contiennent des éléments toxiques (aluminium) ou des métaux lourds (plomb, zinc, cuivre, etc.) en quantités importantes pour entrainer des risques d'augmentation de l'acidité des sols et de toxicité pour les cultures.

Les besoins en Chaux d'un sol donné, sont estimés grâce à des titrations des hydroxides de calcium, exprimé comme étant le nombre de kg de CaCO3 nécessaire par 1000kg de sol pour relever le pH d'échange à des valeurs acceptables. Le tableau 13 donne les quantités nécessaires à appliquer pour les différents types de sols, selon les pH.

Tableau 13 : Quantités (tonnes/hectares) de chaux à appliquer par hectare pour les différents sols

CLASSES DE TEXTURE	SABLEUX ET LIMONEUX SABLEUX	SABLO-LIMONEUX	LIMONEUX	LIMONEUX FIN	C	MUCK
pH : 4,5-5,5	0,7	1,2	1,8	2,8	3,7	8,2 t
pH ;5,5-6,5	1,0	1,7	2,4	3,5	4,7	8,5 t
pH : 6,5-7,0						

Source : Euroconsul (1989)

Pour diminuer le pH d'un sol alcalin sodique, il est conseillé d'apporter dans le sol des engrais à base d'acides (H2SO4) ou des amendements formant des acides, tels que Sulfures (S), Sufates de fer (FeSO4), Calcium polysulfide (Ca S5). Soumis à l'oxydation microbienne, tous ces matériaux produisent et libèrent dans le milieu de l'acide sulfirique (H2SO4).

Pour amender le pH acide des sols sableux, il est recommandé d'appliquer environ 1,5 tonne de CaO.

Calcul de la quantité de chaux pour un sol sableux, pH=5, à chauler jusqu'à pH6,5 :
- pH6,5-pH5,0 = 1,5 unité pH
- 1500kg de CaO = 1 unité
- quantité = 1500 kg x1,5 =2250 kg de CaO

Les différentes sources de calcaires couramment utilisées dans le chaulage des sols acides, sont :
- CaO = Chaux vive
- Ca(OH)2 = chaux hydratée
- CaCo3/CaMg(CO3)2 = roche calcaire telle que dolomie calcaire
- CaSiO3/CaCO3 = silicate de calcium
- CaSiO3/Ca3(PO4)2 = roche basique.

Les plus couramment utilisés pour chauler les sols acides, sont les silicates de calcium et les dolomies calcaires. Ces matériaux doivent être finement transformés (< 200 micromètres). Ils doivent A cause de leur caractère caustique, leur utilisation est très délicate, particulièrement dans les sols lourds. Dans de tels cas, il faudra les appliquer en les pulvérisant soigneusement bien avant les semis ou la plantation.

6.3.3. Amendements organiques

La croissance de la plupart des végétaux requiert des quantités importantes d'azote et que le sol n'est pas toujours à mesure de fournir, comme c'est le cas pour la plupart des sols tropicaux, particulièrement les sols ferralitiques désaturés. La majorité des terres sont déjà si pauvres que même si l'on maîtrise l'érosion et les pertes en terres, la productivité des terres et du travail reste médiocre.

En raison de la texture sableuse des sols ferrallitiques et de la mauvaise structure des sols lourds des bas-fonds, l'utilisation de la matière organique est vivement recommandée pour améliorer les propriétés physico-chimiques du sol. Différentes sources de matière organique peuvent être exploitées, notamment la biomasse végétale, les fientes, les ordures ménagères, la fumure animale, etc.). Pour relever le pH à des niveaux acceptables, il sera nécessaire d'apporter d'importantes quantités de matière organique (5-10t/ha tous les 5 ans), selon les sols et le niveau des pH des horizons supérieurs[18].

Sur les terres pauvres il est recommandé d'apporter de la fumure organique (10t/ha de fumier) tous les trois cycles culturaux, alors que sur sols de fertilité moyenne, il faut environ 5 tonnes de fumure organique (Rose, E., 1992). Le fumier apporté sert aussi de source d'énergie à la microflore indispensable pour modifier le stock minéral du sol et le rendre assimilable par la plante. Une tonne de fumier peut fournir 4 kg N, 15 kg P, 12 kg K, 19 kg Mg, 25 kg Ca (Rutunga, 1991). Mais les possibilités de son utilisation sont limitées par les faibles quantités disponibles au niveau des villages. Pour ce faire, il conviendra d'encourager en zones de savanes l'élevage des petits ruminants en association avec l'agriculture de façon à permettre une complémentarité entre les animaux et la fertilisation des sols, au moyen de parcage direct des animaux sur le terrain qui en retour vont brouter les résidus de récoltes.

6.4. Fertilisation des cultures

6.4.1. Facteurs de fertilité

Lorsque l'on parle de fertilité du sol on fait toujours référence à la teneur des éléments nutritifs (Azote, phosphore, et potassium), en faisant fi des facteurs physiques du sol. Or, les facteurs physiques sont ceux qui permettent l'ancrage des plantes et au système radiculaire de se répandre et s'épanouir dans le sol pour apporter aux cultures les éléments nutritifs et l'eau.

L'eau du sol est un facteur de premier rôle dans la régulation de la fertilité et de la nutrition des plantes, en ce sens que les éléments nutritifs du sol y sont sous forme hydrosoluble et sont soumis à des migrations obliques (suivant la topographie) et verticaux (descendants en climat humide ou ascendants, en climat aride) sous l'action des mouvements de l'eau du sol. Certains éléments tels que K+ et Na+ sont très solubles et peuvent migrer facilement, alors que d'autres tels que Ca++, Mg++ sont piégés dans des complexes argilo-humiques ou des concrétions calcaires.

[18] : Rose, E.; F. NDayizigiye, L. NSenguimana, 1992: La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols : une nouvelle stratégie pour l'intensification de la production et la restauration de l'environnement en montagne.

Principe F5 : Maitrise des équilibres Sol-Eau

La fertilisation doit servir à combler les déficits en éléments nutritifs dans le respect relations fonctionnelles «Sol-Eau-Plante» qui régulent la nutrition minérale des plantes. Pour ce faire, il est important que la couche arable du sol soit suffisamment épais pour permettre un bon ancrage et fournir l'eau à la plante et soit aussi suffisamment fertile pour mettre à la disposition de la plante les éléments nécessaires à sa croissance. Ainsi, l'excès d'eau dans le sol (cas de l'irrigation non maîtrisée des cultures) peut conduire à des pertes d'engrais par des phénomènes de lessivage des éléments nutritifs. De même un déficit d'eau peut empêcher l'assimilation des engrais, entrainant ainsi des brûlures lorsqu'ils sont apportés en excès (cas de l'urée).

Les caractéristiques et équilibres biogéochimiques du sol font partie des principaux facteurs qui influencent la disponibilité et l'assimilabilité des éléments nutritifs du sol. Afin de garantir à la fois une disponibilité suffisante pour la plante, il est indispensable de bien connaître au préalable les teneurs des différents éléments minéraux du sol et les déficits à compenser par des apports de fertilisants.

6.4.2. Types d'engrais minéraux

On dénombre trois types d'engrais :

- Engrais organiques: (i) d'origine animale: excréments (bouse de vache, plus ou moins digérée), lisier de porc, sang desséché, corne torréfiée, déchets de poissons, fientes de volaille, boues d'épuration des eaux); (ii) d'origine végétale: résidus de récoltes, litière forestière, paille (herbe fauchée des champs), etc.
- Engrais verts : il s'agit généralement de mauvaises herbes ou de plantes de couverture cultivées en intercalaire ou sous formes de jachères herbeuses que l'on enfouit dans le sol ou pour les décomposer et produire de la matière organique. Dans le cas de légumineuses, on obtient un enrichissement direct très important du sol en azote assimilable grâce à l'association de leur système racinaire à des bactéries (rhizobium) capable de l'azote atmosphérique et le transformer en azote minéral.
- Engrais minéraux: substances d'origine minérale, produits soit par l'industrie chimique, soit par l'exploitation de gisements naturels (phosphate, potasse). Ils sont commercialisés sous différentes formes : (i) les engrais simples (ne contenant qu'un seul élément nutritif, N, K, P) ou (ii) engrais composés binaires (NP, NK, PK) ou ternaires (NPK). Le trio *« NPK »* constitue la base de la plupart des engrais vendus de nos jours. Ces lettres sont généralement suivies de chiffres, représentant les proportions respectives des éléments.

  Les engrais chimiques produits industriellement contiennent une quantité minimale garantie d'éléments nutritifs, généralement indiquée sur le sac. Par exemple, la formule 15-20-15 indique la proportion d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K) présente dans l'engrais, soit 15 % de N, 20 % de P_2O_5 et 15 % de K_2O.

  Les engrais simples généralement trouvés dans le marché sont:

  - **Azotés :** urée (46% d'azote), sulfate d'ammoniaque (SA, 21% d'azote), l'ammonitrate (AN, 33.5% d'azote), le nitrate de chaux (CAN/NAC, jusqu'à 27% d'azote);
  - **Phosphatés (**ne contiennent que du phosphore (P_2O_5)**):** superphosphate simple (SP, 18% de phosphore) ou le superphosphate triple (TSP, 46% de phosphore);
  - **Potassiques (**K_2O**):** chlorure de potassium (60% de potassium) ne contient que de la potasse (K_2O) ; sulfate de potassium (SOP, 50% de K_2O) contient également 18% de soufre, sulfate d'ammoniaque ou SA qui a 24% de soufre et le SSP qui en a 12%.

Les engrais composés sont:

- **le phosphate diammonique**: composé à la fois N et P. Les formules les plus courantes sont le 18-46-0 et le 20-20-0 ;
- **le nitrate de potassium** : composé à la fois N et K.

6.4.3. Utilisation d'engrais minéraux

Une fois l'érosion maîtrisée et la fertilité physique, biologique et chimique restaurées, il reste à nourrir les cultures grâce à l'application d'engrais minéraux. L'application efficiente des engrais nécessite des apports fractionnés en fonction des types de sols, des cycles végétatifs et de la demande des cultures (tableau..).

La plupart des cultures ont une réponse positive et immédiate aux engrais minéraux surtout azotés (l'azote fait souvent défaut dans les sols tropicaux), alors que certains nécessitent la combinaison de différents types d'engrais et l'apport de matière organique pour jouer pleinement leur rôle

6.4.2. Formules et doses d'engrais

Principe F3: Meilleure utilisation d'engrais
La fertilisation des cultures ne produit des effets positifs sur les rendements que si elle est faite dans le respect des équilibres physicochimiques du sol. Ainsi, des apports d'engrais faibles courent le risque de voir les éléments être utilisés par le sol pour combler son déficit chimique, alors que des apports excessifs avec des engrais à base d'engrais acidifiés peut conduire à davantage d'acidification des sols.

Généralement, les engrais sont incorporés au sol, mais ils peuvent aussi être apportés par l'eau d'irrigation. Dans certains cas, une partie de la fertilisation peut être réalisée par voie foliaire, en pulvérisation. En effet, les feuilles sont capables d'absorber des engrais, s'ils sont solubles et si la surface de la feuille reste humide assez longtemps. Cette absorption reste toutefois limitée en quantité. Ce sont donc plutôt les oligo-éléments qui peuvent être apportés ainsi, compte tenu des faibles quantités nécessaires aux plantes.

Les engrais doivent être utilisés avec précaution. Il faut donc:

- éviter les excès, car au-delà de certains seuils les apports supplémentaires non seulement n'ont plus aucun intérêt économique, mais en plus risquent d'être toxiques pour les plantes (en particulier les oligo-éléments), et de nuire à l'environnement;
- de maîtriser leurs effets sur l'acidité du sol
- tenir compte des interactions possibles entre les éléments chimiques et des limites imposées par les autres facteurs de production.

EXPERIENCE
La question des engrais minéraux a fait l'objet de recherches et tests de comportement des cultures aux différents types et doses d'engrais menés à travers le pays par INERA, SENAFIC (2002) de 1972 à 1992 dans le cadre du Programme National Engrais (PNE) GCPF/ZAI/013/BEL exécuté avec l'appui technique de la FAO. La plupart des cultures (manioc, maïs, arachide, haricot, soja, riz, etc.) ont eu des réponses positives aux types et doses d'engrais appliqués. Les tableaux ci-dessous donnent les formules et les doses d'engrais recommandées pour les différentes cultures, ainsi que les rendements des principales du pays, selon les régions.

Tableau 14 : Formules théoriques préconisées par SENAFIC pour les différentes cultures en RDC), sur la base des résultats des expériences du PNE, FAO, 1972-1992)

CULTURES	NPK		AZOTE (UREE) (Kg/Ha)
	FORMULES	DOSES (Kg/Ha)	
MANIOC	51-51-51	300 (200 + 100)	-
MAIS	64-46-0	100 DAP+200+300	100 DAP+100+100
ARACHIDE	18-46-0	100	-
RIZ PLUVIAL	64-46-0	100	100
RIZ IRRIGUE	97-51-51	300	100
POMME DE TERRE	42-42-42	250	-
LEGUMES FEUILLES	80-34-34	200	100
LEGUMES FRUITS	68-68-68	400	-
TUBERCULES	68-68-68	400	-

Source: FAO (1996)

Les formules et doses du tableau 14 sont aussi applicables dans les autres pays. Parmi les formules de NPK les plus couramment appliquées, on note : 15-15-15 ; 17-17-17, avec des doses variant entre 150 et 300 kg par hectare. Parmi les engrais azotés le plus couramment utilisés est l'Urée, à des doses de 100 -150 kg par hectare.

6.4.4. Calculer la quantité des éléments nutritifs contenus dans un sac d'engrais

Pour calculer la quantité d'éléments actifs contenus dans un sac d'engrais, on divise les nombres de la formule imprimée sur le sac par 2 pour un sac de 50 kg et par 4 pour un sac de 25 kg. Ainsi pour un sac de 50kg et formule 51-51-76 (Manioc), on aura comme quantités d'éléments nutritifs:

- Quantité d'azote : 51/2 = 25,5 kg N
- Quantité de phosphates : 51/2 = 25,5 kg P_2O_5
- Quantité de potassium : 76/2 = 38 kg K_2O

La quantité total d'éléments nutritifs sera de 89 (25,5 kg + 25,5 kg + 36 kg) pour un sac de 50 kg d'engrais

6.4.5. Quantité de sacs pour un hectare

Pour calculer le nombre de sacs nécessaires à l'apport de 60 kg N par hectare sous forme d'urée qui contient 46% de N, en considérant un sac de 50 kg, on procède comme suit:

- 46 divisé par 2 est égal à 23. Ainsi chaque sac de 50kg contient 23 kg d'azote ;
- 60 divisé par 23 est égal à 2.6 sacs. Ainsi, il faudra à près 2 sacs et 2/3 sac d'engrais seront nécessaires pour couvrir un hectare ; ce qui correspond à : 130 kg (2,6 sacs x 50 kg) d'azote (N) pour un hectare.
- Quantité de Kg d'engrais : 2.6 sacs x 50 kg = 130 kg d'urée à appliquer par hectare

6.4.6. Quantité d'urée pour un champ de 500m²

Si la superficie du champ est de 500 m² la quantité requise d'urée est un vingtième de celle pour un hectare soit 6½ kg (pour rappel, un hectare fait 100m * 100m (soit 10 000 m²).

6.4.7. Risques de non respect des recommandations

Lorsque pour une formule recommandée est 60-30-30 on utilise un engrais 15-15-15, on court les risques d'appliquer:

- deux fois trop de phosphore et de potassium, ce qui entraine des pertes économiques et risques d'impacts sur l'environnement;
- seulement la moitié d'azote nécessaire, d'où des problèmes de carence

Il est conseillé dans ce cas d'appliquer seulement la moitié sous forme d'engrais 15-15-15, et achetez un autre engrais ne contenant que de l'azote simple.

6.5. Systèmes intégrés agriculture-élevage

L'association de l'élevage à l'agriculture est une pratique courante chez les paysans, surtout en zones de savanes. Dans les trois pays, l'élevage concerne principalement les petits ruminants (caprins) et les bovins. Deux pratiques prévalent selon les régions et les considérations socioculturelles:

- Dans la plupart des cas les animaux sont gardés dans des enclos près des cases où ils produisent de la fumure (bouse de vache, crottes de caprins, etc.). La fumure est collectée et transportée dans les champs ou les parcelles maraîchères pour y être enfouie dans le sol (planche photo).

- Dans le deuxième cas, on procède au pacage du bétail (généralement les bovins) dans les champs pendant la période hors saison de cultures. Ainsi, les animaux broutent les résidus agricoles et en retour produisent de la fumure qui est utilisée pour l'amendement organique des terres. Cette exploitation mixte constitue un des systèmes agricoles traditionnels les plus appréciés par les paysans agro-éleveurs dans nombre de zones de savanes, mais concernent les champs autour des villages généralement cultivés en maïs.

Ces systèmes peuvent être améliorés grâce à une meilleure alimentation et santé des animaux et la collecte et la transformation de la fumure par des processus d'humification et minéralisation. Leur adoption par les paysans est à encourager, compte tenu du fait qu'ils exigent peu d'investissement et procurent aux paysans de nombreux produits, notamment laitiers, viande, etc.

6.5. Façons culturales

La rotation des cultures joue est un moyen couramment utilisé pour gérer la fertilité des sols. Il s'agit de cultiver le champ en faisant succéder les cultures dans un certain ordre d'une campagne à l'autre ou de façons annuelles, biennales, triennales, quadriennale:

La rotation présente les avantages suivants:

- rompre le cycle vital des organismes nuisibles aux cultures;
- rompre avec le cycle de certainesadvantices;
- grâce aux systèmes racinaires différents, le profil du sol est mieux exploré, ce qui se traduit par une amélioration des caractéristiques physiques du sol, notamment de sa structure et consistance et donc de la disponibilité en eau et éléments minéraux;
- l'emploi de légumineuses permet des apports en azote symbiotique dans le sol;

CHAPITRE 7 : TECHNIQUES AGROFORESTIÈRES

Les systèmes agroforestiers sont les plus vieilles pratiques traditionnelles connues des paysans à travers des générations. Ils sont basés sur l'intégration des cultures et des arbres pérennes.

Contrairement aux ouvrages mécaniques antiérosifs dont le rôle est de lutter principalement contre l'érosion hydrique et d'améliorer le bilan hydrique des sols, les méthodes biologiques offrent de multiples avantages en ce sens qu'elles permettent de lutter contre l'érosion hydrique, d'amélioration la fertilité organique grâce à l'azote libéré dans les sols et de fournir aux paysans des produits divers (aliments, médicaments, bois, etc.).

7.1. Objectifs

Les techniques agroforestières ci-après proposées poursuivent trois principaux objectifs :

- la lutte contre l'érosion hydrique,
- l'amélioration de la fertilité des sols par recyclage des éléments nutritifs à travers la décomposition en matière organique de la biomasse végétale produite par les arbres et,
- la fournir de produits divers (aliments, médicaments, bois, etc.).

7.3. Amélioration de jachères traditionnelles

En effet, les jachères sont une partie intégrante du système traditionnel de production agricole en zones forestières et de savanes par lequel les paysans pauvres régénèrent leurs champs, après quelques années de mise en culture (2-3 ans).

Après épuisement des sols, les paysans abandonnent leurs champs qui sont laissés en jachère pendant 10-15 ans, dépendant des ZAE. Il existe deux grands types de jachères:

- jachères ligneuses : comportant des arborées ou des arbustives. Elles sont pratiquées en zones forestières ou de savanes arborées et sont plus stables que les jachères herbeuses des savanes, grâce probablement à la forte densité du couvert végétal régénéré et l'enracinement profond des arbres qui jouent un rôle essentiel dans la restauration de la fertilité du sol (Kisangani, 1994; Lejoly et al., 1989). Il s'agira d'améliorer le système en favorisant la repousse et la protection de rejets d'espèces dites améliorantes et à croissance rapide.
- jachères herbeuses: constituées de graminées et des espèces herbacées annuelles dont la décomposition de la biomasse fournit un important tapis de matière organique et servant de terres de pâturages pendant les années de jachères.

Dans le but de sédentariser les paysans, il convient d'améliorer les deux types de jachères par l'adoption d'une jachères améliorées avec l'introduction dans les champs d'espèces légumineuses herbacées et des plantes fixatrices de l'azote atmosphérique: *Sesbania sesban, Cajanus cajan, Crotolaria spp*. Stylosantes spp. *Bracharya Spp*., *Mucuna spp.*, etc. La jachère améliorée permet de régénérer assez rapidement (1-2 ans) les terres agricoles (Sanchez, 2002).

7.3. Le parc agroforestier

C'est le système agroforestier traditionnellement pratiqué par les paysans, consistant à laisser sur le champ un certain nombre d'arbres (les plus gros) lors du défrichement des champs et à protéger les jeunes régénérations lors des sarclages. Cependant, la croissance démographique et la pression foncière dans les zones de savanes ont quelquefois poussé les paysans à abattre les arbres pour libérer plus d'espace cultivable; ce qui accélère l'érosion du sol et la destruction des horizons humifères tout en diminuant les rendements des cultures et les bénéfices du système.

Il s'agira d'encadrer les paysans dans :

- sélection et protection des rejets d'arbres et arbustes des espèces améliorantes ;
- améliorer la densité des arbres (30-50 pieds à l'hectare) par la plantation d'espèces à croissance rapide.

7.4. Les cultures en couloirs

C'est un système agroforestier moderne développé avec succès en Afrique tropicale forestière, notamment au Cameroun, Ghana et Côte-d'Ivoire, sous l´impulsion de l'ICRAF et du Réseau de Recherche sur l'Agriculture en Couloirs pour l´Afrique (AFNETA).

La technique consiste à créer une association profitable entre des arbres fixateurs d'azote atmosphérique plantés à des écartements variables (3x4, 3x6, 3x8, etc.) et y introduire des cultures vivrières (mais, tarot, plantain et de manioc) entre les lignes d'arbres.

Une fois par an les arbustes sont émondés et la biomasse végétale retournée soigneusement dans le sol. La décomposition de la biomasse en matière organique apporte au sol les éléments nutritifs essentiels aux cultures intercalées. Plusieurs espèces s'apprêtent à ce type d'association, notamment, Lucena sp., Glyricidia sepium, *Grevillea* robusta, *Calliandra calothyrsus, Polyscias fulva* ou *Maesopsi eminii*).

EXPERIENCE AF.1:
Des expériences de cultures associant près de 200 arbres par ha (*Grevillea* robusta, *Calliandra calothyrsus, Polyscias fulva* ou *Maesopsi eminii*) plantés sous forme de haies vives sur micro-terrasses (0,5m x 5m) ont été développées avec succès dans la région orientale du pays. Ce système a contribué à réduire l'érosion de 5% sur une parcelle de manioc (avec une perte en terres de moins de 12,5 tonnes/ha/an comparé aux 303 t/ha/an sous manioc pure). Le rendement est passé jusqu'a 17 tonnes de biomasse par hectare et par an dont près de 10 tonnes de légumes-feuilles contenant 105kg d'azote, 47kg de phosphate et 26kg de potassium. L'introduction du système agroforestier de gestion durable à Kisangani et dans les différents terroirs environnants a été un véritable palliatif à de nombreux problèmes de dégradation des sols, ainsi qu'aux besoins de préservation de l'environnement écologique, socio-économique et à l'amélioration des rendements agricoles (Kumba, 2001).

7.5. Cultures sur friches de plantations forestières

Cette technique s'apparente aux pratiques traditionnelles de cultures itinérantes sous forêt. Elle consiste à établir des plantations forestières à l'aide d'espèces améliorantes et à croissance rapide. Après 8 ans de croissance, les arbres sont exploités et le bois est vendu par les producteurs ou transformé en charbon de bois pour satisfaire les besoins domestiques et la demande des zones urbaines. Les surfaces déboisées sont ainsi cultivées sans apports d'engrais minéraux avec des cultures vivrières (manioc, maïs, mil, sorgho, etc.), avec des rendements 5-10 fois supérieurs à ceux des terres de cultures itinérantes traditionnelles.

EXPERIENCE AF.2:
Des expérimentations de mise en cultures des terres forestières sont menées depuis 2004 par la Fondation Hans Seidel dans des plantations après exploitation des arbres de 8-10 ans (*Acacia horriculiformis* et *Acacia mangium*) réalisées entre 1993 et 1996 dans les zones du plateau Batéké, notamment à Mampu, par le Presbytérian Church (Wayne, 2005)[19] , ont démontré l'efficacité des systèmes agroforestiers dans la conservation des sols, le maintien de la fertilité des sols sableux des savanes et l'amélioration de la production agricole (photos 22 et 23), afin de substituer l'agriculture itinérante en forêts naturelles par des systèmes rotatifs arbres et cultures plus stables de production. Une superficie totale de 8000 ha de prairie a été réalisée.

[19]: Wayne Niles, 2005: Food Security Program — Micro Devru (Foods Resource Bank Project)

Après 8 ans de croissance, les arbres ont été exploités pour la production de charbon de bois pour satisfaire la demande de la ville de Kinshasa. Les surfaces déboisées ont été cultivées sans apports d'engrais minéraux avec du manioc avec un rendement à l'hectare de près de 30 tonnes contre 6 tonnes dans les champs témoins de savane typique. Le rendement du maïs était de 1,5 tonne par hectare contre moins de 1 tonne en système traditionnel. Le système est basé sur une rotation de 8 ans de plantation forestière et 1-2 ans de cultures vivrières ((Maïs (*Zea mays*), Manioc (*Manihot esculenta*), Bananiers (*Musa spp.*), etc.)). La taille d'exploitation est 8ha par famille, rapportant un revenu de $6,000-$8,000 par an grâce à la vente du charbon, de manioc, maïs et d'autres produits divers.

CHAPITRE 8 :

VALORISATION DE LA MATIERE ORGANIQUE

Même si on note dans les pays d'importantes et diverses sources de matière organique, leur mauvaise qualité et l'important tonnage nécessaire pour amender les sols limitent leur utilisation du fait de peu d'effets sur l'augmentation des rendements. Le compostage reste la meilleure solution pour améliorer la qualité et la disponibilité de la matière organique. Le compost humifié est utilisé comme engrais avant lelabour, à des quantités raisonnables. Son usage améliore non seulement la structure des sols, mais aussi la disponibilité en éléments nutritifs (azote).

8.1. Source de matière première

Le compost peut être fabriqué à partir de diverses sources de matières premières carbonées et azotées, entre autres:

- la biomasse végétale : herbe, résidus de récoltes, feuilles mortes des arbres, cendres de bois, sciures, copeaux, etc., collectées localement au niveau des champs,
- la fumure animale : bouse de vache, crottins de caprins, lisier de porc, fientes de volaille, coquilles d'oeufs, etc., disponible en quantité dans l'ensemble des pays (photo 24 & 25) ;
- des déchets organiques d'origine domestique: ordures, boues d'épuration, etc.

8.2. Conditions de compostage

Les organismes responsables du compostage ont besoin de trois éléments pour vivre :

- de nourriture équilibrée, composée d'un mélange de matières carbonées (brunes-dures-sèches) et de matières azotées (vertes-molles-humides);
- d'humidité, contenue particulièrement dans les matières azotées;
- d'air, dont la circulation est favorisée par les matières carbonées structurantes (dures).

8.3. Description du procédé

Très schématiquement, on peut distinguer diverses phases d'humification, s'enchainant l'une après l'autre, en fonction des agents biologique de décomposition ou de fermentation.

Tableau 15 : Différentes phases et agents de transformation du compost

PHASE	AGENTS	ACTIONS/EFFETS
LESSIVAGE	Eaux météoriques	Dissolution de composés solubles
DÉSAGRÉGATION	Faune	Pulvérisation des débris organiques
BIORÉDUCTION	Microbes/Enzymes (tube digest.)	Dégradation de la cellulose, de la lignine, des protéines.
	Microbes	Production de "substances préhumiques".
SYNTHÈSE	Lombricides	

COMPLEXATION	Microbes	Apparition des acides humiques et fulviques. Formation de complexes organo-minéraux (humines).
MINÉRALISATION		Production de CO^2; NO3; SO4; etc...

8.4. Les différentes méthodes de compostage

Les méthodes décrites ci-dessous ne concernent que la phase de fermentation active. La phase de maturation quant à elle se déroule habituellement à l'air libre en tas de grande dimension.

8.4.1. Méthodes biologiques d'humification de la matière organique

En RDC, certaines ONG (ONG-CADIM et FESIC[20]) évoluant dans la zone du Plateau Batéké (Mbankana) ont développée des techniques de collecte de la fumure animale (volaille, porcs, bovins, caprins et ovins) produite par les animaux élevés en stabulation. La fumure brute est débarrassée des éléments grossiers et transformée par des processus d'humification biologique (vers de terre), avant leur application dans les champs. Les effets sur l'augmentation des rendements ont été spectaculaire (50-100%). En effet les vers de terre[21] et les termites transforment la matière organique en terreau fertile (photo 27), utilisable sous forme d'engrais vert.

La culture ou l'élevage dans les fosses fumières du genre *Hyperiodrilus africanus* rencontré dans de nombreux pays d'Afrique tropicale, notamment en Angola, Cameroun, Côte d'ivoire, Ghana, Nigeria, Togo, RDC (Tran-Vinh-An, 1973) serait une solution très écologique de produire du compost de qualité. Leur production moyenne en terreau organique est en moyenne de 700 kg de rejets par are et par an. Il est intéressant de souligner que les vers de terre, par leur action mécanique et biologique, permettent une meilleure fixation et une meilleure conservation des produits de décomposition de la matière organique dans la partie minérale du sol. La teneur en fer est plus faible dans les rejets, alors que celle en calcium ainsi que la capacité d'échange cationique et le pH sont plus élevés.

8.4.2. En fosse

La méthode de compostage en fosse (Longueur = 1-3m, largeur = 1-2m, Profondeur = 0,5-1m) est la pratique la plus anciennement employée, conduisant rapidement à des conditions anaérobies. On utilise les différentes sources de matière organique. La fosse est creusée dans un endroit abrité et bien isolé.

Types de fosses

Il existe deux méthodes de procéder:

- fosse simple: les matériaux sont ainsi laissés dans la même fosse durant toute la durée de compostage.

[20]: Fédération des Exploitants du Système d'Interdépendance Complémentaire; Tel : 099884716, 0898263415, 0999755740; email : fesic98@yahoo.fr

[21] : L'action des vers de terre, genre *Hyperioddus africanus, sur* quelques propriétés pédologiques d'un sol sablonneux de la région de Kinshasa (Zaïre) TRAN-VINH-AN, *Institut Polytechnique Rural de Katibougou (République du Mali).*

- fosses successives (3-4): les dimensions de chaque fosse sont: l = 50cm, L = 150-300 cm, P = 150 cm. Utilisées si l'on veut obtenir rapidement du compost (45-60 jours de compostage). L'arrosage est intensif tous les 15 jours, à raison de 600 à 800 litres d'eau par m3 de matière à composter. Au fur et à mesure de leur décomposition, les matériaux sont transférés d'une fosse à l'autre et mélangés soigneusement pour améliorer l'aération et le brassage des matériaux.

Creusage de la fosse
La fosse est creusée avec des outils manuels ou mécaniques. Les dimensions de la fosse sont fonction de la matière à composter : P = 80-100 cm, L = 150-300 cm, l = 100-200 cm. La terre extraite de la fosse doit être étalée à la surface du sol tout autour de la fosse.
Les parois de la fosse doivent être biseautées pour éviter les éboulements

Entreposage des matériaux
Les déchets organiques y sont disposés en couches d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, alternant les produits riches en azote (type 'N') et ceux riche en carbone (type 'C'). Ils sont ensuite recouverts d'une épaisse couche de paille (isolation) puis d'une couche de terre d'environ 10 cm d'épaisseur. Cette méthode est très lente et partiellement anaérobie car aucun apport ultérieur d'eau ou d'air n'est effectué. Il faut maintenir des conditions de 50% d'aération et 50-70% d'humidité. Pratiquement on procède comme suit:

- Déposer une couche de terre argile plus ou moins imperméable au fond du trop pour diminuer la percolation, si le sol est sableux;
- Déposer une fine couche de terre sableuse au fond de la fosse si le sol est argileux, pour éviter des stagnations d'eau ;
- Déposer les matériaux à composter dans la fosse en plusieurs couches plus u moins homogènes, en alternant les types de matériaux (résidus de récolte + biomasse végétale (feuilles, branches, paille, etc.) + couche de fumier + fine couche de cendres;
- Arroser abondamment : par exemple pour une fosse de 6m3 (3x2x1), il faut mettre 150-200 litres d'eau;
- Tasser le mélange, soit par piétinement, soit par le moyen d'une masse.
- Arroser une fois par semaine

La durée moyenne du compostage varie de 2-4 mois, selon les cas (nature du matériau, climat, régularité de l'entretien, etc.).
Il faut respecter l'aération

Les outils nécessaires aux travaux de compostage, au niveau paysan sont, entre autres : sceau de 20 l de contenance, brouette ou charrette pour le transport des matériaux, pelle ronde, pelle bêche, arrosoir, creusoir, râteau, pioche, coupe-coupe, etc.

8.4.3 En tas

C'est la méthode de compostage la plus commune. Les déchets sont rassemblés en andains de longueur indéfinie et dont la hauteur dépend à la fois de la porosité à l'air (50%) du compost (plus elle est élevée, type 'P', plus le tas peut être haut) ainsi que de la fréquence et de la méthode d'aération choisie (une fréquence élevée et/ou une aération par ventilation forcée autorisent des tas plus importants).

8.4.4. En enceinte close ou 'digesteur

Les déchets sont placés dans des digesteurs. Ce sont des enceintes fermées à l'intérieur desquelles on place la matière organique brute. Il est possible de contrôler le déroulement de la fermentation en agissant essentiellement sur l'aération. Le brassage et l'aération des matériaux sont le plus souvent réalisés en continu.

8.4.5. Silo vertical

Les déchets sont acheminés, via une bande transporteuse, au sommet de la tour de digestion. Les mouvements descendants sont assurés par des racleurs constitués d'une succession de plateaux. À chaque niveau, ou dans la masse du compost, sont installés des tuyaux d'aération permettant d'oxygéner le milieu.

8.4.6. Biostabilisateur

Il s'agit d'un digesteur cylindrique rotatif d'une longueur de 25 à 35 mètres et d'un diamètre de 3 à 4 mètres, disposé horizontalement. Le brassage et l'aération du produit ainsi que sa progression vers l'extrémité du dispositif sont assurés par le mouvement rotatif continu du cylindre composé de plaques déflectrices hélicoïdales. Après 4 à 6 jours dans le biostabilisateur, les déchets sont transférés sur l'aire de maturation où ils vont subir l'humification et la minéralisation par biosynthèse.

Toutes ces techniques sont basées sur le principe d'aération, d'humidification, de fermentation biologique. Le brassage et l'aération permettent d'assurer une fermentation plus homogène de toute la masse organique, chaque particule évoluant suffisamment de temps au centre du compost, où la température est la plus élevée. La fréquence et la qualité des retournements sont donc les paramètres fondamentaux des techniques de compostage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aubert Guy et P. Segalen, 1966: Projet de classification des sols ferralltiques. Cahier ORSTOM, série pédologie, Vol IV. no.4, 97-110pp.;

André Mfoukou-Ntsakala, Michel Bitémo, Niko Speybroeck, Guido Van Huylenbroeck et Eric Thys; 2006: Agriculture urbaine et subsistance des ménages dans une zone de post-conflit en Afrique centrale». *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.,* volume 10 (2006) numéro 3 : 237-249

AUBERT (G.) et SEGALEN (P.), 1966. - Projet de classification des sols ferrallitiques du Congo. Cah. ORSTOM, sér. ***PédoJ.,*** IV, 4 : 97-112.

Dubois JCL, 2005: Les jachères forestières tropicales : leur importance et leur avenir, 25p.

EUROCONSUL, 1989: Agricultural Compendium: for rural development in the tropics and Subtropics. Ed. Elsevier, Amsterdam. 740p

FAO. 1992. The Use of Saline Water for Crop Production, *Bulletin d'irrigation et de drainage* no. 48.

FAO, 179: Evaluation des sols; 85p.

Lejoly, J., Kamabu V., Bola M., Mosango M et Bebua B, 1989 : Jachères améliorantes et fertilité des sols dans les sous –régions de Kisangani et de la Tshopo (Haut-Zaïre), Rapport de 1ère année. Projet CEE-ULB-UNIKIS, sous projet de la Faculté des Sciences : 88P

Luamba Me Duma, J.; 2002 : Indicateurs sur l'utilisation rationnelle des engrais minéraux en RDC. SENAFIC34p.

Lungu, O.I et V.R.N Chinene, 1993: Les systèmes de cultures et de gestion et leurs effets sur la productivité des sols en Zambie

Martin D., 1981: Les sols du Gabon : pédogénèse, répartition et aptitudes; carte au 1 :2.000.000

MITI T, SOYER J & ALONI K. 1984 : Splash en milieux subnaturels de régions tropicales (Shaba, Zaïre). Zeitschrift fur Geomorphologie, Suppl. Bd 4, 75-86.

Muland et al. 2007: **Table Ronde sur l'Agriculture en RDC Kinshasa, 19 - 20 mars 2004.Vers une stratégie de développement agricole, base solide du décollage économique**

Muller J.P., 1972 : Etude macromorphologique des sols ferrallitiques appauvris en argiles du Gabon. Cahier ORSTOM, série pédologie, Vol. no.1, 77-93pp.;

Muller J.P., 1974 : Morphologie des horizons supérieurs des sols ferrallitiques du Gabon (appunites et épi-structurons dyscrophes). Cahier ORSTOM, série pédologie, Vol.XII. no.3/4, 277-287pp.

NGENZI, E.; 1992: Application d'une nouvelle méthode de gestion des sols- dans une zone montagneuse tropicale: terrasses radicales au Rwanda. In: RBseau Erosion; Bulletin 12. Montpellier, **p.** 94 – 102

Odongo, G., 1988 : Les sols rouges du Congo: types, étendue, classification et mise en valeur. Huitième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Yaoundé, Cameroun, 19-28 Janvier 1987. Rapport sur les ressources en sols du monde. FAO, No.61; pp97-102,203p.

Prochnow, L.I, 2000: La caractérisation chimique et l'efficacité agronomique des engrais phosphatés acidifiés. IFDC report, Décembre 2000, p4

Roose, E., F. Ndayizigiye, l. Sekayange et J. Nsengimana; 1992: La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilite des sols (GOCES): 'Une nouvelle strategie pour l'intensification de la production et la restauration de l'environnement en montagne. In: Reseau Erosion, Bulletin **12.** Montpellier, p. **140** - **160**

Sadio, 2007a: Conservation des sols et gestion intégrée de la fertilité des sols. Rapport de consultation, RDC et Congo. 107p

Sadio, 2007b: Conservation des sols et gestion intégrée de la fertilité des sols. Rapport de consultation, Gabon. 83p

Sadio, S.; 2004 : Alternatives to slash-and-burn: negotiating trade-offs. Contribution to FAO-SOFO 2005; 5p.

Sanchez, Pedro, 2002: Soil Fertility and Hunger in Africa, Science, Policy Forum, Vol. 295, 15 March, pp. 2019-2020.

SOYER J, MITI T & ALONI K. 1982: Effets comparés de l'érosion pluviale en milieu périurbain de région tropicale (Lubumbashi, Shaba, Zaïre). Revue de Géomorphologie Dynamique, 31, 71-80.

Strongaard, P.; 1984: L'effet immédiat du brûlis et de l'amendement des terres par les cendres. Plant and soil, No.80; 307-320pp

Tollens, Eric, K.U.Leuven, 2004: Les défis: Sécurité alimentaire et cultures de rente pour l'exportation. Principales orientations et avantages comparatifs de l'agriculture en R.D.Congo-Table Ronde sur l'Agriculture en RDC, Kinshasa, 19-20 mars 2004 : Vers une stratégie de développement agricole, base solide du décollage économique; Alliance Belgo-Congolaise.

Tondeur, G; 1997: L'agriculture nomade au Congo belge. Mission de conservation des sols : Extraits d'une étude préparée à l'occasion d'une enquête générale de la FAO sur l'agriculture nomade

TRAN-VINH-AN; 1983 : L'action des vers de terre, genre *Hyperioddus africanus, sur* quelques propriétés pédologiques d'un sol sablonneux de la région de Kinshasa (Zaïre), *Institut Polytechnique Rural de Katibougou (République du Mali). Cah. ORSTOM, série Pt!dol., vol. XZ, no 314, 1973: 249-256pp*

VAN CAILLIE X. 1983: Hydrologie et érosion dans la région de Kinshasa. Analyse des interactions entre les conditions du milieu, les érosions et le bilan hydrologique, édité par l'auteur, Ohain (Belgique), 554p.

Vancutsem, c. J.-F. Pekel, C. Evrard, F. Malaisse et P. Defourny; 2006 : Carte de l'occupation du sol de la République Démocratique du Congo au 1 : 3 000 000. *Notice de la carte de l'occupation du sol de la RDC 4.* Presses Universitaires de Louvain, Janvier 2006. UCL-Geomatics (Louvain-la-Neuve, Belgique) 2006. ISBN 2-87463-016-0 Dépôt légal D/2006/9964/6

Wayne Niles, 2005: Food Security Program — Micro Devru (Foods Resource Bank Project)

White F., 1983 : La végétation de l'Afrique, mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique Unesco/AETFAT/UNESCO, traduit de l'anglais par P. Bamps, Jardin Botanique National de Belgique.

PLANCHE PHOTOS No: 1

DEGRADATION DES SOLS PAR EROSION HYDRIQUE ET CONSEQUENCES

Photo 8 : Erosion multiforme (ravinement, nappe, etc.) suite aux défrichements

Photo 9: Erosion en ravinement au niveau de la zone de rupture de pente (Plateau)

Photo 10: Érosion en nappe sur un glacis

Photo 11 : Fleuve Congo

Photo 12 : Rivière de Djoué, affluent du Fleuve Congo

Conséquence des dépôts de sédiments (arrachés des versants déboisés et transportés par les eaux de ruissellement) sur la qualité de l'eau du fleuve Congo et de la rivière Djoué. Sur la photo 12 on peut observer le dépôt de sédiments sableux en amont du pont.

PLANCHE PHOTOS No: 2

CAUSES ET FACTEURS DE LA DEGRADATION DES SOLS

Photo 13 : Déforestation causée par la conversion des forêts en champs sous système de l'agriculture itinérante et de brûlis

Photo 14 : Désherbage et labour superficiel en billons, à l'aide de houe traditionnelle

Photo 15 : Billons surélevés, confectionnés manuellement à l'aide de la houe traditionnelle

Photo 16 : Labour sous forme de larges bandes, le long des pentes des versants. On peut observer la différence de l'orientation des billons dans le bas-fond

Photo 17 : Erosion des sols suite aux mauvaises techniques de préparation des sols (labour en plein sur le sommet de la colline) et cultures sur billons réguliers dans le sens de la pente sur les versants à pentes fortes

PLANCHE PHOTOS No: 3

AMELIORATION DES TECHNIQUES DE PREPARATION DU SOL

Photo 18: Plates-bandes régulières (10-20cm)

Photo 19: Plates-bandes surélevées (30-40 cm)

(Périmètre de Tshengue, zone périurbaine de Kinshasa)

Photo 20: Plates-bandes intermédiaires entre billons larges et plates-bandes régulières (Périmètre de Loma, Bas-Congo)

Photo 21: Plates-bandes larges subdivisées petits billons (Périmètre de Loma, Bas-Congo)

PLANCHE PHOTOS No: 4

CULTURES VIVRIÈRES SUR BRÛLIS FORESTIERS

Photo 22: Culture de maïs sur terre humifère après exploitation de *Acacia horriculiformis* (Mampu, Plateau Batéké)

Photo 23 : Cultures sur cendres après brûlis de la biomasse foliaire issue de l'exploitation de la plantation d' *Acacia mangium* (Mampu, Plateau Batéké)

PLANCHE PHOTOS No:5

Photo 24 : Intégration élevage-agriculture. Bovins gardés à l'étable pour la production de fumure organique. Les bouses de vache sont collectées puis épandues dans les champ avant les cultures.

Photo 25: Fumure animale: lisier de porc

Photo 26 : Enfouissement de l'herbe dans la plate-bande à l'aide houe traditionnelle

Photo 27: Biomasse végétale humifiée grâce à l'action des vers de terre

ANNEXES

Annese 1 : Fiche des paramètres de référence pour la caractérisation des sols

FICHE No. : PARAMETRES DE REFERENCE DES CARACTERISTIQUES DU SOL

Légende

1) Désignation des horizons

A	Couche supérieure du sol (<30% MO)
B	Sous-sol
C	Roche-mère
D	Changement lithologique
E	Horizon de lessivage
I	Horizon d'accumulation
O	Horizon organique d'accumulation
R	Soubassement rocheux
T	Horizon tourbeux
0	Peu développé
AB	Horizon de transition
B/C	Horizon complexe
a	Anmoorique
b	Enfoui
ch	Altéré chimiquement
cn f	Avec concrétions Avec matière organique partiellement décomposée (moder)
fe	Enrichi en oxydes de fer
fo	Fossile
g	Avec taches de rouille
gg	Bariolé (hydromorphe)
h	Humifère
k	Enrichi en calcaire
l	Peu décomposé (litière)
m	Massif, cimenté
na	Riche en alcalis Enrichi
ox	en oxydes Fe/Al
P	Labouré Enrichi en quartz
q	résiduel Réduit en
r	permanence
sa	Enrichi en sels solubles
st	Structuré
t	Enrichi en argile
vt	Vertisolique, fissuré
w	Altéré
x	Compact
y	Recouvert de matériel d'origine étrangère
z	Physiquement désagrégé
0	Peu marqué

2) Structure

1	Structure granulaire
2	Structure cohérente
3	Structure en agrégats
4	Structure artificielle

3) Agrégats

1	En grumeaux
2	Polyédriques
3	Subpolyédriques
4	Prismatiques
5	En plaquettes
6	Friables
7	En masse

4) Macroporosité

0	Absence de pore
1	Pores petits / en nombre faible
2	Pores petits / en nombre moyen
3	Pores petits / en nombre élevé
4	Pores moyens / en nombre faible
5	Pores moyens / en nombre moyen
6	Pores moyens / en nombre élevé
7	Pores grossiers / en nombre faible
8	Pores grossiers / en nombre moyen
9	Pores grossiers / en nombre élevé

5) Fentes de retrait / Interstices

	(entre agrégats)
1	Fin (<1 mm)
2	Moyen (1-2 mm)
3	Grossier (>2 mm)

6) Pistes de vers

0	Aucune
1	Peu (doivent être recherchées)
2	Beaucoup (sautent aux yeux)

7) Compacité

1	Très lâche (<0.8 g/cm^3; litière)
2	Lâche (0.8-1.2 g/cm^3; couche supérieure du sol)
3	Moyennement compact (1.2-1.4 g/cm^3; sous-sol)
4	Compact (1.4-1.8 g/cm^3; compacté)
5	Très compact (>1.8 g/cm^3)

8) Texture

			Argile %	Silt[22] %
1	Sable	s	0-5	0-15
2	Sable silteux	su	0-5	15-50
3	Sable limoneux	sl	5-10	0-50
4	Sable fortement limoneux	sfl	10-15	0-50
5	Limon sableux	ls	15-20	0-50
6	Limon	l	20-30	0-50
7	Limon argileux	la	30-40	0-50
8	Argile limoneuse	al	40-50	0-50
9	Argile	a	50-100	0-50
10	Silt sableux	us	0-10	50-70
11	Silt	u	0-10	70-100
12	Silt limoneux	ul	10-30	50-90
13	Silt argileux	ua	30-50	50-70

9) Matière organique

			% humus
1	nh	Non humifère	0.0
2	tfh	Très faiblmt humifère	0.1-1.9
3	fh	Faiblement humifère	2.0-4.9
4	h	Humifère	5.0-9.9
5	rh1	Riche en humus	10.0-14.9
6	rh2	Riche en humus	15.0-19.9
7	trh	Très riche en humus	20.0-29.9
8	org	Organique	30.0-100

10) Forme de l'humus

1	Mull
2	Moder
3	Humus brut
4	Tourbe

11) Classes de pierrosité

			% de pierres dans le sol
0	np	Non pierreux	0.0
1	pp	Peu pierreux	<5.0
3	fp	Faiblement pierreux	5.0-9.9
4	p	Pierreux	10.0-19.9
5	tp	Très pierreux	20.0-29.9
6	rp	Riche en pierres	30.0-49.0
7	ep	Extrêmement pierreux	>50.0

12) Fraction de la pierrosité

PF	Pierrosité fine : 0.2 - 5 cm
PG	Pierrosité grossière : 5 - 20 cm
BL	Blocs : >20 cm
1	>75% PF
2	>50% PF, >25% PG
3	>50% PF, >25% BL
4	>75% PG
5	>50% PG, >25% PF
6	>50% PG, >25% BL
7	>75% BL
8	>50% BL, >25% PF
9	>50% BL, >25% PG

13) Teneur en calcaire

(test au HCl à 10%)

0	Pas de $CaCO_3$
1	Présent dans les pierres seulement
2	Faible effervescence
3	Effervescence moyenne
4	Effervescence marquée

14) Hydromorphie

0	Aucune
1	Concrétions noires
2	Taches de rouille diffuses
3	Taches de rouille nettes
4	Marmorisation

[22] : Silt : limons fins

8	Sous forme de peaux	5g	Couleurs de réduction (gris , bleu, vert)
		7	Décoloration en milieu humide

Annexe 2: Rôle des différents éléments nutritifs et les exigences des cultures

Rôle des éléments nutritifs

Les principales sources d'éléments nutritifs dans le sol sont:

- les éléments en solution
- les réserves minéralogiques, libérées au fur et à mesure de l'altération des roches et des minéraux
- les éléments retenus par le complexe absorbant
- les éléments immobilisés sous forme organique.

La disponibilité et l'assimilabilité de ces éléments dans le sol dépend de plusieurs facteurs :

- les prélèvements d'éléments nutritifs par les plantes et des éléments remplacés sur le complexe absorbant par des ions H et/ou Al;
- les processus d'humidification, provoquant l'apparition de composés acides, plus ou moins neutralisés, ensuite, par les bases échangeables;
- les pratiques culturales, notamment les apports d'engrais, ceux-ci pouvant être à action acidifiante ou alcalinisante.

L'épuisement des éléments nutritifs entraine le remplacement de ceux-ci dans le complexe absorbant par des éléments nocifs (Al++, H+, etc.) qui contribuent à augmenter l'acidité du sol.

Chaque élément minéral a un rôle propre à jouer dans la croissance des végétaux.

Azote : joue un rôle primordial dans le métabolisme des plantes. C'est le constituant numéro un des protéines, composants essentiels de la matière vivante. L'azote du sol généralement sous forme organique (humus) ou minérale (ammonium NH_4+, nitrate NO_3-) apportés par la litière des plantes, les résidus des récoltes précédentes ou par les engrais organiques, doit être transformé par un processus de minéralisation par l'action des bactéries du sol en nitrates pour être utilisable par les plantes. De ce fait, l'azote nécessaire à la croissance et la production des cultures devra être apporté grâce à des pratiques de fertilisation. Il faut noter que l'azote sous forme d'ions nitrate étant un élément très soluble, peu retenu par le sol, il n'est pas nécessaire d'en apporter en trop grande quantité, du fait que l'excédent va être entrainé par les eaux d'infiltration (dissous, puis emporté par l'eau circulant dans le sol) et donc perdu pour la plante. Son apport doit donc être fait, autant que possible, juste avant son absorption par la plante, afin d'éviter les pertes et le lessivage vers lanappe phréatique. L'azote peut aussi se concentrer dans les tissus des cultures créant

ainsi un excès de nitrate néfaste pour la santé. Toutes ces considérations expliquent que son apport soit généralement annuel, voire fractionné.

Potassium

Le potassium est un élément peu labile dans la plante. Son rôle est plus significatif au niveau de l'absorption des cations, dans l'accumulation des hydrates des protéines, le maintien de la turgescence de la cellule et la régulation de l'économie de l'eau de la plante, ainsi que pour le transfert des assimilats vers les organes de réserve (bulbes et tubercules). Il accroît aussi la résistance de la culture à la sécheresse et aux maladies.

Dans le sol, le potassium se trouve uniquement sous forme minérale, provenant soit de la décomposition de la matière organique et des minéraux du sol, soit des engrais minéraux ou verts. Il peut être sous forme fixé retenu dans des complexes argilo-humique (argile+humus), donc pouvant être perdu en quantité importante par drainage. Le potassium est souvent apporté en une seule fois, de façon irrégulière, en grande quantité, car il est stocké par le sol et libéré progressivement.

Phosphore

Le phosphore intervient dans les transferts énergétiques (ATP) et la photosynthèse. Il est essentiel pour la floraison et la maturation des graines et fruits.

Il se trouve dans le sol sous trois formes :

- assimilable: il est lié au complexe argilo-humique (0.2 à 1 kg de P_2O_5 par hectare) par le calcium et le magnésium
- combinée : il est immobilisé, en partie, par les hydroxydes d'aluminium et de fer dans les sols acides (dans ce cas, il est nécessaire de chauler le sol pour le libérer)
- insoluble : fortement fixé sous forme de phosphates de calcium, dans le cas des sols calcaires

C'est un élément peu labile dans le sol et qu'il convient d'apporter avec beacoup de précautions, de préférence dans la zone rhizosphérique des plantes où les risques de drainage sont très limités. La pomme de terre et le manioc sont des plantes très exigeantes en phosphore. Par contre le maïs grain et le soja sont moins exigeantes en phosphore. Pour certains cultures, certains stades sont plus

sensibles au manque de phosphore que d'autres: par exemple le stade de tallage pour les céréales, le stade de 4 à 10 feuilles pour le maïs.

Magnésium

Le magnésium est un constituant de la chlorophylle et joue donc un rôle important dans la photosynthèse. Cependant, il est surtout destiné à améliorer la structure du sol (et non pas tant à « nourrir » la plante). Il est en faibles quantités dans le sol et de ce fait doit être plutôt apporté sous forme d'amendements organiques ou calcimagnésiques.

Calcium

Le calcium est surtout destiné à améliorer la structure du sol et joue pour la plante un rôle de structure et un rôle métabolique. Il est disponible dans le sol en faibles quantités, de ce fait il faut plutôt l'apporter sous forme d'amendement.

Soufre

C'est un élément nécessaire à la croissance des plantes. Il joue un rôle essentiel dans le métabolisme des vitamines. Mais de façon générale, il n'est que peu fixé dans les sols. Il faut donc procéder aux apports de fumier (en moyenne 1,25 unité de SO_3 par tonne), ou d'engrais minéraux, tels que le sulfate d'ammoniaque (60 % de SO_3), le superphosphate de chaux simple (plus de 27 % de SO3) et le sulfate de potasse (45 % de SO_3). Pour être assimilé par les plantes, le soufre doit être sous forme d'ions sulfates (SO_4) absorbables par les racines.

Sous la forme commercialisable, le soufre est exprimé en SO_3 (anhydride sulfurique) sur les étiquettes d'engrais conformément à la réglementation. Même si la plupart du soufre apporté aux cultures l'est sous forme sulfate (SO_4--), il existe d'autres formes de soufre comme le thiosulfate ou le soufre minéral (S). Seule la forme Sulfate est directement assimilable par la plante et soluble dans la solution du sol. Les autres formes devront s'oxyder sous l'action des bactéries du sol pour se rendre assimilable. Mais utilisé en excès, ils peuvent avoir des effets réducteurs ou action acidifiants sur le sol.

C'est élément très utile pour certaines cultures, notamment les crucifères (laitue, choux, etc.), les liliacées (ail, poireau, oignon). On insiste fréquemment sur la nécessité de respecter un rapport entre S et N à tout moment du cycle végétatif.

Chlore : indispensable aux plantes à des degrés divers, mais généralement à faibles quantités. Il peut être apporté également par des engrais tels le chlorure

de potassium, ou directement le sel marin (chlorure de sodium) transporté par les embruns marins qui les déposent sur les feuilles des plantes.

Oligo-éléments

Ces éléments sont présents dans le sol sous forme de traces, sans valeur significative pour la nutrition des plantes. Mais il peut s'avérer indispensable pour certaines cultures. Leur déficience fait apparaitre des signes de carences en cuivre, en zinc, en fer (quand le fer est bloqué dans les sols très calcaires), en manganèse, en bore (déjà cité) que l'on note assez fréquemment sur certaines cultures.

Annexe 3: Fertilisation des cultures

Tableau A3.1: Formules théoriques préconisées par FAO (1996) pour la RDC

CULTURES	**PROVINCES**					
	Kasaï Oriental	**Katanga**	**Bas Congo**	**Bandundu**	**Prov. Orientale**	**Kasaï Occidental**
MAIS	60-40-0 90-60-0	60-40-0 90-60-0	60-40-0 90-60-0	60-40-0 90-60-0	60-40-0 90-60-0	60-40-0 90-60-0
MANIOC		50-50-50 100-100-100	50-50-50 100-100-100	50-50-50 100-100-100	50-50-50 100-100-100	50-50-50 100-100-100
ARACHIDE	20-45-0	20-45-0	20-45-0 20-45-45	20-45-0	20-45-0	20-45-0
HARICOT			30-30-30 60-60-60			30-30-30 60-60-60
RIZ IRRIGUE			100-50-50 120-80-80	100-50-50 120-50-50		
RIZ PLUVIAL				20-45-0	40-40-0 60-60-0	40-40-0 60-60-0
SOJA			20-45-0		20-45-0	20-45-0
COTON	30-30-0 60-60-0				30-30-0 50-50-0	
POMME TERRE		50-50-0 100-100-100				
LEGUMES FEUILLES	60-30-30 (176 Kg de NPK17-17-17 et 65 Kg d'Urée)					
LEGUMES FRUITS	60-60-60 (353 Kg de NPK17-17-17)					
LEGUMES BULBES ET RACINES	60-40-40 (235 Kg de NPK17-17-17 + 43 Kg d'Urée)					

Tableau A3.2: Formules et Quantités d'engrais recommandées par SENAFIC (2002) pour les différentes cultures dans les provinces de: Kasaï, Katanga, Bandundu, Bas Congo, Province orientale, Shaba et Plateau Batéké.

ENGRAIS (KG)	FORMULES			QUANTITES/HECTARE			
	PETITE EXP	MOY. EXP	GRAN.EXP	PE.EXP	MOY.EXP	GRAND.EXP	
	MANIOC						
NPK	51-51-51	51-51-51 51-51-76[23]	51-51-76	300 (200+100)	300 (1 apport) 300	600 (400+200)	
K2SO4					50		
	MAIS						
NPK	64-46-0 75-47-29[24] 97-51-51[25]	96-69-0	143-51-51	100DAP 200 300	150	300	
UREE				100DAP 100 100	150	200	
	ARACHIDE						
NPK	18-46-0 34-34-34	18-46-0		100	100DAP 200		
K2SO4					100		
CaO				1000	1000		
	SOJA						
NPK	18-46-0	18-46-50	34-34-34	100DAP	100DAP	200	
K2SO4					100		
CaO				1000		1000	
	HARICOT						
NPK	34-34-34		68-68-68	200		400	
CaO				1000			
	RIZ PLUVIAL						
NPK	64-46-0	96-69-0		100	150	-	
UREE				100	150	-	
	RIZ IRRIGUE						
NPK	97-51-51	131-85-85		300	500		
UREE				100	100		
	POMME TERRE						
NPK	42-42-42	85-85-85		250	500		
	LEGUMES FEUILLES						
NPK	80-34-34	126-34-34		200	200		
UREE				100	200		
	LEGUMES FRUITS						
NPK	68-68-68			400			
	LEGUMES TUBERCULES						
NPK	68-68-68			400			

[23] : Plateau Batéké
[24] : Région de Shaba
[25] : Plateau Batéké