

EFFACER PAGE D'ACCUEIL AIDE PRÉFÉRENCES

[rechercher](#) [sujets](#) [titres a-z](#) [organisations](#) [comment](#)

L'agroforesterie pour la conservation du sol
Anthony Young
CTA

[ETENDRE](#) [REDUIRE](#) [DÉTACHER SOMMAIRE](#) [TEXTE](#)

L'agroforesterie pour la conservation du sol. (CTA, 1995, 194 p.)

→ (introduction...)

- Avant-propos
- Préface
- Remerciements
- Première partie - Conservation du sol et agroforesterie
- Deuxième partie - Agroforesterie et lutte contre l'érosion du sol
- Troisième partie - Agroforesterie et entretien de la fertilité du sol
- Quatrième partie: agroforesterie pour la conservation des sols
- Résumé
- Bibliographie
- Liste des abréviations utilisées

L'agroforesterie pour la conservation du sol. (CTA, 1995, 194 p.)

Anthony Young
Traduit de l'anglais par Michel Baumer

Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale ACP-UE
Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation ACP-EU

International Centre for Research in Agroforestry
Centre international pour la recherche en agroforesterie

Le Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA)

Le Centre technique de coopération agricole et rurale a été fondé en 1983 dans le cadre de la Convention de Lomé entre les Etats membres de l'Union européenne et les Etats du groupe ACP (Afrique Caraïbes, Pacifique). Le CTA est à la disposition des Etats ACP pour leur permettre un meilleur accès à l'information à la recherche à la formation et aux innovations dans les domaines du développement agricole et rural et de la vulgarisation. Pour atteindre cet objectif le CTA commandite et publie des études; organise et apporte son soutien à des conférences ateliers et séminaires; édite ou coédite une grande diversité d'ouvrages, comptes rendus, bibliographies et annuaires; renforce les services de documentation dans les pays ACP; et propose Un important service de documentation.

Adresse postale:
Postbus 380
6700 AJ Wageningen Pays-Bas

Le Centre international pour la recherche en agroforesterie

Le Centre international pour la recherche en agroforesterie (ICRAF) créé en 1977, est une organisation autonome, sans but lucratif dont l'objectif est de contribuer à atténuer/le déboisement des régions tropicales l'épuisement des terres et la pauvreté des populations rurales par le biais de systèmes agroforestiers améliorés. Son mandat consiste à mener et appuyer la recherche en agroforesterie cette dernière étant définie comme l'intégration volontaire d'arbres et arbustes dans les systèmes de production agricole et/ou animale,

En mai 1991 l'ICRAF est devenu un membre à part entière du Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale (GCRAI) une association informelle de gouvernements d'organisations internationales et de fondations privées qui parraine 18 centres internationaux de recherche agricole dans le monde.

Adresse postale:
P.O. Box 30677
Nairobi, Kenya

1995 © CTA pour l'édition française
 1989 © CAB International pour l'édition originale anglaise (ISBN 085198648X) parue sous le titre «Agroforestry for Soil Conservation» n°4.
 dans la collection «Science and Practice of Agroforestry» de l'ICRAF

Révision: Context Language Services

Photographies fournies par l'auteur:

- 1.- *Acacia albida* sur terre cultivée, Malawi
- 2 - *Grevillea robusta* sur banquettes antiérosives, Rwanda
- 3 - Haies de *Leucaena leucocephala* disposées suivant les courbes de niveau, Philippines

C.I.P. Centre technique de coopération agricole et rurale

Young (Anthony); Bauner (Michel) trad.

L'agroforesterie pour la conservation du sol/par Anthony Young. -

Wageningen: Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA) 1995. - 194 p.; 51 ill, 492 réf- ISBN 92 9081 130 7

Mots clés AGROVOC

Agroforesterie; sol; conservation des sols; érosion; fertilité du sol

Avant-propos

J'écris cet avant-propos avec une satisfaction et un plaisir particuliers, qui vont bien au-delà de ce que peut éprouver un Directeur général assistant à la publication d'un ouvrage majeur de son organisation mon sentiment est beaucoup plus proche de l'excitation que ressent celui qui a "découvert" l'agroforesterie en travaillant sur la dynamique entre les arbres et les sols et qui a pris conscience des possibilités de gestion que sous-tend cette dynamique, sans avoir jamais eu le temps de les exploiter. Le présent ouvrage de Anthony Young est sans conteste Un bilan faisant autorité sur la gestion des telles tropicales Son impact sur nos connaissances et notre compréhension des potentialités qu'offre l'agroforesterie dans l'exploitation durable des sols tropicaux sera considérable.

L'idée de cet ouvrage est née en 1981 L'intention était d'en faire la première de cinq études visant, sur la base des connaissances actuelles, à analyser en profondeur le potentiel qu'offre l'agroforesterie pour résoudre des problèmes intéressant en particulier les scientifiques et autres spécialistes de disciplines traditionnelles d'exploitation des terres Les ouvrages suivants devaient traiter du potentiel de l'agroforesterie pour accroître la production d'aliments, de bois de feu et de fourrage, respectivement, et évaluer les possibilités socio-économiques de l'agroforesterie. La décision d'inclure ces études dans le programme d'action de l'ICRAF repose sur la conviction qu'il était nécessaire de prouver de manière incontestable et scientifique aux spécialistes de différentes disciplines, le potentiel qu'offre l'agroforesterie pour développer la productivité, la durabilité et la diversité des systèmes d'exploitation à petite échelle

La plupart de ces personnes, spécialisées en agronomie, en zoologie, en foresterie ou en économie, avaient réagi de manière relativement froide aux affirmations enthousiastes, mais dénuées de preuves quantitatives, des premiers défenseurs de l'agroforesterie, selon lesquels il suffisait de planter n'importe quel arbre, n'importe où pour en tirer des résultats miraculeux. L'ICRAF s'est donné comme priorité absolue de donner à la discipline de L'agroforesterie des bases scientifiques saines Les ouvrages en question devaient être un moyen d'y arriver.

Depuis le début des années 80, L'agroforesterie a rapidement progressé. A l'heure actuelle, il n'est plus vraiment nécessaire de soutenir sa cause face au scepticisme des milieux scientifiques et du développement. L'intérêt rapidement croissant manifesté ces dernières années envers l'agroforesterie, attesté par une myriade d'activités de R-D, ne laisse aucun doute sur le fait que cette approche est aujourd'hui acceptée par la plupart, si pas par tous les spécialistes des sciences et du développement L'inquiétude grandissante dont font preuve les plus hautes autorités politiques internationales quant à la durabilité du développement agricole, vu l'épuisement manifestement rapide des ressources naturelles, a encore davantage mis l'agroforesterie sur le devant de la scène.

Au coeur de la question de la durabilité de la production agricole réside le problème de la conservation du sol. Le présent ouvrage apporte l'analyse la plus fiable à l'heure actuelle des différentes hypothèses selon lesquelles les arbres et les arbustes, pour autant qu'ils soient choisis et gérés correctement, peuvent préserver la capacité de production du sol. On ne considère pas ici la conservation du sol dans son sens traditionnel, restrictif, de prévention de l'érosion hydrique et éoliennes, mais dans le sens plus large et beaucoup plus important du maintien de la fertilité du sol. L'ouvrage a été rédigé par un scientifique pour un public de scientifiques et de techniciens et il décrit clairement nos connaissances sur les relations entre arbres et sol, les hypothèses qui sont suffisamment fondées pour mériter de plus amples recherches et celles qui ne sont que spéculations ou idées fausses. Le principal atout de cet ouvrage est qu'il réunit une quantité considérable d'informations provenant de la recherche fondamentale, de la recherche appliquée et des observations obtenues dans les conditions agricoles et forestières réelles.

Il convient de féliciter Anthony Young et toutes les personnes qui ont participé à cette entreprise pour leur contribution majeure à la discipline de l'agroforesterie.

Björn Lundgren
 Janvier 1989

Préface

Le présent ouvrage donne les résultats d'une analyse de l'ICRAF sur le potentiel qu'offre l'agroforesterie pour la conservation du sol au sens large c'est-à-dire tant la lutte contre l'érosion que le maintien de la fertilité. Des résultats partiels et des résumés sont déjà parus dans 20 publications. La présente publication s'adresse principalement aux chercheurs et donne dans certains détails les preuves sur lesquelles reposent les conclusions tirées. De courts résumés des résultats seront préparés à l'intention d'autres catégories de lecteurs.

La réalisation de l'ouvrage s'est avérée être une tâche bien plus ardue que prévu en ce qu'elle supposait l'approche de vastes domaines de la pédologie pour évaluer leur rôle dans l'agroforesterie. Elle aurait été insurmontable si nous avions tenté d'aborder toutes les publications récentes à mesure qu'elles étaient publiées. Heureusement, la publication a coïncidé avec la parution du journal Agroforestry Abstracts, qui nous aidera à l'avenir à MOUS tenir à flot avec le nombre croissant de résultats publiés.

Si la recherche en agroforesterie atteint les objectifs qu'elle s'est fixée actuellement il se pourrait que d'ici cinq à dix ans une grande partie des déductions que l'on doit faire aujourd'hui sera remplacée par les résultats de recherches effectuées directement sur L'agroforesterie et la conservation du sol. En parallèle nous espérons que les conclusions dictées dans la présente étude au sujet des potentialités de l'agroforesterie pour la conservation du sol et la durabilité de l'utilisation des terres, seront peu à peu mises en application par la conception de systèmes agroforestiers sains et adéquats et par leur inclusion dans le processus de planification de l'utilisation des terres.

*Anthony Young
Nairobi août 1988*

Remerciements

La rédaction et la publication du livre original en anglais ont été financées par une bourse octroyée par l'Agence suédoise internationale de développement.

Plusieurs études antérieures méritent particulièrement d'être mentionnées car elles ont fourni les bases du présent ouvrage. Il s'agit de l'étude sur les aspects de la productivité du sol en agroforesterie par P. K. R. Nair (1984) de celle sur l'érosion dans les systèmes agroforestiers par K. F. Wiersum (1984) et du travail sur les effets de l'érosion sur la productivité du sol par M. Stocking et associés. P.A. Sanchez a été le premier à mentionner et à soutenir l'hypothèse générale sur les sols et l'agroforesterie. Les informations et les idées recueillies lors de réunions dans le cadre du programme sur la Biologie et la fertilité des sols tropicaux ont été très précieuses.

Mes collègues de l'ICRAF ont apporté une aide très appréciée. J'aimerais en particulier remercier trois d'entre eux: Peter Huxley, qui a été à l'origine d'un certain nombre d'idées que je n'ai pas hésité à exploiter; Peter Muraya pour l'intérêt soutenu qu'il a montré et l'analyse et la programmation efficace du modèle informatique SCUAF (décris au chapitre 15); et Richard Labelle qui a apporté une aide précieuse en identifiant les publications qui bien qu'elles ne soient pas en rapport direct avec l'agroforesterie sont néanmoins importantes dans ce domaine. P. M. Hotten et R. J. Cheatle ont participé à l'élaboration du modèle SCUAF.

Bon nombre de personnes ont aimablement apporté des remarques constructives sur la première version publiée sous la forme de Documents de travail de l'ICRAF notamment H. G. Fehlberg N. Hudson C. J. Paskett D. Sanders T. F. Shaxson B. R. Trenbath et des collègues de l'ICRAF. Toutes les photographies ont été fournies par l'auteur.

Première partie - Conservation du sol et agroforesterie

Chapitre 1: Introduction

Objectif

Le présent ouvrage passe en revue le potentiel de l'agroforesterie pour la conservation des sols, considérée dans son sens le plus large de façon à comprendre à la fois le contrôle de l'érosion et le maintien de la fertilité. L'objectif est de:

- résumer l'état actuel des connaissances sur l'agroforesterie pour la conservation des sols, tant en ce qui concerne ses capacités connues que son potentiel apparent;
- indiquer les besoins de la recherche pour que ce potentiel se réalise.

Ce compte rendu est destiné tout d'abord aux scientifiques engagés dans la recherche agroforestière, ou prêts à s'y engager, en particulier ceux des pays moins développés qui ont difficilement accès aux bibliothèques et aux travaux récents. Etant donné qu'une coopération interdisciplinaire est indispensable à la mise au point de L'agroforesterie, tant les spécialistes du sol que les spécialistes d'autres disciplines sont concernés.

Notre intention est de fournir un résumé qui puisse servir de point de départ à des travaux ultérieurs, concernant d'une part la recherche fondamentale dans ses relations entre les sols, les végétaux et l'environnement et, d'autre part, la recherche appliquée orientée vers la mise au point de systèmes agroforestiers pratiques pour des régions spécifiques.

Nous voudrions aussi nous adresser à tous ceux qui s'occupent de planification du développement agroforestier dans les organisations nationales et internationales et auprès des bailleurs de fonds. Ce compte rendu peut les aider à indiquer dans quelle mesure l'agroforesterie peut contribuer à résoudre les problèmes de dégradation des sols, quelles sont les pratiques agroforestières disponibles à cet effet, et comment et pourquoi elles sont efficaces. Le lecteur pressé trouvera à partir de la page 163 un résumé des résultats disponibles.

Analyses antérieures

Les paysans ont toujours fait pousser des arbres sur leurs terres, quelques-uns sans doute avec la conviction que cela pouvait avoir des effets bénéfiques sur les sols et sur les récoltes. Dans les publications scientifiques, l'influence bénéfique des ligneux sur le sol a été pour la première fois reconnue dans les rapports sur la stabilité écologique des cultures itinérantes pour autant qu'il existe une proportion adéquate entre jachères forestières et cultures (par exemple, Gourou, 1948; Nye et Greenland, 1960).

Il y eut aussi les affirmations isolées de ceux que, rétrospectivement, nous pouvons considérer comme en avance sur leur temps pour avoir correctement apprécié les possibilités d'intégrer les ligneux dans les systèmes d'exploitation. Ainsi Leakey, au sujet des hautes terres du Kenya, préconisait en 1949 des rangées d'arbres le long des courbes de niveau pour contrôler le problème (déjà sérieux!) de l'érosion du sol; en 1950 Dijkman écrivait au sujet du *Leucaena* qu'"il était une plante prometteuse pour le contrôle de l'érosion". Pendant bien des années, on a pratiqué la foresterie de restauration, notamment en Inde, dans le but d'améliorer les terres dégradées.

Pour une reconnaissance scientifique plus large, il a fallu attendre l'essor de l'agroforesterie en tant que discipline scientifique à partir de la fin des années 70. Une étape a été marquée avec le premier symposium organisé par le Centre international pour la recherche en agroforesterie *Soils research in agroforestry/Recherche sur les sols en agroforesterie*, Mongi et Huxley, 1979) qui a tiré les leçons d'autres types d'utilisation des sols et a fait le point sur leur signification pour l'agroforesterie. Une deuxième étape marquante a été le rapport *Soil productivity aspects of agroforestry/Aspects de la productivité des sols en agroforesterie* (Nair, 1984, 1987a) dans lequel étaient évalués les principaux systèmes agroforestiers, traditionnels et modernes, avec des références spéciales aux aspects pédologiques; il constitue une base pour le présent ouvrage.

Parmi d'autres recueils sur la conservation des sols en agroforesterie, nous citerons:

- *Surface erosion under various tropical agroforestry systems (Erosion de surface sous divers systèmes agroforestiers tropicaux)* (Wiersum, 1984), qui passe en revue les taux d'érosion hydrique;
- *Tree crops as soil improvers in the humid tropics (Cultures ligneuses pour améliorer les sols SOUS les tropiques humides)* (Sanchez *et al.*, 1985), qui porte à la fois sur les cultures des plantations forestières et celles des plantations agricoles;
- *Agroforestry for soil conservation (Agroforesterie pour la conservation des sols)* (Lundgren et Nair, 1985) qui établit l'interdépendance du contrôle de l'érosion et du maintien de la fertilité, et la capacité des systèmes agroforestiers de combiner ces effets bénéfiques avec la production;
- *Increasing the productivity of smallholder farming systems by introduction of planted fallows (Accroître la productivité des systèmes agricoles de petite taille par l'introduction de jachères plantées)* (Prinz, 1986), une comparaison qui porte à réflexion sur les jachères ligneuses et les systèmes agroforestiers à base spatiale;
- *Amelioration of soil by trees (Amélioration des sols par les arbres)* (Prinsley et Swift, 1986), un symposium;
- *Ecological aspects of agroforestry with special emphasis on tree-soil interactions (Aspects écologiques de l'agroforesterie spécialement du point de vue des interactions arbres/sols)* (Wiersum, 1986), un ensemble de notes de conférence;
- *Soil productivity and sustainability in agroforestry systems (Productivité des sols et durabilité dans les systèmes agroforestiers)* (Sanchez, 1987)

Nous avons puisé librement dans ces travaux pour rédiger le présent ouvrage, qui a été publié en avant-projet sous forme de trois documents de travail de l'ICRAF, respectivement sur le contrôle de l'érosion, sur le maintien de la fertilité et sur un modèle informatisé pour prédire ces deux phénomènes (Young, 1986a, 1987a; Young *et al.* 1987).

Les bases environnementales

Les relations de l'agroforesterie avec la conservation des sols sont influencées par le climat, le type de sol et la topographie. Par souci d'uniformisation, j'ai utilisé des termes extraits de la classification générale de la base de données environnementales de l'ICRAF (Young, 1985a, 1989b). On trouvera un examen comparatif des systèmes de classification environnementale dans Young (1987e).

Zones climatiques

Le point de départ en matière de zones climatiques (tableau 1) est constitué par les "trois mondes des tropiques": les tropiques humides (forêts denses humides), les tropiques subhumides (savanes) et la zone semi-aride (quelquefois appelée Sahel). Ces zones sont définies en termes de classes climatiques de Köppen. Parce que la zone subhumide couvre une vaste gamme de pluviosités, elle a été subdivisée en zones à tendance humide et zone sèche, la sécheresse n'étant un problème grave que dans cette dernière. Les climats bimodaux se caractérisent par deux saisons sèches et pluvieuses distinctes.

Sur le plan de la végétation, la frontière entre les tropiques humides et subhumides correspond au passage de la forêt fermée à la forêt caduque ouverte ou à la savane. Celle entre les zones subhumide et semi-aride correspond au passage de la végétation de savane caduque à feuilles larges aux arbres et aux buissons à feuilles étroites, ordinairement épineux.

Notons que ce que nous appelons la zone subhumide sèche est parfois considéré par d'autres comme une partie des tropiques semi-arides.

Types de sols

Les principaux types de sols (tableau 2) sont basés sur la légende révisée de la *Carte mondiale des sols* préparée par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), couramment appelée la classification FAO (FAO/UNESCO, Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture, 1974; FAO, 1988). Les ferralsols et les acrisols sont des sols acides fortement lessivés typiques des tropiques humides, les derniers ayant une accumulation d'argile dans l'horizon B. Les lixisol sont typiques des sites drainés librement dans les tropiques subhumides (autrefois appelés luvisols ferriques, voir note au tableau 2). Les nitisol, généralement plus fertiles, se trouvent sur des roches basiques à la fois dans les zones humides et subhumides.

Tableau 1- Zones climatiques

Zones climatiques et végétation	Classes de Köppen concernées	Pluviométrie approximative(en mm)	Mois secs approximatifs (< 60 mm)
Tropiques humides (zone de la forêt équatoriale)	Af, Am	>1500	4

Tropiques subhumides (zone de la savane) mouilleux sec	Aw, Cw	600-1500 1000-1500 600-1500	4-8
Zone semi-aride	BS	250-600	8-10
Zone aride	BW	< 250	11-12
Zone méditerranéenne	Cs	> 150	pluies d'hiver

Tableau 2 - Types de sols

Classification FAO(FAO, 1982)	Equivalent approximatif dans la taxinomie américaine des sols (USDA, 1975)	Description
Ferralsols	oxisols	Sols rouges et jaunes fortement altérés, sans horizon argique
Acrisols	surtout ultisols	Sols rouges et jaunes fortement lessivés, avec un horizon argique, présents surtout sous les tropiques humides
Lixisols, surtout ferriques	alfisols, surtout ustalfs	Sols rouges et jaunes, peu lessivés, avec un horizon argique, présents surtout sous les tropiques subhumides
Nitisols	(pas d'équivalent)	Sols rouges fortement structurés, développés à partir de roches-mères basiques
Calcisols	grands groupes en calci-	Sols contenant des accumulations de carbonate de calcium libre
Vertisols	vertisols	Argiles noires craquelées

Note: dans la légende précédente (FAO/UNESCO, 1974), les lixisols étaient appelés luvisols, les nitisols étaient des nitosols, et les calcisols étaient des unités calciques dans d'autres classes primaires, particulièrement les xérosols; L'horizon argique était appelé horizon argillique (son nom actuel vient de la taxinomie américaine)

Tableau 3 - Classes de pente et de formes de terrain (FAO/UNESCO 1974; Young, 1985a)

Classe	Explication	Degrés	Pourcentages
Pente raide	les pentes dominent	> 17°	> 30%
Pente modérée	les pentes dominent	5 à 17°	8 à 30%
Pente douce	les pentes dominent	< 5°	< 8%
Plat	les terres alluviales planes dominent, par exemple, les plaines inondables		

Un groupe de sols tout à fait à part n'est pas encore reconnu à part entière par les systèmes de classification internationaux. Ce sont les sols sableux fortement altérés dérivés des roches felsiques (granitiques) sur des plateaux en pente douce dans la zone subhumide, connus tantôt sous le nom de sols pâles lessivés, de sols ferrallitiques altérés, de sols de *sandveld* (Afrique) ou de "cerrado" (Amérique du Sud). Nous utiliserons ici le terme sols des plateaux de *sandveld*.

Les calcisols sont caractérisés par un horizon d'accumulation de carbonate de calcium libre; ils sont typiques de la

zone semi-aride. Les vertisols sont les plus courants sur les sites mal drainés de la zone semi-aride, mais on en trouve également sur des sites plats à drainage faible en climat subhumide et, occasionnellement, humide.

Topographie

En matière d'érosion du sol, on se réfère d'habitude aux *classes de pente ou de topographie* (tableau 3), où les adjectifs raide, modéré et doux qualifient tantôt des pentes individuelles, tantôt des paysages où ces pentes sont dominantes. On a pris coutume aussi d'appeler *terres en pente ou terres pentues* des zones compartimentées ou accidentées dominées par des pentes modérées ou fortes où l'érosion est un problème sérieux.

Arrangement du texte

C'est une constante fondamentale du présent ouvrage d'affirmer que la lutte contre l'érosion n'est qu'un aspect de la conservation du sol. Dans la planification pratique du développement, il ne peut être traité isolément, mais doit être combiné avec le maintien de la fertilité du sol et avec les autres aspects de l'amélioration culturelle.

Cependant, la lutte contre l'érosion est une condition préalable aux autres formes de conservation, bien qu'elle soit liée du point de vue scientifique à une tout autre série de problèmes et de solutions possibles. C'est pourquoi le potentiel de l'agroforesterie comme moyen de lutte contre l'érosion est traité séparément dans la deuxième partie. Lorsque l'érosion n'est pas grave ou lorsqu'elle est maîtrisée, la conservation des sols consiste à prévenir la dégradation physique, chimique et biologique du sol. Le rôle et le potentiel de l'agroforesterie pour ce faire sont examinés dans la troisième partie. Dans la quatrième partie, le contrôle de l'érosion et le maintien de la fertilité sont intégrés dans un modèle prédictif informatisé. Dans

cette partie, le lecteur trouvera également une discussion des besoins de recherche et une conclusion sur le potentiel de l'agroforesterie pour la conservation des sols.

Chapitre 2: Conservation du sol et durabilité

Conservation du sol

Nous parlons ici de la conservation du sol au sens le plus large, qui comprend à la fois le contrôle de l'érosion et le maintien de la fertilité.

Deux tendances politiques ont contribué à former ce point de vue. D'abord, on a assimilé la conservation du sol et la lutte contre l'érosion. Cette confusion persiste dans certains esprits; elle conduit à des mesures et à des projets de planification où l'érosion est pensée en termes de pertes de matériel pédologique, et son contrôle traité indépendamment des autres aspects de l'amélioration agricole. On reconnaît maintenant que le principal effet négatif de l'érosion est l'abaissement de la fertilité, par la perte de matière organique et d'éléments nutritifs dans les sédiments emportés par érosion.

La seconde tendance reconnaît des formes de dégradation des sols autres que l'érosion, portant sur des dégradations physiques, chimiques et biologiques, parfois regroupées sous le nom de baisse de fertilité des sols. On admet maintenant que de graves problèmes de dégradation des sols peuvent se poser même dans des zones où l'érosion n'est pas un problème, et que c'est un des rôles de la conservation des sols que de s'y attaquer.

Conservation du sol
Conservation du sol = maintien de la fertilité, qui requiert
<ul style="list-style-type: none">• contrôle de l'érosion• maintien de la matière organique• maintien des propriétés physiques du sol• maintien des éléments nutritifs• éviter les toxicités

Ceci nous amène à l'idée que le premier des objectifs de la conservation des sols est le maintien de la fertilité. Pour y parvenir, le contrôle de l'érosion est une condition nécessaire, mais en aucun cas suffisante. Il est tout aussi important de maintenir les propriétés physiques, chimiques et biologiques, y compris le statut nutritif, qui contribuent toutes ensemble à la fertilité des sols.

Un domaine plus large est celui de la conservation des sols et de l'eau, car la réduction des pertes hydriques par ruissellement fait partie intégrante de la conservation des sols. A son tour, la conservation des sols et de l'eau constitue une partie de l'objectif plus vaste de conservation des ressources naturelles, qui couvre aussi la conservation d'autres ressources, telles que la végétation (forêts, pâtures) et la faune sauvage.

Désertification est un terme souvent mal utilisé. Au sens propre, il se rapporte à la réduction irréversible, ou lentement réversible, de la capacité productive de l'environnement dans la zone semi-aride. La désertification se traduit principalement par un appauvrissement de la végétation (à la fois de sa biomasse totale et de sa composition), ce qui a un impact direct sur la productivité. Toutefois, l'appauvrissement de la biomasse est souvent la conséquence d'une sécheresse et pourra être corrigé par des procédés naturels pour autant qu'il n'existe pas d'autres sources de dégradation. C'est lorsque l'érosion des sols devient

grave elle aussi que la capacité de récupération de la couverture végétale diminue, et que l'on peut parler à juste titre de désertification (Young, 1984b; Baumer, 1987; Dregne, 1987).

Utilisation durable des sols

La durabilité, en ce qui concerne l'utilisation des sols, est un concept plus général que la conservation des terres et de l'eau ou que la conservation des ressources naturelles dans leur ensemble, et différentes définitions lui ont été données. Son caractère essentiel est le lien entre la conservation et la production. L'utilisation durable des sols est celle qui assure la production tout en conservant les ressources dont celle-ci dépend, permettant ainsi le maintien de la productivité. On peut l'exprimer par la pseudo-équation:

$$\text{DURABILITE} = \text{PRODUCTIVITE} + \text{CONSERVATION DES RESSOURCES}$$

Pour qu'un système d'utilisation des terres soit durable, il doit préserver non seulement le sol, mais aussi toute la panoplie de ressources naturelles dont dépend la production. Par exemple, la récolte de produits en forêt ne doit pas dépasser le taux de recrut; d'autres considérations sont même plus larges, comme celle de la tenue des terres. Cependant, l'exigence la plus directe et primordiale pour la durabilité est le maintien de la fertilité du sol.

Si c'est bien évidemment valable pour la culture des terres arables, ce ne l'est pas moins pour les systèmes pastoraux d'utilisation des terres. Une sécheresse ou de courtes périodes de surpâturage peuvent conduire à une dégradation temporaire des ressources pastorales, mais celles-ci peuvent se reconstituer. La dégradation devient irréversible, et on peut alors parler à juste titre de désertification, si le surpâturage se poursuit au point que la dégradation du sol devient permanente.

L'utilisation durable des sols a pour objectif la poursuite de la production sur une longue période, à savoir celle couverte par les prévisions des planificateurs et des agriculteurs (ordinairement une vingtaine d'années, parfois jusqu'à cinquante ans). Etant donné le déficit alimentaire actuel des pays moins développés et l'accroissement virtuellement inévitable de la population, les besoins portent aujourd'hui sur des formes d'utilisation des terres qui permettront non seulement de maintenir les niveaux actuels de production, mais encore d'accroître ces niveaux de manière durable.

Chapitre 3: Agroforesterie

Définitions

L'agroforesterie désigne des systèmes d'utilisation des terres où l'on fait pousser des arbres ou des arbustes en association avec des cultures, des pâturages ou du bétail, et dans lesquels existent des interactions à la fois écologiques et économiques entre les ligneux et les autres composantes. Sa nature essentielle est de combiner des ligneux avec des plantes ou des animaux et de réaliser des interactions entre les composantes ligneuses et non ligneuses du système. Les interactions écologiques en sont le trait le plus caractéristique et différencient l'agroforesterie de la foresterie sociale (foresterie pratiquée par des communautés ou des particuliers), bien qu'il puisse y avoir de vastes chevauchements.

Il convient d'approfondir certains points pour faire de la description ci-dessus une définition formelle. Toutes les plantes ligneuses pérennes, y compris les palmiers et les bambous, sont incluses dans le concept de ligneux; l'association entre composantes ligneuses et non ligneuses peut être un arrangement spatial, une séquence dans le temps ou une combinaison des deux le " ou " doit être entendu comme " et/ou ".

Agroforesterie

L'agroforesterie est un nom collectif pour désigner des systèmes d'utilisation des terres dans lesquels on fait pousser des ligneux pérennes (arbres, arbustes, etc.) en association avec des plantes herbacées (cultures, pâturages) et/ou du bétail, dans un arrangement spatial ou temporel ou les deux, et dans lesquels il y a à la fois des interactions écologiques et économiques entre les composantes ligneuses et les composantes non ligneuses du système.

Les principales *composantes* des systèmes agroforestiers sont les ligneux, les plantes cultivées, les pâturages et le bétail, ainsi que les facteurs environnementaux que sont le climat, les sols et la topographie. D'autres composantes (telles que les abeilles et les poissons) interviennent dans des systèmes spécialisés.

Une *pratique agroforestière* est un arrangement caractéristique de composantes dans l'espace et dans le temps. Un *système agroforestier* est un exemple local spécifique d'une pratique, caractérisé par l'environnement, les espèces et l'arrangement des végétaux, le mode de gestion, et le fonctionnement économique et social. Il existe des centaines, voire des milliers de systèmes agroforestiers, mais seulement une vingtaine de pratiques distinctes.

La panoplie des pratiques agroforestières

Bien que l'existence de l'agroforesterie soit maintenant largement reconnue par les planificateurs et par les agences de développement, on ne réalise pas toujours combien de pratiques différentes d'utilisation des sols elle recouvre.

Le tableau 4 établit un classement des pratiques agroforestières. Nous le donnons d'abord pour illustrer la variété des pratiques, ensuite pour servir de base de discussion pour la suite du texte.

Au plus haut niveau, la classification se fonde sur les composantes en présence: arbres avec cultures, arbres avec pâturages, pratiques où la composante arborée est dominante, et pratiques comportant des composantes spéciales. Le deuxième niveau de classification repose sur l'arrangement spatial et temporel des composantes. Les *pratiques en rotation* sont celles où l'association entre ligneux et plantes cultivées est fondée principalement sur une notion temporelle, tandis que les *pratiques spatiales* sont celles où l'association est d'abord une combinaison dans l'espace. Les systèmes spatiaux sont divisés en systèmes mixtes et systèmes zonaux. Dans les *pratiques spatiales mixtes* ligneux et plantes herbacées sont cultivés en mélanges intimes, les ligneux étant répartis sur plus ou moins toute la surface. Dans les *pratiques zonales*, les ligneux sont soit plantés selon un arrangement systématique, par exemple en rangées, soit pour remplir une fonction spécifique dans l'exploitation agricole, par exemple pour la délimiter ou pour renforcer des structures servant à la conservation des sols. Le troisième niveau de classification utilise comme critères des arrangements spatiaux et des fonctions détaillés.

Considérées du point de vue de la recherche, les pratiques sylvopastorales et celles à composantes spéciales se distinguent clairement, car elles demandent des équipements pour la recherche sur les pâturages et sur le bétail ou sur d'autres aspects particuliers. Les autres groupes diffèrent par la nature et l'étendue des interactions ligneux/cultures ou ligneux/pâturages. Dans les systèmes de rotation pure, c'est surtout par la transmission héréditaire des modifications pédologiques que se font les interactions. Dans les systèmes spatiaux mixtes, l'interface ligneux/cultures se répartit sur la totalité ou la presque totalité de l'unité d'exploitation, alors que dans les systèmes zonaux, elle n'occupe que des emplacements définis.

Tableau 4 - Pratiques agroforestières

SURTOUT AGROSYLVIQUES (ligneux avec des cultures)	
<i>En rotation</i>	
cultures itinérantes	
jachère forestière améliorée	
taungya	
<i>Spatiales mixtes</i>	
ligneux sur des terres cultivées	
combinaisons de plantations et de cultures	
jardins ligneux multiétages	
<i>Zonales</i>	
cultures intercalaires, haies, cultures en allées	
(également agrosylvopastorales)	

<p>plantations de lisières ligneux sur des structures anti-érosives brise-vent et rideaux abris (également sylvopastorales) transfert de biomasse</p> <p>SURTOUT OU POUR PARTIE SYLVOPASTORALES <i>(ligneux avec des pâturages et des animaux)</i></p> <p><i>Spatiales mixtes</i></p> <p>ligneux sur pâtures ou sur terres à pâture ligneux de plantation avec des pâturages</p> <p><i>Zonales</i></p> <p>haies vives parcelles fourragères</p> <p>COMPOSANTES LIGNEUSES PREDOMINANTES (<i>voir aussi taungya</i>)</p> <p>parcelles boisées à usages multiples foresterie de réhabilitation conduisant à des usages multiples</p> <p>AUTRES COMPOSANTS PRESENTS</p> <p>entomoforesterie (ligneux avec des insectes) aquiforestene (ligneux avec aquaculture)</p>	
---	--

Deuxième partie - Agroforesterie et lutte contre l'érosion du sol

Chapitre 4: Tendances de la recherche et des politiques de conservation des sols

Les observations expérimentales directes sur l'érosion dans des systèmes agroforestiers ont livré peu de certitudes. Cependant, comme dans la plupart des secteurs de la recherche agroforestière, il y a beaucoup à apprendre des résultats de la recherche basée sur l'exploitation agricole et forestière des terres en les appliquant à l'agroforesterie.

Notre propos sera donc divisé en deux sections Le présent chapitre passe en revue les tendances récentes et les connaissances actuelles dans le domaine de la recherche sur l'érosion et des politiques globales de conservation dans leur ensemble, en soulignant les points importants pour l'agroforesterie. Le chapitre 5 récapitule les quelques preuves expérimentales disponibles, et le chapitre 6 examine les pratiques agroforestières en rapport avec la conservation des sols, en utilisant à la fois les preuves directes et les hypothèses sur les effets probables que l'on peut déduire de l'analyse qui précède.

Prise de conscience de la nécessité de préserver les sols

C'est aux Etats-Unis, dans les années 30, que l'on a pris conscience de la nécessité de préserver les sols. De nombreux cas irréversibles d'érosion du sol se sont produits bien avant cette époque. peut-être dès l'ère préclassique dans les pays méditerranéens. Une érosion sévère des sols apparaissait tant dans les communautés indigènes où l'augmentation de la population amenait une intensification de la mise en culture que dans les régions tropicales où s'installaient des immigrants occidentaux. Des exemples sont réunis dans une chronique qui constitue une pierre miliaire de la prise de conscience de l'érosion, *The rape of the earth (Le viol de la terre)* (Jacks et White, 1939).

Pour les régions tropicales, on possède des descriptions de l'érosion et de ses conséquences datées des années 30 et 40, par exemple au Nigeria (Ainslie, 1935) et à La Trinité (Hardy, 1942), ainsi que le rapport *Soil erosion in the British colonial empire (Erosion du sol dans l'Empire colonial britannique)* (Stockdale, 1937). Dans son monumental *African survey (1938)*, Hailey a consacré au moins soixante pages à l'érosion, notant que "c'est actuellement l'un des plus graves problèmes de L'Afrique". En conséquence, la conservation des sols est devenue partie intégrante de la politique agricole des puissances coloniales, et ce, jusqu'à dans les années 50. Le Zimbabwe (alors Rhodésie du Sud) est un exemple notable de pays où des pratiques de conservation importées et adaptées des Etats-Unis ont été largement utilisées.

Bien que les spécialistes de la conservation du sol n'aient jamais modifié leurs recommandations, l'intérêt gouvernemental et l'importance accordée à la conservation des sols dans la politique ont diminué dans les années 60. Cela coïncide avec la période consécutive à l'indépendance dans les anciens territoires coloniaux où, pendant un certain temps, la conservation a été associée aux politiques "colonialistes" et n'a donc pas pu se voir attribuer une place éminente dans les programmes de développement. Dans le même temps, la croissance démographique conduisait à l'extension fréquente de l'agriculture sur des pentes fortes et autres terres vulnérables.



Photo 1 - *Le problème des terres en pente: pentes fortes déboisées pour la mise en culture. Guadalcanal Iles Salomon.*



Photo 2 - *L'érosion du sol telle qu'on la conçoit d'ordinaire: des ravinements, dans des terres à pâturage de fond de vallée. Dedza, Malawi.*



Photo 3 - *La forme d'érosion la plus répandue: érosion en nappe après que les pentes fortes ont été cultivées. Butaré, Rwanda.*

A partir du milieu des années 70, on assiste à une nouvelle prise de conscience de l'importance de la conservation du sol et un regain d'intérêt du côté des politiques de développement. Si un seul facteur peut être tenu pour responsable, c'est

l'augmentation continue de la pression sur les terres et la disparition dans la plupart des pays de surfaces importantes de nouvelles terres à occuper, qui engendre une prise de conscience de plus en plus marquée de la dépendance de la production envers les ressources en terres.

La formulation de la Charte mondiale des sols par la FAO (1982), qui va de pair avec l'importance croissante donnée au contrôle de l'érosion dans la politique de cette organisation, a marqué une étape importante. Plus récemment, la Banque mondiale a accordé un surcroît d'attention aux aspects environnementaux du développement. L'adoption de politiques de conservation par les gouvernements a naturellement été variable, mais, dans l'ensemble, elle s'est accrue au cours des dix dernières années et continue à s'accroître. Quant à l'avenir, une analyse récente des facteurs affectant les ressources en terres et leur utilisation dans les 50 prochaines années met fortement l'accent sur la nécessité de contrôler la dégradation des sols (Young *et al.*, 1987).

Dans le domaine scientifique, L'accroissement d'intérêt s'est traduit par un flot de symposia et d'analyses sur l'érosion en général et dans les régions tropicales en particulier. Ils comprennent:

- Greenland et Lal, 1977(28 articles); concerne la conservation dans les régions tropicales; un jalon scientifique qui met l'accent sur l'importance de la couverture des terres;
- FAO, 1977 (16 articles). Articles allant de la mesure de l'érosion et des pratiques de conservation à la gestion des bassins versants, au besoin de recherche et à la vulgarisation de la conservation;
- de Boodt et Gabriels, 1978 (85 articles); traite de la recherche sur l'érosion en général, en insistant sur la mesure des taux;
- Kirkby et Morgan, 1980. Pas un symposium, mais un livre collectif, centré sur les mécanismes des processus;
- Morgan, 1981 (42 articles). Peut-être le meilleur rapport de symposium à ce jour, pour sa variété exhaustive des sujets, allant des aspects techniques à la politique;
- Kussow *et al.*, 1982 (8 articles); concerne l'érosion et la conservation dans les régions tropicales;
- Hamilton et King, 1983. A l'origine un symposium, synthétisé sous la forme d'un livre. Traite des réponses hydrologiques et pédologiques à la conversion des bassins versants de la forêt naturelle en d'autres formes d'utilisation du sol: plantations forestières, pâturages, cultures ligneuses, cultures annuelles, agroforesterie;
- Lal, 1984; un bilan de la lutte contre l'érosion dans les régions tropicales;
- O'Loughlin et Pearce, 1984 (49 articles). Effets de l'exploitation de terres forestières sur l'érosion et la stabilité des pentes (glissements de terrain);
- El-Swaify *et al.*, 1985 (85 articles). Traite de la mesure de l'érosion, des effets de la production, des méthodes de prévision, de la mise en oeuvre de programmes de conservation et de la politique de conservation;
- Craswell *et al.*, 1985 (18 articles). Symposium régional assorti d'exemples tirés en particulier des Philippines et d'Asie;
- Follett et Stewart, 1985. Symposium sur l'érosion des sols et la productivité des cultures;
- Lal, 1988a (10 articles). Méthodes de recherche sur l'érosion, y compris mesures sur le terrain et simulation;
- Moldenhauer et Hudson, 1988 (32 articles). Symposium particulièrement intéressant par son argumentation sur la politique de conservation;
- Rapports de la IV^e conférence internationale sur la conservation du sol, Maracay, Venezuela, 1985 et de la V^e conférence, Bangkok, 1988, Sanarn Rimwanich, 1988 (133 articles).

Des rapports ont en outre été publiés sur un certain nombre de conférences nationales sur la conservation des sols, dont trois au Kenya.



Photo 4 - Les arbres seuls n'empêchent pas l'érosion: une plantation d'eucalyptus au Rwanda.

Tendances de la recherche et des politiques de conservation des sols

L'approche traditionnelle

La première approche, traditionnelle, est celle adoptée par les départements de conservation des sols et d'économie rurale et est exposée dans les textes et les manuels classiques. La plupart des manuels s'appliquaient aux conditions existant aux Etats-Unis, mais celui de Hudson (1981), qui a résisté à l'épreuve du temps, est un résumé limpide centré sur les régions tropicales. Ces manuels visent la conception de mesures de conservation des sols sur le terrain. Citons comme exemples ceux de la FAO (1965), du CTFT (Centre technique forestier tropical) (1979), Leblond et Guerlin (1983), Weber et Hoskins (1983a) et Hudson (1987), ainsi que de nombreux manuels nationaux, notamment sur le Kenya (Wenner, 1981) et sur l'Inde (Singh *et al.*, 1981b).

Ce qui suit est un résumé des caractéristiques de l'approche traditionnelle. Bien que sélectif, de manière à faire ressortir le contraste avec les tendances récentes présentées plus loin, ce texte ne se veut pas une parodie! Voici les caractéristiques en question:

- la plus grande attention était donnée à l'érosion des terres cultivées, beaucoup moins à celle des terres de pâturage;
- l'attention était centrée sur les taux de pertes de sol, en t/ha ou t/acres; en conséquence:
 - les recherches concernaient surtout la mesure des taux de pertes de sol;
 - les mesures de conservation visaient à réduire le taux de pertes de sol. Aux Etats-Unis, le but visé était de concevoir des mesures de conservation supposées ramener ce taux en dessous d'un niveau spécifié, appelé "érosion tolérable"; peu de pays ont suivi cette pratique consistant à chiffrer un tel seuil;
 - les essais tendant à évaluer les conséquences de l'érosion sur la productivité, donc l'analyse économique, étaient axés sur les effets de la réduction de la profondeur du sol;
- les exigences des cultures agricoles en ce qui concerne la couverture du sol étaient considérées comme fixes et immuables; les travaux de conservation étaient donc conçus pour réduire le ruissellement ou pour rompre la force de l'écoulement sur les pentes. C'est ce que l'on désignera comme l'approche "de la barrière" de la conservation;

- la classification des terres selon leurs aptitudes était largement utilisée comme base de planification de l'utilisation des terres. La méthode créée aux Etats-Unis (Klingebiel et Montgomery, 1961) a été adaptée à beaucoup de pays tropicaux, par exemple en Afrique, d'abord au Zimbabwe (Conex, 1960), ensuite au Malawi (Shaxson *et al.*, 1977) et en Zambie (Zambie, Département de l'agriculture, 1977). Selon cette méthode, seules les terres de pente inférieure à un certain angle (selon la pluviosité et le type de sol) sont classées comme propres à une utilisation agricole, essentiellement sur la base des risques d'érosion. Toutes les terres de pente supérieure sont à utiliser pour le pâturage, la foresterie, le loisir ou la conservation;
- la vulgarisation était basée sur l'idée que la conservation du sol devait avoir la priorité et être une condition préalable à d'autres améliorations agricoles. Il en a résulté que les projets ou les campagnes de conservation étaient parfois menés isolément, sans être liés à aucune augmentation de productivité;
- le travail de vulgarisation de la conservation des sols était souvent effectué sur la base d'une politique prohibitive, soit en refusant d'autoriser la culture de terres supposées présenter un haut risque d'érosion, soit en rendant légalement obligatoire la construction d'ouvrages de conservation.

Quelques succès ont été obtenus par l'application de cette méthode, notamment au Zimbabwe. Fréquemment cependant, des difficultés se sont posées lors de son application à la situation typique des pays moins développés, caractérisée par de petites exploitations, une forte pression sur les terres et de faibles ressources tant pour les paysans que pour le gouvernement. Notons, entre autres, les problèmes suivants:

- la réduction de l'érosion aux niveaux supposés désirables s'est souvent révélée impraticable;
- les coûts et la main-d'œuvre que supposaient les travaux d'aménagement tels que diguettes et terrasses destinés à contrôler le ruissellement étaient fréquemment jugés excessifs. Lorsque de tels ouvrages étaient construits par des moyens mécaniques (avec une aide extérieure), ils n'étaient pas toujours entretenus (par exemple Mwakalagho, 1986; Heusch, 1986; Reij *et al.*, 1986);
- les résultats de la classification des terres selon leurs aptitudes ne pouvaient pas être appliqués. A cause de la pression sur les terres, les pentes moyennes et fortes étaient déjà mises en culture, et il était économiquement, socialement et politiquement inconcevable d'exiger leur abandon. Il fallait trouver un moyen de rendre cette mise en culture acceptable pour l'environnement;
- la vulgarisation de la conservation des sols n'était pas assurée. D'une part, il était impossible d'imposer une politique de prohibition; d'autre part, on ne pouvait pas obtenir la coopération des agriculteurs sans leur laisser entrevoir les bénéfices éventuels de la conservation des sols en termes d'augmentation du rendement des cultures; or, lorsque la conservation est pratiquée isolément, sans autre amélioration agricole, elle n'apporte aucun avantage de cette sorte;
- avec les méthodes conventionnelles d'analyse économique, en particulier l'escompte des bénéfices couplé avec une approche basée sur la réduction de la profondeur du sol, il était souvent difficile de justifier la conservation en termes économiques.

Tendances récentes

Des changements dans la politique précédente se sont fait jour grâce à des progrès tant dans les sciences naturelles que dans les sciences sociales. Ces tendances récentes sont les suivantes:

- l'érosion est considérée comme l'une des nombreuses formes de dégradation du sol, qui comprennent la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques et qui toutes exigent une attention particulière (FAO, 1978, 1979);
- vu la nécessité de justifier la conservation des sols en termes économiques, les efforts de recherche ont été axés sur l'évaluation des effets de l'érosion, sur les propriétés du sol et sur le rendement des cultures. Plus précisément:
 - on a reconnu que les conséquences de l'érosion ne se limitent en aucune façon à une réduction de la profondeur du sol; les effets les plus néfastes sont la perte de matière organique et d'éléments nutritifs des végétaux, entraînant une dégradation des propriétés physiques du sol et un déclin du rendement des cultures (cf. articles dans Greenland et Lal, 1977; Lal et Greenland, 1979, Rijbersman et Wolman, 1985);
 - des expériences ont été réalisées sur les effets de l'érosion sur les rendements culturaux. Au début, elles ont principalement consisté en arasements artificiels de la couche superficielle du sol. Par la suite, on a trouvé que cette méthode sous-estimait les réductions de rendement causées par l'érosion (Lal, 1983, 1984; Stocking, 1984; Stocking et Peake, 1986; Peake, 1986);
- une plus grande importance est donnée aux effets de la couverture du sol comme moyen de lutte contre l'érosion, par comparaison avec le contrôle du ruissellement. Cela s'est révélé en partie lors d'expériences portant initialement sur les effets du paillage, et par la suite lors de travaux sur le labour minimum (articles dans Greenland et Lal, 1977);
- il est maintenant admis que la mise en culture se poursuivra dans beaucoup de régions en pente, et qu'il faudra trouver les moyens de rendre cette pratique acceptable pour l'environnement. Les terres en pente, régions où prédominent les terres en pente modérée ou forte, sont maintenant reconnues comme un type identifiable d'environnement avec un ensemble de problèmes distinctifs (Luckok *et al.*, 1976; Novoa et Posner, 1981; Siderius, 1986);
- en matière de vulgarisation, il est admis qu'une politique prohibitive ne convient pas et que la conservation des sols doit être obtenue avec la coopération volontaire des agriculteurs. Pour l'obtenir, il est nécessaire que ceux-ci soient motivés par les avantages à attendre des travaux de conservation. Il s'ensuit que la conservation des sols devrait être introduite comme un élément d'un ensemble de mesures d'amélioration de l'exploitation agricole susceptibles d'induire une augmentation immédiate de la production agricole ou d'autres avantages (par exemple Queblatin, 1985; Shaxson *et al.*, 1989);
- dans des environnements plus arides, l'intégration entre conservation de sol et conservation de l'eau est plus forte. Les ouvrages de conservation sont conçus dans ce double but. Les agriculteurs peuvent être amenés à adopter des mesures de conservation s'ils peuvent constater qu'elles agissent en même temps sur la conservation de l'eau et sur les rendements des récoltes (par exemple El-Swaify *et al.*, 1984);

- on commence à reconnaître la nécessité supplémentaire de contrôler l'érosion sur les terres de pâture, bien que les efforts faits dans ce sens soient encore loin de combler les besoins, vu l'importance relative de ces terres (cf. par exemple articles dans FAO, 1977; Dunne *et al.*, 1978).

Voir les rapports sur les stratégies de conservation du sol par Reij *et al.*, 1986; Shaxson *et al.*, 1989; Hudson, 1983, 1988a, et 1988b.

Caractéristiques de la recherche et de la politique de contrôle de l'érosion

- Les principaux effets néfastes de l'érosion sont les pertes en matière organique et en éléments nutritifs des plantes, entraînant une diminution importante des récoltes.
- Les coûts ou les exigences en main-d'œuvre pour le contrôle de l'érosion par des structures en terre sont souvent jugés excessifs.
- Il faut trouver une méthode pour rendre la mise en culture des terres en pente acceptable du point de vue de l'environnement.
- La vulgarisation de la conservation des sols par des méthodes prohibitives ne marche pas.
- La nécessité de s'assurer la coopération des agriculteurs pour réussir la conservation des sols s'accorde bien avec la méthode de diagnostic et de conception de l'agroforesterie.

Implications pour l'agroforesterie

Sur la base des tendances décrites ci-dessus, les implications de l'agroforesterie pour la conservation du sol sont les suivantes:

- les effets de l'agroforesterie sur le maintien de la fertilité du sol devraient être considérés conjointement avec les effets directs sur le contrôle de l'érosion;
- L'agroforesterie offre des possibilités de lutte contre l'érosion par la couverture du sol fournie par le couvert des arbres et la litière, en plus du rôle des ligneux comme barrière contre le ruissellement. Ce point est discuté ci-dessous;
- combiner la conservation du sol avec l'amélioration générale du système agricole, et s'assurer la coopération des agriculteurs à un stade précoce, s'accorde bien avec la méthode agroforestière de D & D (diagnosis and design) (Raintree, 1987);
- dans les régions plus sèches, il convient d'étudier la lutte contre l'érosion conjointement avec le rôle des ligneux dans la gestion de l'eau;
- les systèmes sylvopastoraux devraient être inclus dans l'évaluation du potentiel de lutte contre l'érosion.

D'un point de vue général, le problème de l'érosion du sol est d'ordre socioéconomique autant que d'ordre environnemental et technique. Ceux qui en souffrent le plus, c'est-à-dire les agriculteurs les plus pauvres, sont le moins à même de mettre en œuvre les mesures classiques de contrôle (Blaikie, 1985; Roose, 1988). Le faible coût d'intrants de beaucoup de systèmes agroforestiers rend ceux-ci accessibles aux agriculteurs les plus pauvres.

Modèles prédictifs: définition et portée

Etant donné la difficulté de mesurer les taux d'érosion, les activités de lutte contre l'érosion se basent en grande partie sur des modèles prédictifs. Ceux-ci sont des équations étalonnées au moyen de mesures prises sur des parcelles standard, et appliquées ensuite aux situations sur le terrain. Ces modèles sont utiles à l'agroforesterie pour ce qui est des taux d'érosion, qui constituent des paramètres importants pour la planification de la lutte anti-érosive par l'agroforesterie.

Trois modèles sont couramment utilisés pour prédire les taux d'érosion du sol: L'Equation universelle de perte de sol, le Modèle d'estimation des pertes de sol pour l'Afrique australe (SLEMSA), et la partie relative à l'érosion dans la méthode d'évaluation de la dégradation du sol de la FAO (appelée ici le modèle FAO). En outre, il existe un système assez complexe imaginé par Rose (1985a, 1985b, 1988) pour modéliser

l'érosion et les processus de sédimentation point par point. Des modèles informatisés combinent quant à eux la prédiction des taux d'érosion avec leur impact, comme le CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion in Agricultural Management Systems) et EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) (Knisel, 1980; Williams, 1985; Flach, 1986; Foster, 1988).

Caractéristiques des modèles

L'Equation universelle de perte de sol (*équation de Wischmeier*) (Wischmeier et Smith, 1978; pour la discussion voir Wischmeier, 1976) est basée sur un grand nombre de données expérimentales pour les Etats-Unis (15 000 années-parcelles) et a été étalonnée et validée dans une mesure beaucoup plus limitée pour quelques régions tropicales. C'est de loin la méthode la plus largement utilisée; elle permet, lorsqu'elle est étalonnée pour une région donnée, de prédire les pertes par érosion sur des parcelles expérimentales, puis (théoriquement) sur des terres agricoles soumises à des traitements semblables, d'une façon suffisamment précise pour les besoins de la planification de l'utilisation des terres. L'équation est conçue pour prédire l'érosion sur un site spécifique, tel qu'un champ.

L'équation de Whischmeier prédit la perte de sol (A) en t/ha/an, par la multiplication de six facteurs entre eux:

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

Il n'y a pas de raison intrinsèque pour que les effets des *causes* individuelles se multiplient; les variables sont étalonnées de telle manière que cette relation s'applique.

R. l'*indice-pluie* est le produit de l'énergie contenue dans les précipitations multiplié par leur intensité maximum en 30 minutes pour tous les orages de plus de 12,5 mm; on l'appelle également l'indice EI₃₀. Le calcul du facteur R exige en tout premier lieu l'examen d'enregistrements détaillés de l'intensité des pluies, à la suite de quoi des cartes d'isocrosivité peuvent être établies. S'il n'y a ni données ni cartes disponibles, plusieurs études ont montré que dans les régions tropicales une approximation grossière pouvait être obtenue en prenant la moitié de la valeur de la pluviosité annuelle moyenne en millimètres, ou généralement un peu moins (Roose, 1976, 1977b; Babu *et al.* 1978; FAO, 1979; Singh *et al.*, 1981a; Lo *et al.* 1985). Ainsi, un site de la zone des forêts tropicales humides avec 2 000 mm de précipitations a un facteur R entre 800 et 1 000; un site de la zone sèche subhumide avec 800 mm de précipitations a un facteur R de 300 à 400.

K. l'*indice-sol* décrit la résistance du sol à l'érosion. Il est établi de telle façon que le produit R × K donne le taux de perte de sol pour un sol nu sur une parcelle d'érosion normale, en tonnes par hectare. Une parcelle standard est longue de 22 mètres et a une pente uniforme de 9% (5,14°). (En utilisant les données, il est essentiel de s'assurer que les valeurs des facteurs R et K sont compatibles, à savoir toutes deux métriques et donnant l'érosion en tonnes par hectare, ou toutes deux non métriques et donnant alors l'érosion en tonnes courtes par acre).

K = 1,0 lorsque A = R, c'est-à-dire quand la perte de sol est égale à L'indice-pluie, et K = 0 pour un sol hypothétique totalement résistant. La valeur de K pour un sol donné est trouvée par expérience, de telle façon qu'elle donne la perte en sol lorsqu'on la multiplie par R. Des valeurs typiques sont 0,1 pour les sols tropicaux plus résistants (ferralsols avec micro-agrégats stables), 0,3 pour des sols de nature intermédiaire (par exemple lixivisols ferriques), et 0,5 pour des sols très érodables.

L, l'*indice longueur de la pente*, donne le rapport entre la perte de sol sur une longueur de champ dont on doit prédire l'érosion et celle d'une parcelle de 22 mètres; la relation est approximativement linéaire, mais un doublement de la pente augmente l'érosion de moins de 50%. S. l'*indice degré de la pente* est le rapport entre la perte de sol d'un champ donné et celle d'un champ dont la pente serait de 9%; il est donné par une équation quadratique, dont l'effet est tel que le doublement du gradient fait plus que doubler le taux d'érosion. En pratique, ces deux facteurs sont combinés en un seul *indice-pente* LS (Tableau 5). La plupart des données expérimentales pour l'équation de Wischmeier proviennent de parcelles en pente douce à modérée, les valeurs citées pour les pentes fortes étant en partie des extrapolations.

L'*indice-culture* (ou indice de couverture et de gestion), qui donne le rapport entre la perte de sol d'un champ ayant un couvert de cultures et une gestion bien spécifiée et celle d'une jachère pure. Il est obtenu par la prise de mesures détaillées de la couverture par les cultures à différentes époques de l'année, mais l'on dispose de tables de valeurs types. C = 1 pour une jachère pure et tombe à près de zéro pour une couverture complète tout au long de l'année.

Dans la pratique, C passe par toutes les valeurs situées entre ces extrêmes. Par exemple, un pâturage surexploité, ou une culture annuelle à faible couverture du sol telle que le maïs ou le tabac à faible rendement, peuvent avoir un facteur C atteignant 0,8, ce qui signifie que l'érosion est à peine plus faible que sur un sol nu.

D'un autre côté, une culture très recouvrante ou une culture pérenne (comme des théiers bien entretenus) peut avoir une valeur C de l'ordre de 0,01 et la forêt tropicale humide naturelle de 0,001, ce qui signifie que l'érosion est égale à respectivement un centième et à un millième de celle se produisant sur un sol nu sous le même climat, à sol et pente identiques.

P. l'*indice-remède*, est défini comme le rapport entre la perte de sol avec une pratique de conservation donnée et la perte de sol avec des cultures en rangs dans le sens de la pente. Il n'a de sens que là où de telles pratiques de conservation sont normalisées et clairement définies. Pour les exemples donnés dans le manuel américain, les pratiques qui laissent la pente telle quelle, comme la culture en bandes, ont un indice P de 0,4 ou plus dans la plupart des cas; c'est-à-dire qu'elles peuvent réduire l'érosion de moitié environ. Des terrassements bien entretenus peuvent donner des indices P de l'ordre de 0,1 à 0,05.

Tableau 5 - Valeurs du facteur topographique (LS) dans l'équation universelle de perte en sol. D'après Wischmeier et Smith (1978)

Pente		Longueur de la pente (m)		
Pourcentages	Degrés	50	100	200
2	1	0,2	0,3	0,4
4	2	0,5	0,7	0,9
6	3	0,9	1,2	1,7
8	5	1,3	1,8	2,5
10	6	1,8	2,5	3,5
15	9	3,3	4,6	6,5
20	1	1 5,2	7,5	10,0
25	14	7,5	11,0	15,0
30	17	10,0	15,0	20,0
40	22	16,0	23,0	34,0
50	27	23,0	36,0	45,0

L'équation de Wischmeier devrait être utilisée avec précaution dans les régions tropicales, où ses prédictions ne paraissent pas toujours réalistes. Les résultats obtenus pour les climats humides et les fortes pentes sont extrêmement élevés; par exemple, la culture de céréales sur une pente de 20° dans les régions tropicales humides conduit à des valeurs de l'ordre de R = 1000, K=0,2, LS= 16 et C = 0,4, ce qui donne une érosion prévisible de 1280 t/ha/an, soit une épaisseur d'environ 10

cm de sol.

La principale caractéristique de ce modèle est le potentiel très élevé de réduction de l'érosion par des pratiques de gestion qui augmentent la couverture du sol.

Le *Modèle d'estimation de la perte de sol pour l'Afrique australe* (SLEMZA) (Elwell, 1980, 1981; Stocking et Elwell, 1981; Stocking, 1981) a le même objectif que l'équation de Wischmeier: prédire l'érosion sur un site agricole spécifique, pour servir de base à la planification de l'utilisation des terres. Il a été conçu et étalonné spécifiquement pour l'Afrique australe et adapté pour la cartographie du risque d'érosion sur de vastes régions (Stocking, 1987).

La perte de sol (Z), en t/ha/an, est donnée par l'équation:

$$Z = K \times C \times X$$

K est la perte de sol d'un sol nu sur une parcelle standard de 30 m de long, avec une pente de 4,5% (2,6°). Elle est tirée d'une équation dont les variables sont E. l'énergie des précipitations, en J.m⁻², et F. l'indice d'érodibilité du sol.

C'est le rapport propre à la culture qui permet d'ajuster la perte en sol d'une jachère nue à la perte en sol sous la culture en question. C'est une fonction de i, le pourcentage de l'énergie des pluies intercepté par le couvert de la culture. Si 20% de cette énergie sont interceptés, la valeur C descend à 0,3; avec 40% de l'énergie interceptés, C passe à 0,1 et avec 50% interceptés, à environ 0,05.

X, le facteur topographique, est une fonction de S. le degré de la pente, et de L, la longueur de cette dernière. Ses valeurs sont très semblables à celles de l'indice LS de l'équation de Wischmeier.

Il existe donc cinq variables de base: E. l'énergie des pluies, F. l'érodibilité du sol, i, l'interception d'énergie par la culture, S. le degré de la pente et L, sa longueur. Celles-ci donnent naissance à trois variables intermédiaires, K. le facteur perte de sol sur sol nu, C, le facteur culture, et X, le facteur topographique, qui sont ensuite multipliés pour donner la perte prévisible par érosion.

Ce modèle diffère de l'équation de Wischmeier en ce que les quatre systèmes physiques qui affectent l'érosion, c'est-à-dire le climat, le sol, la culture et la topographie, sont traités comme des entités séparées; l'utilisation du sol ou la pratique de gestion sont considérées en fonction de leurs effets sur chacun de ces systèmes. Cependant, les grandeurs relatives des différentes variables en jeu sont semblables à celles de l'équation de Wischmeier, en particulier, les grandes différences dans le taux d'érosion qui peuvent être amenées par le degré de couverture de la culture.

Le Modèle FAO (FAO, 1979: 43-46 et 69) a été imaginé dans le but d'évaluer le risque d'érosion hydrique moyen sur de vastes régions, pour servir de base à une cartographie à l'échelle d'un continent. Il constitue l'une des méthodes d'évaluation de la dégradation des sols, les autres étant des méthodes d'évaluation de l'érosion éolienne, de la salinisation, de la sodisation, de l'acidification, de la toxicité, de la dégradation physique et de la dégradation biologique. Ces méthodes ont été utilisées pour produire des cartes de l'Afrique du Nord, montrant l'état de dégradation actuel (qui pourrait résulter du type actuel d'utilisation des terres) et le risque d'érosion (risque de dégradation avec le plus mauvais mode d'utilisation des terres et la pire gestion possibles).

La méthode de prédiction de l'érosion hydrique est essentiellement une simplification de l'équation de Wischmeier.

La perte par érosion (A), en t/ha/an est donnée par l'équation:

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

où les symboles ont le même sens que dans l'équation de Wischmeier (la source n'utilise pas ces symboles-ci; ils sont adoptés dans le présent texte par commodité). A ma connaissance, la méthode n'a pas été testée par rapport aux taux d'érosion observés.

L'intérêt de ce modèle est qu'il donne les moyens d'estimer les valeurs des variables pour de vastes régions et dans des cas où les données plus précises nécessaires aux modèles précédents ne sont pas disponibles. Il donne ainsi des tables pour:

- les valeurs de l'érodibilité pour les types de sol et les classes de textures de la Carte mondiale des sols de la FAO-UNESCO (tableau 6);
- des spécifications topographiques pour les classes de pentes de la même carte;
- des facteurs de couverture généralisés pour les terres cultivées, les pâturages et les forêts.

Tableau 6 - Valeurs généralisées de l'indice-sol (K) dans l'équation universelle de perte de sol (d'après FAO, 1979: 44-45). Les types de sols et les classes de texture sont ceux de la première version de la classification FAO (FAO/UNESCO, 1974).

Niveau 1. Classe d'érodibilité du type de sol		
Basse	Moyenne	Elevée
Arénosols	Greyzems	Podzoluvisols
Chernozem	Kastanozems	Vertisols
Ferralsols		Xérosols

Histosols		Yermosols
Lithosols		
Nitosols		
Phaeozems		
Rendzines		
Rankers		
Acrisols ferriques et humiques	Autres Acrisols	Acrisols plinthiques
Andosols molliques et humiques	Autres Andosols	
Cambisols ferraliques et humiques	Autres Cambisol	Cambisols géliques et vertiques
Fluvisols calcaires	Autres Fluvisols	Fluvisols thioniques
Gleysols calcariques humiques, molliques	Autres Gleysols	Gleysols géliques
Luvisols ferriques	Autres Luvisols	Albique, plinthique, vertique
	Luvisols vertiques	
Planosols molliques et humiques		Autres Planosols
Podzols humiques et leptiques		Autres Podzols
Régosols calcaires	Autres Régosols	Régosols géliques

Niveau 2. Facteur d'érodibilité du sol			
Classe d'érodibilité	basse	Moyenne	Elevée
Classe de texture			
grossière	0,10	0,2	0,4
moyenne	0,15	0,3	0,6
fine	0,05	0,1	0,2

Les facteurs d'érodibilité du sol vont de 0,1 à 2,0, et les spécifications topographiques de 0,15 à 11,0. De même que dans les autres modèles, les spécifications de la couverture du sol ont des valeurs relatives beaucoup plus variées, allant de 0,8 pour les cultures annuelles dans les régions avec pluies saisonnières, à 0,006 pour la forêt avec sous-bois et une couverture supérieure à 80%.

Le modèle de C.W Rose (Rose *et al.*, 1983; Rose, 1985a, 1985b, 1988; Rose et Freebairn, 1985) est un modèle mathématique basé sur des principes hydrologiques et conçu pour simuler le flux de sédiments sur le sol. Il simule l'arrachement de sol par la pluie et l'entraînement et le dépôt des sédiments. Nous n'en donnerons pas de résumé ici, mais nous attirons l'attention sur une caractéristique particulière, à savoir le traitement de la relation entre la couverture du sol et l'entraînement des sédiments.

La couverture est symbolisée par Cr, la fraction de surface du sol exposée, et l'efficacité d'entraînement des sédiments par un facteur non dimensionnel n. Pour Cr = 0 (sol nu), n = 0,7, alors que pour Cr = 0,9, n tombe à 0,25, c'est-à-dire "qu'une couverture de 10% seulement réduit la perte de sol d'environ deux tiers". Ce qui précède est illustré par un tableau comparant la concentration en sédiments en fonction de la couverture. Pour une pente de 10%, on obtient les valeurs suivantes:

Facteur de couverture (Cr)	Concentration en sédiments (kg/m ³)
1,0 (sol nu)	190
0,9	55
0,5	8
0,3	4
0,0 (couverture de 100%)	1

Ceci renforce la conclusion des modèles précédents, selon laquelle la couverture du sol est le principal facteur de lutte contre l'érosion.

Implications

Tous les modèles prédictifs sont basés sur les mêmes causes fondamentales d'érosion hydrique: énergie des précipitations, érodibilité du sol, longueur et angle de pente, et couverture du sol assurée par les plantes. Ce qui importe pour le contrôle de l'érosion, c'est l'importance relative des effets de chacune de ces variables sur le taux d'érosion, la mesure dans laquelle chacune d'entre elles peut être influencée par la gestion des terres, et le coût des mesures de lutte.

L'érosivité des précipitations n'est pas contrôlable par l'homme. En termes très généraux, elle est deux fois plus élevée dans la zone subhumide (savane) que dans la zone semi-aride, et encore deux fois plus élevée dans la zone humide (forêt humide).

L'érodibilité du sol est initialement une propriété inhérente à celui-ci, mais peut varier en réponse à un aménagement. La principale cause réside dans des changements dans la matière organique du sol et leurs effets sur la structure du sol et sa perméabilité. D'après des données de l'équation de Wischmeier, une chute de 1 % de la matière organique entraîne une augmentation de l'érodibilité d'environ 0,04 unités; si elle est associée à une dégradation d'une classe de perméabilité, la modification est de 0,07 unités. Ainsi, un sol ayant un facteur K initial de 0,30 pourrait passer, pour une perte de 10% de matière organique, à un facteur K de 0,34 à 0,37, soit un changement relatif de 13 à 23%. En termes généraux, une dégradation modérément sévère de la teneur en matière organique du sol est susceptible de diminuer sa résistance à l'érosion de 10 à 25% environ, et une réduction grave de cette teneur peut diminuer la résistance de 50% environ.

La longueur et l'angle de pente, au sens géomorphologique, sont inaltérables, mais l'ampleur de leur impact sur l'érosion peut être modifiée par des mesures de conservation.

L'angle effectif de pente ne peut être modifié que par la construction de terrasses. Bien entretenues, celles-ci contrôlent l'érosion sur les pentes raides. Cependant, le coût de construction (ou le besoin de main-d'œuvre) est élevé.

La longueur effective de pente est réduite par des mesures de conservation de type barrière. Il peut s'agir de structures en terre (diguettes, fossés d'évacuation, fossés d'assainissement) ou de barrières biologiques (bandes enherbées, haies de barrage). Sur des pentes relativement douces, jusqu'à environ 14% (8°), les barrages peuvent être efficaces pour contrôler l'érosion, sous réserve d'un coût de construction peu élevé et d'un entretien convenable. Pour réduire l'érosion à des niveaux acceptables sur des pentes fortes, les barrages doivent être peu espacés, par exemple de 5 m sur une pente de 40% (22°); cela signifie que la proportion de terre retenue est importante à moins que les barrages soient étroits.

Il convient de faire la distinction entre barrières perméables et imperméables. Les *barrières imperméables* sont celles qui, telles que les structures associant planches et fossés stoppent tout ruisseaulement, soit en détournant l'eau, soit en provoquant son infiltration. Les *barrières perméables* sont celles qui permettent le passage d'une partie du ruissellement. En agroforesterie, les barrières ne sont imperméables que si des arbres sont plantés sur des structures en terre. Lorsque les barrières sont purement biologiques, comme les haies ou les bandes enherbées plantées d'arbres, elles sont partiellement perméables.

La plupart des recherches standard sur la conservation du sol sont basées sur l'hypothèse de barrières imperméables. Des recherches sont nécessaires sur le fonctionnement des barrières partiellement perméables à base de végétaux.

La couverture du sol a une grande influence sur le taux d'érosion. Quel que soit le modèle prédictif utilisé, si seuls les effets des indices-pluie, sol et pente sont calculés, il en résulte généralement des taux d'érosion élevés. Par exemple, un site de la zone subhumide (R typiquement 500), avec un luvisol ferrique (K typiquement 0,3) sur une pente de 10% (5,7°), longue de 50 m (S typiquement 1,7) risque une érosion de 255 t/ha/an. La réduction de la longueur de pente à 10 m par des barrières abaisse l'érosion à 105 t/ha/an. Ces valeurs apparemment élevées sont des prédictions, validées par l'expérience, de l'érosion à attendre si la terre est laissée en jachère.

Le facteur couverture peut réduire spectaculairement le taux d'érosion (tableau 7). Pour les cultures annuelles, la valeur varie considérablement en fonction de la croissance végétale et de la gestion. Une culture céréalière de rendement modéré a une valeur C d'environ 0,4; une autre de plantation tardive et à faible rendement a une valeur C d'environ 0,8, tandis que pour une culture à haut rendement avec paillage, on a obtenu une valeur de seulement 0,1 (N W. Hudson, communication personnelle). L'association de cultures donne généralement une meilleure couverture que la monoculture. Les cultures ligneuses pérennes associées à des cultures basses de couverture peuvent réduire l'érosion de 0,1 à 0,01 de son taux sur sol nu. Il y a de grandes différences selon que les résidus sont disposés comme paillis en surface, ou bien brûlés ou enterrés.

En résumé, les effets combinés des précipitations, de l'érodibilité du sol et de la pente conduiront souvent à la prédiction de taux d'érosion exagérément élevés, tandis que les cultures céréalières et racinaires ne réduisent pas grandement ces taux. Par ailleurs, tout système de gestion dans lequel une importante couverture du sol est entretenue pendant la période des pluies érosives peut réduire l'érosion à des valeurs situées entre un dixième et un centième de celle du sol nu.

Erosion acceptable

Il est impossible de réduire à zéro le taux de perte de sol. Il faut se fixer des limites lors de la conception de systèmes d'utilisation des terres. Elles doivent être fixées suffisamment bas de manière à ne pas entraîner un déclin sérieux ni progressif de la production, et cependant assez haut pour être réellement accessibles.

Le concept d'"érosion tolérable" ou de "perte de sol tolérable" a souvent été utilisé abusivement. Il est apparu à l'époque où l'érosion était considérée avant tout comme la perte physique de matériel pédologique. La notion de base était que l'érosion reste acceptable tant qu'elle ne dépasse pas le taux de renouvellement du sol par les processus naturels. L'idée s'est imposée que "là où les processus naturels sont accélérés par le labour", environ 25 mm de sol superficiel se forment en 30 ans. Cela correspond à une érosion d'environ 5 tonnes courtes par acré et par an (11,2 t/ha/an). Cette valeur avait en outre été choisie parce qu'on croyait possible de limiter à ce taux l'érosion dans les conditions d'exploitation agricole. Le Service de conservation des sols des Etats-Unis fixe les limites de l'érosion tolérable principalement dans la zone de 2,2 à 11,2 t/ha/an en se basant sur le fait que les sols peu profonds sur roche dure ont une moindre tolérance que les sols profonds ou ceux formés de roches-mères non consolidées. En fait, de telles limites sont rarement atteintes (Smith et Stamey, 1965; McCormack et Young, 1981; ASA, 1982).

La base scientifique de ce concept est contestable. Il se réfère initialement à la formation de couche arable à partir de matériel pédologique déjà altéré, plutôt qu'à l'altération de la roche en régolithe, mais des discussions ultérieures confondent ces deux processus. Des données géomorphologiques indiquent que les taux typiques de dénudation naturelle sont de 50 mm par 1000 ans sur pentes douces et de 500 mm par 1 000 ans sur pentes fortes, et varient largement selon le climat et le type de roche. Il est rarement possible de réduire l'érosion à ces taux sur terre cultivée ou sur pâturage (Stocking, 1978; Young 1969; Saunders et Young, 1983; Young et Saunders, 1986).

Les objectifs du contrôle de l'érosion devraient être reformulés en mettant davantage l'accent sur le déclin de la productivité. La perte de sol en volume ou en épaisseur ne devient grave que lorsque l'érosion a atteint un stade avancé. Bien avant que ce stade ne soit atteint, de sérieuses pertes de rendement se manifestent en raison de l'épuisement de la matière organique qui entraîne le déclin des propriétés physiques du sol et une perte d'éléments nutritifs.

Les limites de tolérance pour l'érosion du sol devraient être basées sur un rendement soutenu des cultures, traduit en termes de maintien de la matière organique et des éléments nutritifs. Précisément, afin de déterminer si un système est stable, la capacité des pratiques agroforestières de fournir de la matière organique et de recycler les éléments nutritifs doit être prise en compte en même temps que leur élimination par l'érosion.

Tableau 7 - Valeurs de l'indice de couverture (C) dans l'équation universelle de perte de sol.

<i>A. D'après la FAO (1979)</i>	Pourcentage de couverture du sol					
	0 - 1	1 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
Pâturages et terrains de parcours	0,45	0,32	0,20	0,12	0,07	0,02
Boisements avec sous-étage appréciable	0,45	0,32	0,16	0,18	0,01	0,006
Boisements sans sous-étage appréciable	0,32	0,20	0,10	0,06	0,01	
Cultures						
Climats humides	0,4					
Climats subhumides	0,6					
Climats semi-arides	0,8					
<i>B. D'après Roose (1977a, 1986) pour l'Afrique de l'Ouest</i>						
Sol nu (référence)	1,0					
Forêt dense	0,001					
Savane en bon état	0,01					
Savane brûlée ou surpâturée	0,1					
Cultures de couverture	0,01-0,1					
Mais, sorgho, mil (en fonction du rendement)	0,4-0,9					
Cotonnier, tabac	0,5					
Arachides	0,4-0,8					
Manioc, igname	0,2-0,8					
Palmier à huile, arbre à caoutchouc, cacaoyer avec cultures de couverture	0,1-0,3					
Ananas						
Résidus brûlés ou enfouis	0,1-0,5					
Résidus en surface	0,01					
<i>C. D'après Lewis (1987) pour le Rwanda</i>						
Caféier	0,02	Haricots	0,19	Mais/Haricots	0,30	
Banane	0,04	Haricots/manioc	0,20	Mais	0,35	
Banane/haricots	0,10	Pomme de terre	0,22	Sorgho	0,40	
Pâturage	0,10	Patate douce	0,23	Tabac	0,45	
Banane/sorgho	0,14	Manioc	0,26			

Signification pour l'agroforesterie

Les modèles sont un substitut de la réalité, et les données expérimentales sont bien préférables. Cependant, dans la planification pratique du contrôle de l'érosion par l'agroforesterie, il est simplement impossible de mesurer les taux d'érosion et la perte d'éléments nutritifs sur tous les terrains. Ainsi, la principale utilité des modèles de prédiction de l'érosion est d'étendre les résultats obtenus dans des conditions expérimentales sur un petit nombre de sites soigneusement suivis, aux nombreuses surfaces agricoles pour lesquelles des mesures de contrôle sont en cours de planification. Pour ce faire, il est nécessaire d'évaluer les modèles selon les conditions de l'agroforesterie, qui diffèrent de celles du contrôle par des structures en terre.

Les caractéristiques importantes pour la recherche agroforestière et pour la conception de solutions de ce type sont les suivantes:

- sur des pentes fortes, les structures anti-érosives de type barrière doivent être peu espacées, d'environ 6 m maximum. Pour être acceptables par les agriculteurs, ces barrages doivent être étroits et/ou productifs, conditions pour lesquelles les haies sont susceptibles d'offrir les qualités requises;

- les barrières formées par des arbres, des arbustes ou des haies sont partiellement perméables. Une partie du ruissellement peut traverser les barrages et les matériaux entraînés sont en partie filtrés et déposés. Les modèles existants ne seront totalement applicables que lorsqu'on aura fait des recherches sur l'ampleur de ces processus;
- puisque la couverture du sol peut être si importante pour lutter contre l'érosion, la recherche agroforestière devrait accorder une attention particulière aux effets de couverture que l'on peut obtenir en utilisant les émondons des ligneux comme paillis;
- inversement, un couvert haut de plus de quelques mètres n'est pas susceptible de réduire l'érosion substantiellement, sinon par la litière qui en provient;
- des recherches sont nécessaires pour savoir si l'effet filtrant des barrières partiellement perméables d'arbres et d'arbustes réduit le taux d'enrichissement en éléments nutritifs du sol érodé.

En résumé, les modèles de prédiction de l'érosion ne devraient pas être appliqués sans discernement aux cas relevant de l'agroforesterie; des recherches spécifiques sur les conditions spéciales s'appliquant aux ligneux dans le contrôle de l'érosion sont nécessaires. Néanmoins, en attendant, tout porte à croire qu'une conception agroforestière devrait viser à maximiser la couverture du sol par l'utilisation des résidus végétaux pendant la période des pluies érosives.

L'importance de la couverture du sol

Outre la conclusion tirée ci-dessus sur la base des modèles prédictifs, l'expérience montre que l'entretien d'une bonne couverture de la surface du sol peut grandement réduire les pertes de sol.

Une expérience astucieuse conçue il y a bien des années a consisté à suspendre une fine gaze de moustiquaire à une faible hauteur au-dessus du sol. Le filet rompt l'impact des gouttes de pluies, qui atteignent bien le sol, mais sous la forme de fines gouttes. Le sol est dénudé par sarclage et le ruissellement vers le bas de la pente n'est pas entravé. Cet artifice réduit l'érosion à environ un centième de sa valeur sur sol nu non protégé (Hudson, 1981: 216-217; Cunningham, 1963).

Des résultats du même type sont ressortis d'un travail expérimental dans des conditions agricoles. Même une culture considérée comme comportant un risque d'érosion relativement élevé, telle que le maïs, réduit substantiellement l'érosion par rapport au sol nu (Elwell et Stocking, 1976). Une densité plus élevée de plants et un meilleur taux de croissance améliorent la couverture et la protection (Hudson, 1981: 211-212). L'érosion sous cultures céréalières peut être largement réduite par l'association de cultures avec des légumineuses comme *Stylosanthes* ou *Desmodium* (El Swaify *et al.*, 1988). Le contraste entre la couverture protectrice offerte par des cultures bien gérées et celle de cultures mal gérées est évident avec le théier; une culture avec des plants peu espacés, avec une bonne croissance et un élagage correct procure un couvert de près de 100%, alors qu'une culture de théier mal gérée entraîne souvent une érosion sévère. On a constaté qu'une couverture de plus de 60% abaisse la perte de sol jusqu'à de faibles valeurs (Othieno, 1975; Othieno et Laycock, 1977). Les cultures mixtes fournissent une meilleure couverture que la monoculture (Aina *et al.*, 1979).

Dans les jeunes plantations de palmiers à huile, l'érosion est évitée par une culture de couverture dense, souvent *Pueraria sp*. Le couvert presque fermé des palmiers adultes leur donne cependant trop d'ombrage. L'érosion peut alors être contrôlée par les frondes élaguées déposées sur le sol, de préférence avec les sommets placés vers le bas de la pente pour créer un flux interne vers les stipes (Quencez, 1986; Lim, 1988).

Une couverture de paillis est très efficace pour lutter contre l'érosion. Avec de la paille ou des résidus de cultures à raison d'environ 5 t/ha, les pertes de sol diminuent fortement. avec 1 à 2 t/ha, les effets sont encore substantiels (ex. Lal, 1976a, 1976b, 1977a, 1977b, 1984; Okigbo et Lal, 1977; Abujamin, 1985). Dans l'ouest du Nigeria, on a découvert que le maïs réduisait l'érosion davantage que prévu en se basant sur la protection du couvert; il est probable que le supplément de protection était dû aux résidus de culture à la surface du sol (Wilkinson, 1975).

En dehors des régions tropicales, on a constaté que l'utilisation des résidus de cultures, une couverture végétale vivante et l'absence de labour constituaient un moyen efficace de contrôler l'érosion dans le sud-est des Etats-Unis; une couverture du sol de 50% après plantation donne un facteur de couverture (C) de 0,1; une couverture de 80% donne un facteur de 0,05 (Sojka *et al.*, 1984).

Dans le système de labour minimum, on observe un type de paillage spécial. Rien que l'absence de travail du sol, sans ouvrages de conservation de type barrière, réduit l'érosion dans des limites de tolérance plus qu'acceptables (Lal, 1977b, 1984, 1988b). Le paillage ne doit pas nécessairement être complet; une couverture spatiale de 60% ou plus peut réduire l'érosion à une petite fraction de sa valeur sans couverture (Rose et Freebairn, 1985; Rose, 1988; Stocking, 1988).



Photo 5 - La méthode de la barrière: formation naturelle d'une terrasse par accumulation de sol en amont d'une haie de Gliricidia sepium. Leyte, Philippines.



Photo 6 - La méthode de couverture: dans un système de cultures intercalaires avec haies, des émondages de *Gliricidia sepium* mélangés à des résidus de culture de maïs forment un paillis complet à la surface du sol. Maha Illuppallama, Sri Lanka.

On observe un exemple pratique notable de couverture anti-érosive dans une région montagneuse subhumide à tendance humide de Tanzanie. Sur une parcelle agricole à pente de 20 à 25°, l'érosion a été maintenue bien en dessous de 1 t/ha/an par une gestion basée sur la couverture, incluant le paillage avec des adventices et des résidus de culture (Lundgren, 1980).

Les effets relatifs du couvert, du sous étage et de la litière ont été comparés dans une étude sur une plantation de *Racospermum auriculiforme* (= *Acacia auriculiformis*) âgée de 5 ans sous un climat humide de basses terres à Java. Ces trois éléments ont été enlevés artificiellement, isolément et par deux. Le couvert seul avait relativement peu d'effet et l'effet ajouté du sous-bois était faible. La litière seule, par contre, réduisait l'érosion de 95% par rapport au sol nu. Inversement, dans une forêt naturelle, l'érosion mesurée restait inférieure à 1 t/ha/an lorsque les arbres et le sous-étage étaient enlevés artificiellement et que la litière demeurait, alors qu'elle s'élevait à 26 t/ha/an lorsque le sous-étage et la litière étaient artificiellement enlevés et que seul demeurait le couvert ligneux. Le cas de la litière seule ne peut évidemment pas être maintenu dans les conditions naturelles; la litière en décomposition doit en effet être renouvelée par un apport de matériaux frais provenant du couvert, qui joue donc un rôle (Wiersum, 1985).

Ces données suggèrent que les systèmes agroforestiers sont probablement plus efficaces dans le contrôle de l'érosion par l'apport de litière sur la surface du sol que par les effets du couvert des arbres. Certains ligneux à usages multiples sont délibérément choisis pour leur voûte modérément ouverte, de manière à réduire les effets d'ombrage. Dans les pratiques agroforestières spatiales mixtes, comme les jardins de case, la structure multiétagée de la végétation peut fournir un couvert relativement dense, mais celui-ci sera sûrement accompagné par une couverture adaptée au niveau du sol. Dans les pratiques de zones, telles que la culture intercalaire, le couvert des arbres est nécessairement limité aux rangées ligneuses, et fréquemment réduit par un élagage régulier; mais là où les résidus d'élagage sont disposés sur les allées cultivées adjacentes, on a une couverture de litière.

Les faits permettent donc de déduire que pour le contrôle de l'érosion:

- le plus grand potentiel de l'agroforesterie réside dans sa capacité à fournir et à entretenir une couverture du sol;
- les effets directs du couvert arboré sont inférieurs à ceux de la litière pour fournir une couverture;
- une couverture de litière sur le sol, maintenue pendant toute la durée des pluies érosives, réduit souvent l'érosion à des niveaux acceptables. même sans mesures additionnelles du type barrière contre le ruissellement.

Ainsi, c'est par une couverture de litière en surface, formée de résidus de culture d'émondages ou des deux, que la prévention directe de l'érosion du sol est le mieux assurée. Le rôle du couvert des ligneux est d'assurer un apport de matériaux feuillus

par chute directe ou par élagage, qui soit suffisant pour entretenir cette couverture de surface. Du seul point de vue du contrôle de l'érosion, il est souhaitable que la litière se décompose relativement lentement, mais cela peut entrer en conflit avec un besoin d'apport précoce d'éléments nutritifs aux cultures en croissance. Un peuplement mélangé d'espèces d'arbres à décomposition rapide et à décomposition lente représente un compromis envisageable.

Classification des terres, évaluation des terres et utilisation des terres en pente

Il existe deux grandes méthodes de classification des terres en fonction de leur potentiel d'utilisation: la classification des aptitudes des terres et l'évaluation de ces dernières. Elles prennent l'une et l'autre en compte le risque d'érosion du sol.

Classification des aptitudes des terres

La classification des aptitudes des terres a pris naissance aux Etats-Unis et a depuis été adaptée et largement appliquée à la planification de l'utilisation des terres dans les pays en voie de développement. Les terres sont réparties dans un certain nombre de classes, généralement de I à VIII, basées sur les limitations naturelles dues à l'érosion, à l'humidité, au sol et au climat. Les terres de classe I à IV sont "arables", c'est-à-dire estimées appropriées aux cultures pluviales, la classe V concerne des cas spéciaux, comme des fonds de vallée humides, et les classes VI à VIII se rapportent aux terres non cultivables et considérées comme convenant au pâturage, à la forêt ou à la conservation (Klingebiel et Montgomery, 1961; Dent et Young, 1981: 128-139; Shaxson et al., 1977: 148-158).



Photo 7 - Méthodes combinées de barrière et de couverture: rangées de haies de Leucaena leucocephala dont les émondages sont étalées sur les allées cultivées. Station de l'ICRAF à Machakos, Kenya.

Parmi les limitations qui déterminent ces classes d'aptitude, la limitation "e" ou risque d'érosion est généralement dominante dans la pratique. Cela provient du fait que le système était en premier lieu conçu pour les besoins de la conservation du sol. Dans les tables de conversion des limitations en classes d'aptitude, le risque d'érosion est évalué par des combinaisons de l'angle de pente avec les propriétés représentant la résistance du sol à l'érosion. Les classes arables, de I à IV, se distinguent entre elles par deux points, le choix des cultures et le besoin de pratiques de conservation; le choix des cultures est à son tour en partie déterminé par le fait que des cultures à haut risque d'érosion (faible couverture du sol) peuvent ou non être implantées. La raison de loin la plus commune pour laquelle des terres sont classées comme non cultivables est l'angle de la pente avec le risque d'érosion qui s'ensuit.

La plupart des adaptations de ce schéma aboutissent à une classification dans les terres non arables de pentes seulement modérées. Une adaptation spéciale aux "terrains collineux, marginaux" (pour Taïwan et la Jamaïque) permet la mise en culture sur des pentes jusqu'à 25°, à condition que les sols soient profonds, mais demande la construction de terrasses en gradins ou autres structures exigeantes en main-d'oeuvre, dès que la pente dépasse 15° (Sheng, 1986: 5-16).

Le recours à la classification des aptitudes des terres pour planifier leur utilisation a pour résultat que toutes les terres en pente modérée à forte sont cartographiées comme utilisables seulement à des fins non culturales. Pour de nombreuses régions des pays en développement, ce résultat est en conflit avec l'utilisation actuelle des terres, et il serait totalement irréaliste de tenter de l'appliquer. Les régions de terres en pente sont déjà utilisées pour des cultures vivrières de subsistance et des familles, quelquefois des communautés entières, vivent de cette production; on en a des exemples sur de vastes régions au Rwanda, au Burundi, en Ethiopie et au Malawi. Il serait socialement indésirable et impraticable d'essayer de changer cette situation. Il faut trouver des moyens d'assurer la continuité de la production vivrière sur les terres en pente.

La méthode de la barrière et la méthode de couverture

La *méthode de la barrière* pour le contrôle de l'érosion consiste à stopper le ruissellement et l'enlèvement du sol au moyen de barrières. Celles-ci peuvent être des structures en terre (structures de fossés, terrasses), des bandes enherbées ou des haies. La *méthode de couverture* pour le contrôle de l'érosion consiste à réduire l'impact des gouttes de pluie et le ruissellement par le maintien d'une couverture du sol formée de matériel végétal mort et vivant, incluant des plantes herbacées, des résidus de culture, la litière et les résidus d'émondage des ligneux. Les techniques incluent les cultures intercalaires avec cultures de couverture, le paillage, le labour minimum et l'agroforesterie.

L'agroforesterie peut contribuer directement à la méthode de barrières par l'utilisation de haies comme barrages partiellement perméables, et indirectement par le rôle des ligneux dans la stabilisation des structures en terre et l'utilisation productive de la terre qu'ils occupent.

L'agroforesterie peut contribuer à la méthode de couverture par l'apport de litière et de résidus d'émondage, en combinaison avec la couverture de la culture vivante et les résidus de culture.

L'analyse des causes de l'érosion indique que le potentiel de lutte antiérosive de la méthode de couverture est plus grand que celui de la méthode de barrière. Par conséquent, dans la conception de systèmes agroforestiers anti-érosion, l'objectif

primordial devrait être le maintien d'une couverture du sol pendant toute la période des pluies érosives.

En Asie, ce problème a en général été résolu par des terrassements, par exemple au Nord Yémen, à Java, aux Philippines, au pied de l'Himalaya en Inde et au Népal. Par ce moyen, des terres de classe d'aptitude VI et VII sont utilisées pour des cultures pluviales ou irriguées; pour autant que les terrasses soient entretenues, la conservation du sol et de l'eau est assurée (bien que le déclin de la fertilité puisse encore constituer un problème). Cependant, cette solution exige beaucoup d'œuvre sur de nombreuses années pour construire une terrasse supplémentaire par an, et il est peu probable qu'elle puisse être introduite dans des régions où elle n'est pas déjà coutumière.

Evaluation des terres

Dans la méthode d'évaluation des terres, des superficies de terres sont évaluées quant à leur aptitude à un certain nombre d'usages définis, appelés types d'utilisation des terres. A l'échelle de la reconnaissance, ceux-ci peuvent être des types généraux d'utilisation, comme la culture, le pâturage et la foresterie. Dans la plupart des cas de planification, cependant, les types d'utilisation des sols sont spécifiés plus en détail, par exemple "cultures arables, rotation maïs/dolique, absence d'engrais, travail manuel, absence d'ouvrages de conservation des sols". Une utilisation du sol identique hormis la spécification "avec diguettes" constituerait un type différent d'utilisation des terres, pour lequel les aptitudes estimées seraient autres.

L'aptitude de la terre à un usage déterminé est évaluée par comparaison entre les exigences de cette utilisation et les propriétés de la terre, appelées qualités de la terre, par exemple le taux d'humidité, la disponibilité d'éléments nutritifs et le potentiel de mécanisation. Ainsi, si l'utilisation de la terre repose sur une exigence donnée, disons un taux d'humidité suffisant pour assurer une période de croissance de 120 jours et qu'une parcelle répond à ce critère, on dira en fonction de l'humidité disponible que cette terre est apte à l'utilisation en question.

Dans cette méthode, le risque d'érosion est traité comme une propriété de la terre. On considère souvent comme une "exigence lice à l'utilisation de la terre" un certain taux d'érosion jugé acceptable, par exemple 10 t/ha/an. L'érosion lice à l'utilisation spécifiée est estimée pour chaque parcelle à l'aide d'un des modèles prédictifs. Si l'érosion prévisible dépasse le niveau acceptable, la parcelle est jugée inapte à cette utilisation (FAO, 1983: 113-120; Bennema et de Meester, 1981).

Cette méthode, qui s'attache à détailler les types d'utilisation des sols, offre une approche plus souple de la planification de l'utilisation des terres que la classification des aptitudes. En particulier, elle permet d'adapter une forme d'utilisation de façon qu'elle convienne à une terre pour laquelle elle était initialement inadéquate; ce processus d'adaptations successives entre terres et utilisation des terres est connu sous le nom d'ajustement ("matching") (FAO, 1976a, 1983, 1984; Dent et Young, 1981; Young 1984a).

Agroforesterie et utilisation des terres en pente

Il est admis que les terres en pente, c'est-à-dire les régions dominées par des pentes modérées à fortes, forment un type distinct et répandu d'environnement tropical posant des problèmes particuliers, parmi lesquels l'érosion vient en tête (Novoa et Posner, 1981; Siderius, 1986). L'introduction de pratiques agroforestières peut apporter une solution au dilemme créé par l'existence d'un fort risque d'érosion avec l'agriculture conventionnelle sur terre en pente et le fait que de vastes superficies de ces terres arables sont déjà cultivées et doivent continuer de l'être. Certaines pratiques, comme les barrières de haies, les cultures intercalaires avec haies vives et les jardins ligneux multiétages, ont le potentiel nécessaire pour permettre de cultiver sur des terres en pente tout en assurant une conservation adéquate du sol et une utilisation productive soutenue. Des essais en cours dans le district de Ntcheu au Malawi illustrent cette situation. En raison de la pression démographique, la mise en culture s'y est étendue largement et irrévocablement jusqu'aux terres en pente de 25° et plus. Un système de barrières de haies peu espacées est testé dans le but spécifique de trouver un moyen de rendre la production de maïs durable sur des terres qui auraient normalement été classées comme non cultivables.

Il n'est ni souhaitable, ni réalisable d'introduire une nouvelle classe d'utilisation, l'"agroforesterie", dans la classification des aptitudes des terres (comme l'a tenté Sheng, 1986: 55-60). La capacité de diverses pratiques agroforestières à contrôler efficacement l'érosion varie si largement que l'on ne pourrait fixer de valeur limite à la pente pour l'agroforesterie prise globalement. De toute manière, la classification des aptitudes est moins appréciée, et il ne serait d'aucune utilité de l'adapter à l'agroforesterie.

En revanche, l'évaluation des terres est bien adaptée aux conditions de l'introduction de pratiques agroforestières dans les systèmes existants d'utilisation des terres. On peut considérer comme un type d'utilisation des terres toute pratique agroforestière, en spécifiant les espèces de ligneux et de plantes cultivées et leur densité et on peut évaluer son aptitude à être utilisée dans un certain nombre de régions données. Détailler le mode d'évaluation sort du cadre de la présente étude, mais le plus important est qu'une telle évaluation prenne en considération le potentiel de lutte contre l'érosion. Par ce moyen, on peut évaluer les aptitudes des systèmes existants d'utilisation des terres et les comparer avec d'autres formes d'utilisation améliorées, agroforestières ou non. Le stade de conception de la méthode agroforestière de D & D (diagnosis and design) est tout à fait compatible avec la méthode de l'ajustement ("matching") dans l'évaluation des terres (Young, 1984a, 1986b).

Une question très importante se pose du point de vue de la politique à suivre et de l'investissement: dans quelles régions les bénéfices potentiels de l'agroforesterie sont-ils les plus élevés? Les fonds pour la recherche et le développement étant limités, il est évidemment souhaitable de savoir quelles régions doivent avoir la priorité. Cette question nécessite encore beaucoup de travail, mais un fait en rapport avec notre propos est clair: parmi les régions considérées comme offrant un potentiel élevé à l'agroforesterie, les terres en pente sont particulièrement nombreuses. Les régions dans lesquelles l'ICRAF a participé à des projets en collaboration ou en consultation en témoignent. Sur les huit premières régions figurant dans le programme initial de collaboration, deux pourraient être classées comme étant modérément en pente, et cinq comprenaient des terres en pente très forte. Cette expérience se poursuit par exemple dans des travaux de coopération au Rwanda, en Ethiopie, au Népal et au Malawi. Bien que ces faits ne puissent être démontrés statistiquement, il ne fait aucun doute que, de tous les vastes ensembles de conditions environnementales, celui des terres en pente offre un potentiel agroforestier des plus élevés (Young, 1986c).

Erosion, productivité du sol et rentabilité

Erosion du sol et productivité

Ce n'est que ces dernières années que l'attention s'est portée sur la question fondamentale de l'effet de l'érosion sur les rendements des cultures et sur la productivité du sol. La conservation du sol était auparavant liée au souci plus général d'empêcher la perte totale de la ressource naturelle qu'est le sol, ce qui aurait mis la terre hors d'état de produire. Cette approche est valable à long terme, mais elle ne satisfait pas aux exigences de l'analyse économique. Pour justifier les mesures de conservation du sol en termes économiques, il est nécessaire de démontrer que l'érosion réduit la productivité de la terre. La plupart des premières recherches sur ce sujet étaient basées aux Etats-Unis, et ce n'est que depuis 1980 qu'une grande

attention s'est portée sur l'érosion et la productivité des sols tropicaux.

L'intérêt de la question pour l'agroforesterie ne réside pas dans les potentialités techniques de cette dernière discipline, mais dans l'établissement de l'importance fondamentale de la conservation du sol d'un point de vue social et économique. Assistance et investissement doivent être justifiés sur la base du maintien de la production vivrière et l'apport d'un revenu économique de l'investissement. Si la recherche en agroforesterie doit être justifiée par son potentiel de contrôle de l'érosion, il est alors nécessaire de connaître les conséquences approximatives de l'érosion non contrôlée. C'est pourquoi nous résumons ici l'état actuel des connaissances, principalement sur la base des articles et études récents comme: Bennema et de Meester, 1981; Higgins et Kassam, 1981; Stocking et Pain, 1983; Rijsberman and Wolman, 1984, 1985; A.S.A.E., 1985; Crosson, 1985; Follett et Stewart, 1985; Lal, 1985; Larson et al, 1985; Stocking et Peake, 1985, 1986; Williams, 1985; Yost et al., 1985; Flach, 1986; Peake, 1986.

Les premières tentatives pour établir un rapport entre productivité et érosion se fondaient sur la perte de profondeur du sol. Supposons un sol de 1 m de profondeur, qui devient non cultivable lorsque la profondeur devient inférieure à 20 cm, alors que l'érosion se produit au taux très élevé de 60 t/ha/an, correspondant à 4 mm d'épaisseur du sol. Dans ce cas, la productivité sera réduite à zéro en 800/4, soit 200 ans. L'hypothèse la plus simple était que le rapport entre le déclin de la productivité et la profondeur du sol était linéaire, si bien que dans l'exemple donné, les rendements des cultures tomberaient de 1/200, soit 0,5% par an. Il n'est pas surprenant que l'analyse basée sur un tel raisonnement montre que l'investissement dans la conservation pouvait rarement se justifier en termes économiques, autrement que sur des sols initialement peu profonds

Un progrès a été fait lorsqu'on a estimé les effets de la perte de sol arable non seulement sur la profondeur mais aussi sur les autres propriétés du sol. Dans les régions sujettes à des périodes plus ou moins longues de sécheresse, la réduction de la profondeur risque d'entraîner une perte substantielle de la capacité de rétention de l'eau. On a fixé un indice de productivité du sol basé sur la supposition que la principale fonction de celui-ci est de fournir un milieu propice à la croissance racinaire. L'indice de productivité PI est donné par l'équation:

$$PI = \sum_i^n (A_i \times C_i \times D_i \times WF_i)$$

où A_i est l'indice de teneur en eau utile de la couche de sol i , C_i un indice similaire pour la densité apparente et D_i pour le pH; WF_i est un facteur de pondération pour la couche i , fonction de la proportion de racines présente dans chaque couche. Dans certains tests du modèle pour les conditions tropicales, des facteurs supplémentaires concernant le carbone organique et la présence de graviers sont ajoutés. Les étapes de l'évaluation des effets de l'érosion sont les suivantes:

- étalonnage des facteurs A, C, D et autres facteurs utilisés, en fonction de leurs effets sur le rendement des cultures dans la région étudiée; un sol idéal a des valeurs factorielles, et donc un PI de 1;
- calcul de l'indice de productivité pour chaque type de sol dans son état actuel;
- nouveau calcul de l'indice de productivité pour chaque sol en supposant que des couches de diverses épaisseurs sont enlevées de la surface du sol par érosion (sans modifier les propriétés des couches restantes).

Les résultats obtenus en appliquant cette méthode sur la partie continentale des Etats-Unis ont montré des effets plus importants que ceux tirés de la seule prise en compte de la profondeur du sol, mais ils n'étaient encore que modérés; la perte de 50 cm de sol produisait une diminution de l'indice de productivité de plus de 0,3 dans seulement 16% des types de sols étudiés. Des tests ont été faits à Hawaii, au Nigeria, en Inde et au Mexique, malgré un manque de données dans tous les cas; les résultats variaient largement entre les types de sol, une perte de sol simulée de 20 cm entraînant tantôt une diminution de productivité de 20 à 40%, tantôt, aucune diminution (Rijsberman et Wolman, 1984, 1985; Larson et al., 1985).

Un modèle plus sophistiqué a été récemment mis au point, le Calculateur de l'Impact de l'Erosion sur la Productivité (EPIC). Il est d'une grande complexité et prend en compte de nombreuses variables concernant les conditions météorologiques, l'hydrologie et le sol; il calcule en particulier le cycle du carbone, de l'azote et du phosphore. Le modèle a prédit avec succès la production de sédiments, les changements pédologiques et les rendements cultureaux aux Etats-Unis, et l'on peut espérer qu'il sera essayé sur les conditions des régions tropicales (National Soil Erosion, 1981; Williams et al., 1982; Williams, 1985).

Dans les études sur le terrain, la plupart des travaux étaient basés sur l'enlèvement artificiel et manuel d'une couche de la surface du sol, où on faisait ensuite pousser une culture. Un grand pas en avant a été fait quand on a découvert que cette méthode sous-estimait la réduction du rendement culturel due à l'érosion. La comparaison entre des sols ayant subi un prélèvement artificiel et des parcelles sujettes à des taux élevés d'érosion naturelle a montré que pour des volumes équivalents de sol enlevé, la réduction du rendement était bien plus élevée sur ces derniers. Dans un cas, la réduction du rendement due à l'érosion naturelle s'est montrée 16 fois supérieure à celle causée par l'enlèvement artificiel de la même épaisseur de sol.

Ceci s'explique au moins en partie par le fait que les sédiments érodés ont une teneur beaucoup plus grande en matière organique et en éléments nutritifs que celle de la couche arable dont ils sont enlevés. La différence est appelée facteur d'enrichissement des sédiments érodés; par exemple si la couche arable a une teneur en azote de 0,02% et les sédiments érodés, de 0,4%, le facteur d'enrichissement est égal à 2. Les facteurs d'enrichissement pour le carbone et les principaux éléments nutritifs sont fréquemment de l'ordre de 2 à 4, atteignant occasionnellement 10; ils sont plus élevés sur pentes douces et pour une érosion modérée par rapport à une érosion rapide (Roose, 1977a; Bhati, 1977; Lal, 1980; Stocking, 1986). Cela peut s'expliquer, d'abord, par le fait que les quelques millimètres supérieurs du sol sont plus riches en matière organique et en éléments nutritifs que les 15 ou 20 cm normalement prélevés pour l'analyse, et en second lieu par le fait que l'érosion enlève sélectivement les matériaux riches en éléments nutritifs; l'importance relative de ces facteurs n'est pas connue.

En dépit du manque de données quantitatives provenant d'études sur les sols tropicaux, on sait actuellement que:

- les sols tropicaux ont tendance à connaître des taux de réduction du rendement des cultures plusieurs fois supérieurs à ceux des sols de régions tempérées ayant subi un volume équivalent de perte;
- dans les régions tropicales comme dans la zone tempérée, la diminution du rendement est plus rapide au début, c'est-à-dire pour les premiers 10 à 20 cm de sol perdus; ensuite le taux de réduction du rendement décroît exponentiellement. Sur les lixivsols ferriques, les dix premiers mm (environ 140 t/ha) d'érosion provoqueront une diminution du rendement de l'ordre de 75%; ensuite la baisse ralentit;
- la diminution du rendement est très forte sur les sols "anciens", c'est-à-dire les sols tropicaux très dégradés dans lesquels il y a une concentration élevée de matière organique dans la couche arable. Autrement dit, la perte relative de rendement est plus grande pour les sols dont la fertilité est initialement plus faible.

Ces constatations sont toutes explicables si l'on suppose que le principal effet de l'érosion sur le rendement agricole passe par la perte de la matière organique et des éléments nutritifs associés, conjuguée à l'effet d'enrichissement en éléments nutritifs. Par rapport aux sols de zone tempérée, les sols tropicaux ont une concentration relativement plus élevée en éléments nutritifs dans la couche arable et cette priorité est plus marquée pour les sols très dégradés peu fertiles par nature. Une fois que la couche arable relativement riche en éléments nutritifs est enlevée, l'érosion ultérieure d'un même volume enlève moins d'éléments nutritifs.

Un calcul schématique illustre les ordres de grandeur impliqués. Prenons l'exemple d'un type de sol très répandu de faible fertilité intrinsèque, un sol de plateaux de *sandveld* (p. 17). Avec la végétation naturelle, il est susceptible de contenir environ 0,1% d'azote dans les 15 cm supérieurs. Supposons une densité apparente de 1, une érosion de 10 t/ha/an et un facteur d'enrichissement en azote dans les sédiments érodés de 4. Il y aura une perte de 40 kg N/ha/an, qui équivaut à l'enlèvement de deux sacs d'engrais par hectare!

Cet effet a été confirmé expérimentalement au Zimbabwe, où l'on a étudié pendant cinq ans les pertes nutritives dues à l'eau de ruissellement et à l'érosion des sédiments. Les régressions entre la perte de sol et les pertes en éléments nutritifs ont montré qu'une érosion de 30 t/ha/an cause une perte d'environ 50 kg d'azote et 5 kg de phosphore par hectare, ce qui dépasse de beaucoup les quantités d'engrais qui sont en fait appliquées. Le coût financier du remplacement des éléments nutritifs érodés varie de 20 à 50 dollars US par hectare sur les terres arables, et de 10 à 80 dollars US par hectare sur les pâturages (Stocking, 1986, 1988b).

L'absence apparente de déclin de rendement dans les pays occidentaux supposés avoir souffert de l'érosion peut être due au fait que l'addition d'engrais peut en masquer les effets. Le même phénomène apparaît dans les régions tropicales; la réduction relative de rendement est plus grande sur les parcelles non fertilisées que sur un même sol recevant des engrais (Yost *et al.*, 1985). La "solution" consistant à contrecarrer les effets de l'érosion par l'addition d'engrais n'est évidemment pas à la portée de la plupart des agriculteurs dans les pays moins développés.

Les conditions physiques du sol, ensemble complexe de propriétés interactives concernant la structure, la stabilité des agrégats, la porosité, la densité apparente, la capacité d'infiltration et la teneur en eau utile, ont également une influence importante sur les rendements des cultures. Ces propriétés sont déterminées en partie par les conditions de base de la texture et des minéraux ferreux présents, mais elles sont aussi influencées fortement par la teneur du sol en matière organique. La réduction de la matière organique conduit normalement à une perte de porosité, à une baisse de stabilité des agrégats, à une augmentation de la densité apparente et à une diminution de la capacité d'infiltration. Ces effets entraînent à leur tour une importante diminution du rendement des cultures (cf. articles dans Lal et Greenland, 1979).

La concentration en matière organique dans la couche arable, conjuguée avec le taux d'enrichissement en carbone dans les sédiments érodés, signifie que l'érosion peut diminuer substantiellement la teneur en matière organique du sol. Prenons par exemple un sol ayant une teneur de 2% en carbone dans 15 cm de couche arable: une érosion de 50 t/ha/an avec un facteur d'enrichissement en carbone de 2 causera une perte annuelle de 2 000 kg de carbone par an. Au bout de cinq ans, une telle érosion réduirait le carbone de la couche arable d'un tiers de sa valeur initiale, conduisant ainsi à une importante dégradation des propriétés physiques.

Ces faits sont par ailleurs prouvés par une étude réalisée sur deux parcelles d'essai aux Philippines, pour laquelle on avait demandé aux agriculteurs d'évaluer eux-mêmes le problème de l'érosion sur leurs terres en le qualifiant de "très grave", "moins grave" ou "inexistant" (érosion nulle). La comparaison établie avec les rendements des cultures (tableau 8) a montré que dans tous les cas, les récoltes de riz et de maïs déclarées par les fermiers étaient moindres avec une érosion très grave qu'avec une érosion moins grave, de 45 à 48% plus faibles pour les plus grandes parcelles.

La troisième cause de réduction des rendements n'est pas l'érosion elle-même, mais l'augmentation du ruissellement et la réduction de l'infiltration qui s'y associent. Dans les régions humides, cela importe peu, puisqu'au moment où se produisent la plupart des précipitations, le sol est saturé. Dans la savane sèche et les régions semi-arides cependant, le besoin contrignant d'humidité constitue souvent un facteur limitant pour le rendement des cultures. L'infiltration accrue qui résulte des mesures de conservation peut augmenter substantiellement les périodes pendant lesquelles le profil du sol atteint sa capacité de saturation ou presque, réduisant ainsi le stress causé par le manque d'humidité.

A plus long terme, la réduction de la profondeur du sol conduit à un abaissement de la teneur en eau utile. Cela entraîne non seulement une réduction des rendements moyens des cultures, mais aussi une augmentation du risque d'avortement des cultures provoqué par la sécheresse. Dans une analyse (Biot, 1986), ceci a été traité comme le principal effet néfaste de l'érosion.

L'érosion peut affecter défavorablement la croissance et le fonctionnement des ligneux eux-mêmes dans les systèmes agroforestiers. A Hawaii, une "érosion simulée" (enlèvement de 7,5 à 37,5 cm de la couche arable) a réduit dans une large mesure la nodulation, l'activité de la nitrogénase, l'absorption d'éléments nutritifs et la croissance de *Sesbania grandiflora* (Habte et El-Swaify, 1986).

Deux conclusions se dégagent, la première relative à la conservation des sols en général, la seconde se rapportant plus spécifiquement à l'agroforesterie. En premier lieu, des travaux récents sur les relations entre l'érosion et la productivité ont confirmé et renforcé l'idée selon laquelle la perte de production consécutive à l'abaissement des rendements causé par l'érosion est importante. Etant donné que la pression démographique sur la terre a conduit à la mise en culture plus ou moins continue de vastes régions, l'érosion est susceptible d'être l'une des causes des faibles rendements que produisent habituellement ces terres.

En second lieu, les principales causes de la diminution des rendements par l'érosion, à court et à moyen termes, sont la diminution de la fertilité par perte de matière organique et des éléments nutritifs associés, ainsi que les effets de la perte de matière organique sur les propriétés physiques du sol. Dans les régions arides, la perte d'humidité du sol par ruissellement est un important facteur supplémentaire. Il s'ensuit que le problème du contrôle de l'érosion, au sens de contrôle de la masse de sol enlevée, est étroitement lié au problème du maintien de la fertilité. C'est là un thème central du présent rapport. En particulier, les pratiques agroforestières dans lesquelles le contrôle de l'érosion est combiné avec l'amélioration de la fertilité pourraient être particulièrement précieuses, et la possibilité de combiner ces fonctions devrait constituer un objectif pour la conception de systèmes agroforestiers.

Analyse économique de la conservation des sols

Etant donné la compétition acharnée pour l'utilisation des capitaux à investir, que ceux-ci proviennent d'une aide extérieure ou du budget interne de l'Etat, il est difficile de mettre en application des mesures de conservation des sols à moins qu'elles ne se justifient en termes économiques. Une autre justification peut être de déclarer que la conservation des ressources naturelles est souhaitable soit en tant que telle, soit à l'intention des générations futures; si valable que soit ce point de vue, il est probable qu'il pèsera moins lourd dans la prise de décisions sur l'allocation des fonds de développement.

L'analyse des coûts et bénéfices de la conservation des sols, qu'elle soit de nature privée (agriculteurs) ou sociale (communautés), revient essentiellement à comparer le revenu net escompté selon que l'on prend ou non des mesures de conservation. Tant les coûts que les revenus en sont affectés. Dans un projet de conservation des sols de type conventionnel, comportant diguettes et canaux de construction mécanique, le coût d'investissement initial sera élevé et les coûts annuels d'entretien limités (nuls s'ils sont supposés être faits par la main-d'œuvre agricole pendant les périodes creuses).

Tableau 8 - Rendements des cultures selon la gravité de l'érosion, d'après le jugement des fermiers aux Philippines (Librero, 1985).

	Récoltes (kg/ha)		
	Erosion très grave	Erosion moins grave	Erosion nulle
Riz brut	484	715	659
Mais égrené	196	284	103 ^a
Bananes	544	1204	912
Manioc	176 ^b	2387	4140
Noix de coco (noix/ha)	270 ^b	3858	4567
Caféier	81 ^b	82	51 ^b

^a Expliqué par la faible densité de plantation.

^b Basé sur un échantillon de moins de 5 exploitations.

Ceci doit être considéré en regard de la différence de bénéfices, représentés par les prix payés pour les récoltes à la sortie de l'exploitation; l'hypothèse plus simple est celle d'une récolte constante avec conservation du sol, à comparer avec une récolte décroissante, sans conservation. Il est essentiel de spécifier les rendements attendus pour le nombre d'années pris comme base pour l'analyse économique.

Avec l'ancienne méthode d'approche des relations érosion-culture basée sur la profondeur du sol, il était rarement possible de démontrer l'existence de rapports bénéfices-coûts ou des taux de revenu interne acceptables, c'est-à-dire des valeurs comparables aux revenus de l'investissement dans d'autres formes de développement. Ceci reste vrai même à de faibles taux d'escompte. La baisse des rendements en fonction de la profondeur du sol est trop lente, ou trop éloignée dans le futur, pour avoir un effet appréciable sur les bénéfices escomptés. Le cas échéant, il y avait deux moyens d'essayer de justifier la conservation: en la traitant comme un cas spécial sur le plan économique, en prenant une longue durée pour le projet (par exemple 100 ans ou plus), et un taux d'escompte égal à zéro, ou en considérant la conservation comme une condition indispensable aux autres améliorations agricoles plutôt que de l'analyser séparément.

La situation a changé lorsqu'on a reconnu les réductions importantes de rendement des cultures entraînées par les pertes d'éléments nutritifs dues à l'érosion. Il est devenu possible de justifier les projets de conservation en termes économiques conventionnels (par exemple, Dumsday et Flinn, 1977; Wiggins, 1981; Bojó, 1986). Ce n'est plus la perte de production qui s'ensuit lorsque la profondeur du sol est réduite en dessous d'un niveau minimum qui est importante, mais le déclin rapide des rendements dans les premières années d'érosion non contrôlée.

Une approche plus directe consiste à estimer les pertes d'éléments nutritifs par érosion et à calculer le coût du remplacement de ceux-ci sous la forme d'engrais. Pour les terres arables du Zimbabwe, et en considérant seulement les pertes en azote et en phosphore, le coût a été estimé à 150 millions de dollars US pour un an (1984-85), ce qui correspond au triple de la somme réellement dépensée en engrains (Stocking, 1986, 1988b).

Même s'il y a une justification en termes de pertes de rendement et de coût de remplacement par des engrains, il reste des problèmes dans la mise en application de la conservation par des ouvrages physiques. S'ils sont construits au moyen d'engins mécaniques, le seul coût de ceux-ci exige un capital élevé. La construction manuelle est possible, mais les agriculteurs l'acceptent rarement parce qu'ils ne perçoivent pas le bénéfice du travail exigé.

Le fait que les coûts de la conservation du sol augmentent dans 1 ordre prévention < contrôle < réhabilitation constitue un autre aspect significatif de l'analyse économique. Le moins coûteux consiste à prévenir l'érosion naissant sur une terre en bon état initialement; contrôler et réduire l'érosion déjà en cours exige davantage d'intrants et d'investissement; le plus coûteux est de récupérer et de régénérer des terres sévèrement dégradées.

Toutefois, sur des terres déjà dégradées, il est parfois possible de justifier la foresterie de réhabilitation en termes économiques en la combinant avec la production. Après une période initiale d'amélioration du sol sous la forêt, le couvert ligneux peut être éclairci et l'herbe sous les arbres, être coupée et vendue comme fourrage; des rapports bénéfices/coûts avantageux ont été obtenus avec ce genre de pratique en Inde (Mathur et al., 1979).

Les conclusions de l'analyse économique sur la conservation qui intéressent particulièrement l'agroforesterie sont les suivantes:

- le coût initial de l'installation d'ouvrages anti-érosion basés sur l'agroforesterie, en termes de capital comme en termes de main-d'œuvre, est souvent inférieur à celui de la construction de terrasses ou de diguettes. Les coûts d'infrastructure de l'agroforesterie, notamment les pépinières, sont modestes;
- en plus du bénéfice tiré du maintien des rendements des cultures grâce au contrôle de la perte de sol, certaines pratiques agroforestières peuvent conduire à une augmentation des rendements au-dessus des niveaux actuels. A ceci s'ajoutent les bénéfices tirés des produits des ligneux. Ces effets - isolément ou conjointement - peuvent amener une augmentation non seulement des bénéfices réels, mais aussi de ceux perçus par le fermier;
- sur les terres déjà dégradées, le coût de la remise en valeur peut être réduit si des arbres améliorant le sol sont combinés avec une production contrôlée.

Conservation et politique de vulgarisation

Il y a eu un changement de politique dans la manière d'appliquer la conservation du sol sur le terrain: l'ancienne méthode coercitive a fait place à une méthode de persuasion et de coopération.

L'ancienne méthode était basée sur l'établissement de lois ou de règlements déterminant l'utilisation des terres, et sur leur mise en vigueur. Ces "règles agricoles", comme on les a appelées, incluaient généralement:

- l'interdiction de cultiver les pentes dépassant un certain degré;
- l'interdiction de cultiver à moins d'une distance déterminée d'un cours d'eau;
- l'obligation de construire des diguettes ou autres ouvrages de conservation avant que ne soit octroyée l'autorisation de cultiver la terre.

Le respect des règles était généralement assuré par un avertissement ou une menace, appuyés dans les cas extrêmes par des actions en justice.

Dans les régions tropicales, cette méthode était essentiellement appliquée dans le contexte d'un gouvernement colonial, et dans des conditions de pression relativement faible sur les terres. Bien que souvent tournée en dérision à l'heure actuelle, elle a largement réussi, en son temps, à contrôler l'érosion; on en a un exemple avec le Zimbabwe (ancienne Rhodésie du Sud) où de vastes régions sont équipées de systèmes bien conçus et bien entretenus de fossés d'assainissement, de diguettes et de canaux.

Cette méthode consistant à appliquer la conservation par des moyens prohibitifs ou coercitifs n'est plus efficace. Il y a toujours eu des difficultés, particulièrement du fait que le personnel de vulgarisation agricole, dont le travail consistait à aider l'agriculteur, ne souhaitait pas être associé à sa mise en vigueur. En Afrique, cette politique était associée au gouvernement colonial; elle est donc devenue anathème pour les nouveaux gouvernements indépendants. Un grand nombre de règlements figurent encore dans les livres de lois, mais ne sont plus appliqués.

La politique actuelle consiste à appliquer des mesures de conservation des sols en persuadant les agriculteurs qu'il y va de leur intérêt et en s'assurant leur coopération. Il ne s'agit pas simplement d'un état d'esprit: c'est en fait une approche plus efficace. Sans le soutien de la communauté agricole, une pratique d'utilisation des terres ne sera jamais appliquée. Si quelques individus agissent à l'encontre des intérêts de la communauté, des mesures de contraintes doivent être prises au sein même de cette communauté (Christy, 1971; Young, 1977; Biaikie, 1985; Wilkinson, 1985; Roose, sous presse; Shaxson, 1988; Shaxson *et al.*, 1989; Hudson, 1988b).

Une autre tendance de la politique consiste à ne pas traiter la conservation du sol isolément, mais plutôt à l'intégrer dans les systèmes d'exploitation globaux. Cela traduit la tendance croissante à approcher le développement sous l'angle de systèmes agraires. Ce type de systèmes agricoles améliorés a été appelé "agriculture conservatoire" ou "utilisation intégrée des terres".

Ces points sont résumés dans une étude sur les stratégies de conservation du sol par les concepts suivants (Stocking, 1985b):

- approche de la conservation non plus comme une mesure isolée; elle doit faire partie de méthodes intégrées d'amélioration de l'utilisation des terres;
- utilisation de méthodes simples, que les agriculteurs sont capables de mettre en oeuvre et d'entretenir;
- apport d'un soutien extérieur aux pratiques traditionnelles saines;
- formation de services locaux de vulgarisation; c'est un point vital qui a besoin d'être grandement amélioré dans beaucoup de pays;
- "la conservation exige que les agriculteurs respectent et soutiennent les mesures, lesquelles doivent être évaluées quant à leur impact global sur l'agriculture et sur les moyens d'existence des populations".

Ces tendances sont tout à fait compatibles tant avec la nature de l'agroforesterie qu'avec sa mise en oeuvre grâce à la méthode D & D (diagnosis and design). La conception agroforestière a pour objectif fondamental de combiner productivité et durabilité; un bénéfice immédiat réel peut ainsi être perçu en même temps que la conservation est assurée. Beaucoup de pratiques agroforestières sont relativement simples à mettre en application, et dans presque tous les cas elles sont mises en pratique par les agriculteurs eux-mêmes, soit en tant que pratiques indigènes, soit en étant adoptées comme innovations.

L'approche D et D comporte en elle-même l'élément d'acceptation et de coopération de la part du fermier. Les agriculteurs sont consultés au stade du diagnostic sur les problèmes qu'ils constatent au sein du système; parmi ceux-ci figurent souvent le faible rendement des cultures, que l'érosion soit ou non perçue comme en étant l'une des causes.

Les contraintes locales liées par exemple à la main-d'oeuvre, au manque d'argent ou de ressources, sont définies et prises en compte dans l'élaboration de systèmes améliorés. Toute proposition est soumise à l'avis des agriculteurs; on peut souvent découvrir alors que ce que le scientifique considère comme des "améliorations" est considéré tout autrement par les indigènes! La caractéristique essentielle est que l'ancienne séquence dans laquelle la conception technique précédait l'acceptation par les fermiers a été remplacée, dans la procédure D et D, par une séquence dans laquelle l'acceptabilité fait partie intégrante du système dès le commencement. Puisque cette méthode est appliquée au système agroforestier tout entier, elle s'applique nécessairement à tout élément de conservation du sol que le système peut inclure.

Le système d'"agriculture conservatoire" au Sri Lanka comporte trois éléments d'agroforesterie (cultures entre haies, arbres pour le bois de feu et ligneux fourragers), des mesures de lutte antiparasitaire et phytosanitaire (en partie par la litière des ligneux), le paillage et le labour minimum. "L'utilisation intégrée des terres" appliquée au Malawi se caractérise principalement par la plantation d'arbres sur des bandes enherbées en courbes de niveau et de bourrelets de démarcation (Weerakoon, 1983; Commonwealth Secretariat, 1983; Wijewardene et Waidyanatha, 1984; Douglas, 1988).

L'expérience du Projet des Visayas centrales aux Philippines illustre en même temps la méthode d'approche de la conservation par la coopération active des fermiers, et l'utilisation de l'agroforesterie comme technique de conservation. Le projet a réussi à amener les agriculteurs à adopter des mesures de conservation, succès attribué aux facteurs suivants (Queblatin, 1985):

- les agriculteurs sont impliqués dans la définition de leurs propres problèmes et dans l'identification de solutions; ils sont amenés à percevoir leur propre intérêt à la conservation;
- les solutions adoptées, telles que des barrières de haies de *Leucaena* sont simples et peuvent aisément être mises en oeuvre par les agriculteurs eux-mêmes; on utilise les ressources locales, par exemple les ligneux indigènes dans les

régions à sol acide où le *Leucaena* ne pousse pas bien;

- la conservation du sol est liée à d'autres préoccupations agricoles: par exemple l'association de l'herbe à éléphant, *Pennisetum purpureum* avec *Leucaena* en haies vives là où cela présente un intérêt pour les fermiers élevant du bétail.

Comme l'agroforesterie combine le contrôle de l'érosion avec le maintien de la fertilité du sol et de la production, les agriculteurs l'acceptent plus facilement que les systèmes de contrôle de l'érosion par des structures en terre. En outre, ses techniques sont relativement peu coûteuses et leur application reste à la portée des petits agriculteurs. Ces aspects de l'agroforesterie la rendent tout à fait appropriée si l'on considère les tendances récentes dans la politique de conservation.

Chapitre 5: Données expérimentales

Les témoignages sur le rôle et le potentiel de l'agroforesterie pour le contrôle de l'érosion sont de deux sortes. Il y a d'abord des études expérimentales basées sur les systèmes d'utilisation des terres incluant un couvert d'arbres, d'où l'on peut tirer des conclusions sur les effets probables des arbres sur les causes de l'érosion. Il y a ensuite les mesures des taux d'érosion en systèmes agroforestiers, en situation réelle ou dans des stations expérimentales; ces mesures sont peu nombreuses actuellement. Ce chapitre s'inspire d'une excellente étude de Wiersum (1984) qui contient des références supplémentaires.

Effets d'une couverture ligneuse sur les facteurs de l'érosion

Erosivité des précipitations

Un couvert élevé ne réduit guère l'énergie des gouttes de pluie. Quiconque a marché en forêt tropicale humide pendant un orage s'en sera rendu compte. Les gouttes de pluie atteignent plus de 95% de leur vitesse terminale en 8 m de chute libre, et elles peuvent augmenter de taille après s'être accumulées sur la surface des feuilles et être tombées de l'extrémité de celles-ci. Des érosivités élevées ont été relevées sous plantations forestières. Une érosion grave s'est parfois produite dans les plantations de teck, où la voûte est haute et où les feuilles tombent pendant une partie de l'année. Lors d'une étude expérimentale basée sur l'enlèvement artificiel de la cime feuillue d'une plantation de *Racosperma auriculiformis* (= *Acacia auriculiformis*) à Java, on a découvert que la présence de la cime *augmentait* la puissance érosive de 24% (Wiersum, 1985).

Dans une plantation de palmiers à huile adultes, en dépit d'une voûte fermée, les grosses gouttes tombant du bout des frondes ont une forte énergie cinétique qui entraîne une érosion importante (Lim, 1988). Dans un jardin de case et une plantation de bambous à Java, l'érosivité de la pluie au-dessus de la couche herbacée et de la couche de litière atteignait 127 à 135% de celle de la pluie incidente, à cause des grosses gouttes tombant de la pointe des feuilles (Soemwarto, 1987).

Une voûte dense de petits arbres et arbrisseaux, comme dans les plantations de cafiers ou de théiers, réduit l'érosivité, tandis que les arbres d'ombrage dans les plantations l'augmentent (Wiersum, 1984). Par conséquent, dans les systèmes agroforestiers spatiaux mixtes, l'effet sur l'érosivité dépendra de la hauteur du couvert. Dans les systèmes de zones spatiales, y compris la culture intercalaire avec haies vives, la voûte est généralement basse, mais ne se situe pas verticalement au-dessus de la terre mise en culture. Il ne faut dès lors pas s'attendre à une réduction notable de l'érosivité des précipitations. Pour le seul contrôle de l'érosion, il est inutile d'essayer de maximiser le couvert de la voûte lors de la conception d'un système agroforestier.

Erodibilité du sol

On constate fréquemment que la structure du sol est de meilleure qualité, d'une stabilité supérieure, d'une moindre amovibilité et d'une capacité d'infiltration plus élevée sous la forêt, par rapport à un sol mis en culture. En système de culture itinérante, la matière organique diminue et l'érabililité augmente pendant la période de culture. En système taungya, la teneur en matière organique et la capacité d'infiltration diminuent et l'érosion est plus forte pendant la période de culture, par comparaison avec une plantation forestière sans taungya. Une érodibilité plus élevée a été observée dans un jardin de case en Tanzanie et dans un jardin à plusieurs étages de ligneux à Java, par comparaison avec la forêt naturelle dans les mêmes régions (Lundgren, 1980; Wiersum, 1984).

La situation est différente lorsqu'on prend les sols cultivés comme point de comparaison. La plupart des systèmes agroforestiers sont capables de maintenir la matière organique du sol à des niveaux plus élevés que l'agriculture pure; or, la matière organique est la principale variable contrôlant la résistance à l'érosion.

Selon le nomogramme employé dans l'équation universelle de perte du sol, une augmentation de 1% de la matière organique de la couche arable diminue la valeur du facteur K de 0,04, voire 0,05 si l'on ajoute l'effet sur la perméabilité, calculé indépendamment. Ainsi, un système agroforestier qui maintient la teneur en matière organique à 1,5%, comparé à 1% avec la seule culture, pourrait abaisser le facteur K de, par exemple, 0,350 à 0,325, parvenant à une diminution de seulement 7% de l'érosion prédictive. L'influence probable de l'agroforesterie sur l'amélioration de la résistance du sol à l'érosion par le maintien de la teneur en matière organique va donc dans un sens favorable, mais elle est peu importante.

Réduction du ruissellement

Les ouvrages en terre, tels que les fossés d'évacuation et les diverses structures de fossés et diguettes, contrôlent totalement le ruissellement à moins d'être débordés et rompus; l'eau de ruissellement s'infiltra ou est canalisée vers les voies d'eau. En revanche, les barrages biologiques, y compris les bandes enherbées et les haies vives, sont partiellement perméables.

L'expérience, bien que très limitée, suggère que les barrages de haies réduisent en fait de beaucoup le ruissellement (voir ci-dessous). Il est nécessaire d'étudier l'efficacité relative des barrages de différentes largeurs sur des orages d'intensités diverses. Deux aspects accessoires de l'utilisation de haies vives sont favorables. D'abord, l'eau n'est pas canalisée hors de la parcelle, ce qui est un avantage dans les régions sèches. Ensuite, la perméabilité offre une soupape de sécurité automatique en cas de pluies d'orages très violentes qui détruisent les barrages en terre mais peuvent s'écouler sans dommage au travers des haies.

Protection par couverture de la surface du sol

Nous avons souligné plus haut l'importance d'une couverture de la surface du sol constituée par de la végétation vivante ou du paillis. Le facteur C, ou facteur de couverture, peut aller de 0,5 sur des terres cultivées avec sol nu entre les plants, jusqu'à 0,1 ou 0,01, voire moins encore là où une couverture est maintenue pendant la période des pluies érosives. Dans l'expérience classique sur une plantation de *Racosperma mangium* (= *Acacia mangium*) à Java, l'enlèvement artificiel de la

litière de surface a augmenté l'érosion environ 20 fois (Wiersum, 1984).

Ceci suggère que, lorsqu'on vise à contrôler l'érosion, il est très souhaitable de répartir la litière des arbres ou les résidus d'élagage sur toute la surface du sol. Dans les formes spatiales mixtes d'agroforesterie, cette répartition est plus ou moins automatique. Dans les systèmes zonaux tels que la culture intercalaire avec haies, il faut choisir entre la méthode consistant à entasser la litière en amont des haies et celle consistant à la répartir dans les allées. Tout porte à penser que les produits d'élagage et les résidus des cultures devraient être répartis sur la surface du sol, sans être entassés en ligne ni incorporés au sol.

Cela implique également qu'il est préférable d'utiliser des espèces ligneuses dont la litière de feuilles se décompose à vitesse modérée ou faible. Il peut y avoir conflit avec les exigences concernant le rythme de libération des éléments nutritifs, pour lequel une décomposition rapide est souvent préférable. Ce dilemme peut être résolu par l'utilisation de haies à deux espèces, l'une produisant des feuilles à décomposition rapide et l'autre des feuilles à décomposition plus lente.

Résumé

En ce qui concerne la conception de pratiques agroforestières visant le contrôle de l'érosion, les preuves indirectes et les données expérimentales très limitées apportent les indications suivantes:

- la voûte des arbres a peu de chances de réduire l'érosion; au contraire, elle peut l'augmenter;
- de nombreux systèmes agroforestiers, en maintenant ou en améliorant la teneur du sol en matière organique, aideront à contrôler l'érosion, mais ne pourront la réduire fortement lorsque les conditions du climat, de la pente et de la couverture du sol sont défavorables;
- les barrages de haies réduisent fortement le ruissellement et augmentent l'infiltration, tandis que leur perméabilité empêche leur destruction lors d'orages occasionnellement très violents;
- le maintien d'une couverture du sol d'au moins 60%, combinant toutes plantes herbacées vivantes avec de la litière végétale, a de grandes chances de réduire l'érosion et devrait être l'objectif principal des projets agroforestiers.

Données expérimentales pour l'agroforesterie

Il est évidemment souhaitable que les affirmations concernant l'efficacité de l'agroforesterie dans la lutte contre l'érosion reposent sur des mesures expérimentales des taux d'érosion sous des systèmes agroforestiers existants. Ces mesures devraient inclure aussi bien des données provenant de stations expérimentales dans des conditions contrôlées et reproduites, que des mesures prises en milieu réel. Les résultats d'un tel travail renforceront, et remplaceront en partie, les déductions sur lesquelles la présente étude s'est basée.

Un grand nombre de données de ce genre seront bientôt disponibles. Des parcelles d'érosion basées, en tout ou en partie, sur des traitements agroforestiers sont en cours d'installation dans de nombreuses parties du monde. Si l'on considère que l'établissement des ligneux prend deux ans, que le rodage de la parcelle peut prendre un an et que trois années sont nécessaires pour obtenir des données modérément fiables, plus un an pour leur publication, nous pouvons espérer disposer d'un certain nombre de résultats utilisables d'ici à 1997.

Données disponibles

Le tableau 9 (établi partiellement à partir de sources non publiées ou inaccessibles) résume les taux d'érosion dans la forêt tropicale, les plantations ligneuses et quelques systèmes agroforestiers. Si l'on classe les taux y figurant comme: bas = 2 t/ha/an, modéré = 2-10 t/ha/an, et élevé = > 10 t/ha. an, les résultats peuvent être résumés comme suit:

Bas	Forêt tropicale humide naturelle
	Jachère forestière en culture itinérante
	Jardins ligneux multiétages
	La plupart des plantations forestières intactes
	Plantations ligneuses avec culture de couverture et/ou paillis
Modérés ou élevés	Période de culture dans la culture itinérante
	Période de culture dans la pratique taungya
Elevés	Plantations ligneuses sarclées
	Plantations forestières, litière enlevée ou brûlée

On note de façon caractéristique dans les systèmes à haut risque d'érosion un large éventail de valeurs, ce qui souligne l'importance de l'aménagement plutôt que la nature intrinsèque des pratiques. Sont notables également les taux élevés pour les deux derniers systèmes, dans lesquels il n'y a aucune couverture à la surface du sol.

Pour la culture intercalaire avec haies vives, l'érosion a été mesurée à Ibadan, au Nigeria, sur une pente de 7% (4°) (climat subhumide à tendance humide et lixivisol). Des haies de *Leucaena* et de *Gliricidia sepium* espacées de 2 à 4 m ont été comparées sans travail du sol et avec labour classique sans haies. Les taux moyens de perte de sol en deux ans, en t/ha/an, étaient de 8,75 avec labour, 0,95 avec culture intercalaire entre haies (moyenne de deux espèces de haies, deux

espacements) et de 0,02 sans travail du sol (Figure 1). La réduction du ruissellement et des pertes d'éléments nutritifs suivait le même schéma. Ainsi, bien que la culture intercalaire entre haies n'ait pas été aussi efficace que l'absence de travail du sol, elle a abaissé les pertes de sol et d'éléments nutritifs ainsi que le ruissellement bien au-dessous des limites acceptables. Ces données concernent une pente relativement douce (Lal, 1988).

Sur des pentes raides en Colombie (climat humide, pluviosité de 4 000 mm, un an d'observation), les pertes de sol de l'ordre de 23 à 38 t/ha/an avec la culture du maïs ont été réduites à 13 t/ha/an (sur des pentes de 45 et 75%) par des haies vives de *Gliricidia sepium* (van Eijk-Bos et al., 1986).

Une étude sur une pente de 22° à Jalisco, au Mexique (climat subhumide sec), démontre clairement la plus grande efficacité de la couverture du sol comparée aux barrières contre le ruissellement. Sur sept parcelles traitées, celle de maïs avec paillis de surface, composé de litière provenant de la forêt adjacente, a montré la réduction d'érosion la plus sensible, à 5,8 t/ha/an, soit moins de 10% de celle de maïs pur, et des réductions comparables des pertes de tous les principaux éléments nutritifs. Les bandes enherbées étaient beaucoup moins efficaces que le paillis de litière forestière pour contrôler l'érosion (Mass et al., 1988).

Pour les ligneux sur ouvrages de conservation, il existe des données sur une pente de 54% dans le nord de la Thaïlande (climat humide, pluviosité de 1 700 mm, observations sur une année). Quatre parcelles ont été établies, comportant des fossés de drainage le long desquels étaient plantés des arbres, des cafiers et de la citronnelle, et, entre ces fossés, des cultures de maïs, de riz et d'arachide. Les résultats ont été comparés avec une parcelle de culture traditionnelle de riz. La perte de sol en t/ha/an était égale à 52 pour la culture traditionnelle, comparé à 13 (riz), 8 (maïs) et 6 (arachide) sur les parcelles de conservation; la récolte de riz était légèrement plus élevée sur la dernière (Humi et Nuntapong, 1983).

L'érosion mesurée dans des jardins de case à Java (climat humide) a été notée comme "minimale". Cet effet était dû entièrement à la couche herbacée et à la couverture de litière, puisque la voûte des ligneux augmentait l'érosivité des pluies (Soemwarto, 1987).

Des données provenant des montagnes Usambara en Tanzanie (climat subhumide de montagne) ne se rapportent pas à l'agroforesterie en tant que telle, mais à un site agricole géré d'une manière inhabituelle (Lundgren, 1980). L'agriculteur avait pris toutes les mesures possibles pour entretenir une couverture du sol: les adventices étaient laissées sur place après sarclage, les résidus de maïs également et ce paillis n'était jamais brûlé. Le ruissellement s'en trouvait réduit à des valeurs négligeables, inférieures à celles de la forêt naturelle, et la perte de sol enregistrée n'était que de 0,01 t/ha/an sur les pentes de 10-15° et celles de 20-25°.

Tableau 9 - Taux d'érosion en forêt tropicale et dans les systèmes de cultures ligneuses (Wiersum, 1984)

Système d'utilisation des terres	Erosion (t/ha/an)		
	Minimum	Moyenne	Maximum
Jardin ligneux multiétage	0,01	0,06	0,14
Forêt tropicale humide naturelle	0,03	0,30	6,16
Culture itinérante, période de jachère	0,05	0,15	7,40
Plantations forestières, intactes	0,02	0,58	6,20
Cultures ligneuses avec culture de couverture, ou paillis	0,10	0,75	5,60
Culture itinérante, période de culture	0,40	2,78	70,05
Taungya, période de culture	0,63	5,23	17,37
Cultures ligneuses, sarclées	1,20	47,60	182,90
Plantations forestières, litière enlevée ou brûlée	5,92	53,40	104,80

Il n'existe pas de données sur l'érosion en jachère arborée améliorée. Cependant, on a de nombreuses preuves que, pendant la phase de mise en culture de l'agriculture itinérante, l'érosion augmente rapidement et il n'y a pas de raison de supposer que la situation pourrait être fondamentalement différente selon cette méthode.

Résumé

Les données expérimentales sur les taux d'érosion et la perte d'éléments nutritifs dans les systèmes agroforestiers, tant dans des conditions expérimentales que réelles, sont actuellement très insuffisantes. Néanmoins, aucun des résultats disponibles n'est contradictoire par rapport à l'hypothèse selon laquelle les systèmes agroforestiers bien aménagés spatialement, que ce soit en mélange ou par zones, sont capables de réduire l'érosion à des taux inférieurs aux niveaux considérés comme acceptables, sur le plan aussi bien de la rétention du sol que de la prévention d'une baisse de fertilité. Des résultats beaucoup plus nombreux sont attendus vers le milieu des années 90.

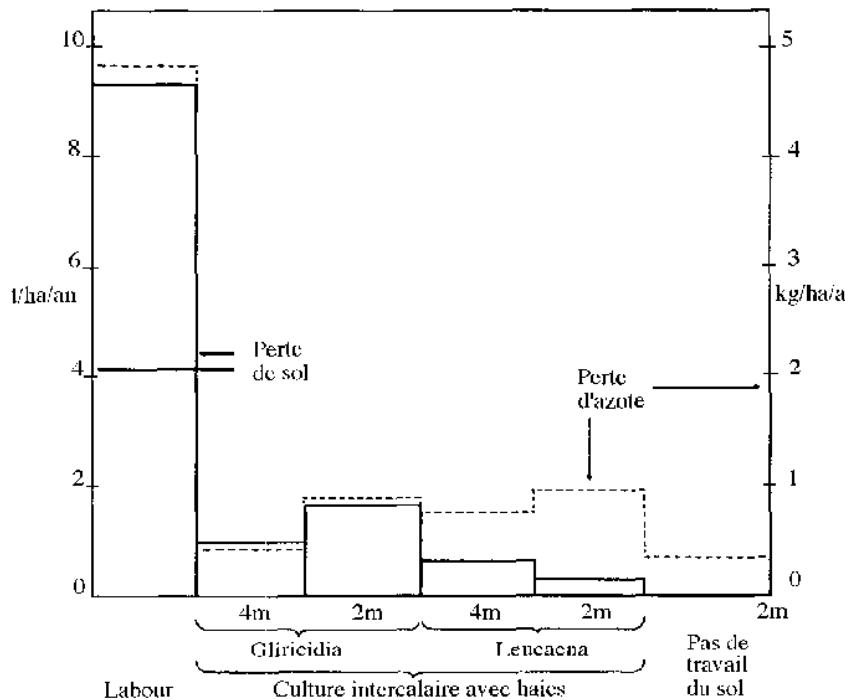


Figure 1 - Pertes de sol et d'azote par érosion sur deux ans pour une culture intercalaire avec haies, Ibadan, Nigeria (d'après Lal, 1988)

Chapitre 6: Pratiques agroforestières de lutte contre l'érosion

Le chapitre précédent a montré que les preuves expérimentales directes de l'efficacité de l'agroforesterie pour lutter contre l'érosion sont actuellement insuffisantes, même si leur nombre augmente. Cependant, beaucoup de pays ont commencé à adopter des pratiques agroforestières anti-érosives, à titre d'essai, de démonstration ou de vulgarisation. Dans certains cas, les essais ne sont pas fondés sur des données expérimentales contrôlées; dans d'autres cas, il peut exister des observations notées dans des stations locales mais non publiées. Dans bon nombre de démonstrations à petite échelle, il n'y a aucun enregistrement des taux d'érosion. Cependant, le succès apparent observé, ne fût-ce que d'un point de vue qualitatif, donne une idée de la variété des pratiques existantes.

Il convient de distinguer l'*utilisation supplémentaire* et l'utilisation directe des arbres et arbisseaux pour le contrôle de l'érosion. Dans le premier cas, les arbres et arbustes ne constituent pas le moyen primordial de lutte contre le ruissellement et l'érosion, mais servent à stabiliser les structures de conservation et à rendre ces dernières productives. Ceci s'applique principalement aux pratiques appelées ici "lignieux sur structures anti-érosives". Dans le cas de l'*utilisation directe*, les arbres et arbustes ou les haies vives constituent par eux-mêmes une méthode importante de lutte contre l'érosion. Ceci s'applique en particulier aux pratiques de cultures combinées, de jardins ligneux multiétages, de culture intercalaire avec haies vives, de brise-vent et de rideaux abris, de même qu'à la réhabilitation forestière à usages multiples.

L'encadré ci-dessous repose sur la classification des pratiques figurant au tableau 4 (p. 22). Les pratiques n'ayant que des effets légers sur le contrôle de l'érosion sont exclues: arbres sur terres cultivées et transfert de biomasse. Les figures 2 et 3 et les photographies 8 à 14 illustrent quelques exemples.

Pratiques de rotation

Culture itinérante

La vaste littérature sur l'agriculture itinérante contient de nombreuses mentions de la rapide augmentation des taux d'érosion après la première ou la deuxième année de mise en culture sur pentes fortes dans les régions tropicales humides (Kellman, 1969; Toky et Ramakrishnan, 1981). De même que pour le maintien de la fertilité du sol, les taux d'érosion ne sont acceptables dans ce système que lorsqu'une courte période de mise en culture est suivie d'une longue période de jachère forestière. Quand la pression démographique impose une extension relative de la culture aux dépens de la jachère, il en résulte généralement une grave dégradation du sol.

Les formes de culture itinérante rencontrées dans les savanes des régions tropicales subhumides sont pratiquées la plupart du temps sur des pentes douces. Bien qu'il y ait de graves problèmes de fertilité du sol, L'érosion n'est généralement pas observée ni mentionnée comme cause participante.

Jachère forestière améliorée

La jachère forestière améliorée est censée simuler les effets de la culture itinérante, mais elle comporte en plus des espèces plantées, sélectionnées pour leur capacité d'enrichissement du sol ou leurs produits utiles. On l'a observée à Cebu, aux Philippines, sur de fortes pentes (Eslava, 1984). L'interaction en question pourrait être la même que celle observée avec la culture itinérante: bon contrôle de l'érosion pendant la période de jachère, mais danger d'érosion importante associée à la perte de carbone et d'éléments nutritifs pendant la période de culture. Cette méthode serait plus acceptable avec des systèmes où un paillis est maintenu d'une quelconque manière pendant la période de culture.

Fonctions des arbres et arbustes dans le contrôle de l'érosion

Utilisation directe:

- pour augmenter la couverture du sol grâce à la litière et aux résidus d'élagage;
- pour la construction de barrages de haies partiellement perméables;
- pour conduire au développement progressif de terrasses, par accumulation de terre en amont des haies;
- pour augmenter la résistance du sol à l'érosion, en entretenant la matière organique.

Utilisation supplémentaire:

- pour stabiliser les structures en terre par les systèmes racinaires;
- pour tirer parti de la terre occupée par les ouvrages de conservation.

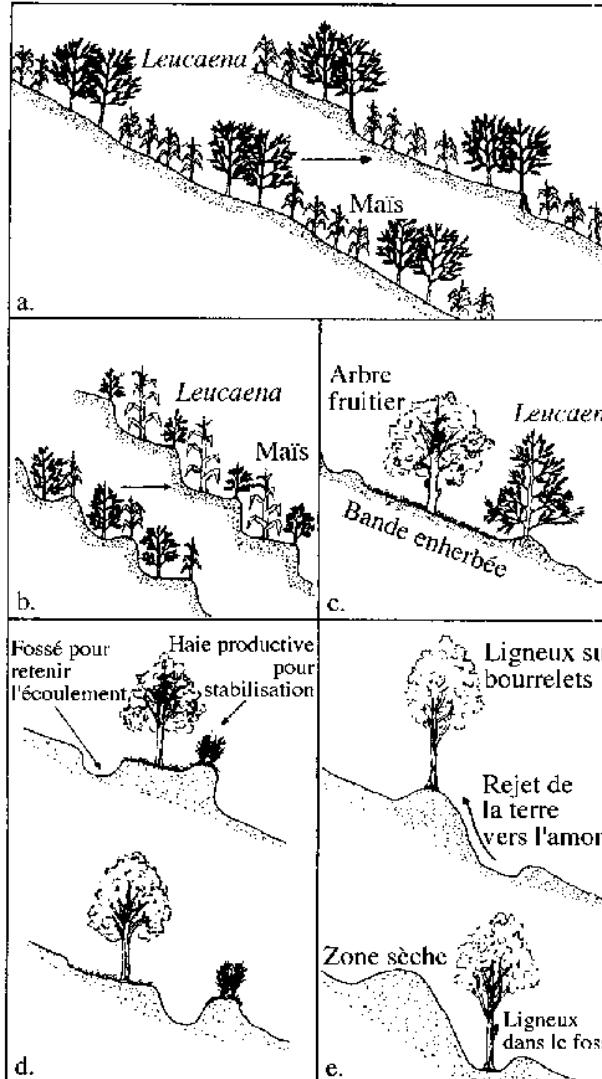


Figure 2 - Exemples d'agroforesterie pour le contrôle de l'érosion (I)

a. Haies en doubles rangs de Leucaena avec maïs, évoluant en terrasses naturelles Philippines (d'après Celestino 1985; Pacardo 1985).

b. Haies de Leucaena en sillons espacés de 90 cm entre rangées de maïs évoluant en terrasses au Malawi

c. Ligneux sur ouvrages de conservation au Malawi: arbres fruitiers sur bandes enherbées et Leucaena sur bourrelets (établis en courbes de niveau pour guider les bourrelets mis en culture plus bas).

d Autres dispositions de ligneux sur ouvrages de conservation au Cameroun (d'après Simon 1983).

e. Autres dispositions d'arbres sur ouvrages de type Fanya juu (littéralement: jeter (la terre) vers le haut) au Kenya. Ces structures ont des diguettes où le talus est au-dessus du fossé ce qui favorise la formation de terrasses naturelles (d'après Wenner 1980; et à la station de l'ICRAF à Machakos).

Taungya

Les quelques données disponibles sur les systèmes taungya suggèrent que l'érosion est effectivement plus importante pendant la période initiale de culture qu'elle ne le serait dans une plantation forestière pure. Cependant, ni la perte de fertilité ni les effets sur la croissance ultérieure des arbres ne se sont montrés sérieux.

Pratiques spatiales mixtes

Combinaisons de plantations et de cultures

De vastes territoires des régions tropicales humides sont caractérisés par des pentes modérées à fortes et les plantations, par exemple de théiers, de cafétiers, de cacaoyers, de palmiers à huile, d'hévéas et d'ananas y sont fréquentes. Il y a eu des cas d'érosion grave, notamment avec l'ananas en Malaisie et dans certaines plantations de théiers au Sri Lanka.

Une grande partie des systèmes agroforestiers combinent des cultures, leur point commun étant l'association de ligneux productifs avec d'autres plantes telles que de plus grands arbres qui les dominent (arbres d'ombragé au-dessus du théier, du cafétier ou du cacaoyer), une autre espèce ligneuse (par exemple, le cocotier avec le cacao, ou le cafétier avec le bananier) ou une culture herbacée. L'agencement des composantes peut être aléatoire, comme il est courant dans les systèmes indigènes, ou ordonné, comme dans les plantations

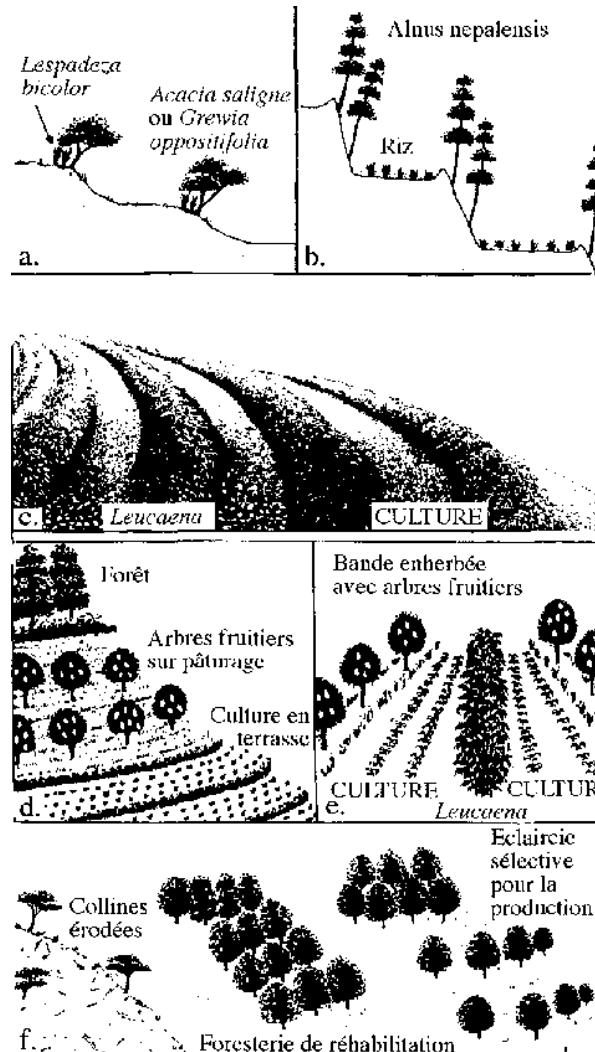


Figure 3 - Exemples d'agroforesterie pour le contrôle de l'érosion (2)

- a. Arbres sur contreforts de terrasses Ethiopie (d'après une recommandation pour essais dans von Carlowitz, 1986c)
- b. Arbres sur contreforts de terrasses irriguées Népal.
- c. Culture intercalaire avec haies de Leucaena établie sur une pente (d'après une photographie dans Kang et al., 1984)
- d. Modèle d'utilisation des terres alternatif à la culture itinérante région de collines du Nord-Est en Inde (d'après Borthakur et al., 1979).

e. Plan suggéré pour l'utilisation de terres en pentes combinant barrages de haies avec arbres sur bandes enherbées aux Philippines (d'après Celestino 1985)

f. Aménagement possible d'une forêt de réhabilitation en mode d'utilisation productif par éclaircie sélective en courbes de niveau (d'après Poulsen, 1984; Young 1985b)

Lorsque les arbres d'ombragé sont fortement espacés, comme c'est souvent le cas dans les plantations de théiers et dans certains systèmes à base de cafiers, leur effet est peu important et le contrôle de l'érosion dépend de la bonne gestion de la culture elle-même. Dans certains cas cependant, la strate supérieure et la strate inférieure peuvent être denses l'une et l'autre, comme dans les systèmes de cafier ou de cacaoyer avec *Cordia*, *Erythrina* ou *Inga* en Amérique latine, qui occupent souvent les terres en pente

Des études expérimentales de ces systèmes s'intéressent au cycle des éléments nutritifs, mais le fait qu'elles ne tentent pas nécessairement de mesurer l'érosion, et l'importance accordée au recyclage des éléments nutritifs indiquent clairement qu'il n'y a pas de problème d'érosion 11 est très probable que l'agent responsable soit non pas la voûte des arbres, mais la capacité de ces systèmes mixtes denses de maintenir une couverture de litière sur la surface du sol (cf. tableau 29, p 125, pour les références)

Même les couvertures denses formées par les cultures ligneuses ne sont pas efficaces pour contrôler l'érosion s'il n'y a pas de couverture du sol (Lim, 1988). La méthode de gestion consistant à garder le sol nu au moyen de désherbants chimiques pour faciliter l'entretien est vivement déconseillée du point de vue de la lutte contre l'érosion.

Jardins ligneux multiétages

Dans les jardins ligneux multiétages, on cultive une grande variété de plantes ligneuses et herbacées selon un schéma dense, à première vue désordonné, mais probablement géré de façon minutieuse. Les jardins de case, constitués de parcelles de moins d'un demi-hectare autour des fermes, sont les plus connus, par exemple au Sri Lanka, à Kerala (Inde), à Java et au Viêt-nam (Fernandes et Nair, 1986; Nair et Sreedharen, 1986; Mergen, 1987). On trouve également des parcelles plus grandes comportant des systèmes semblables à plusieurs strates, comme les jardins forestiers de Sumatra (Michon *et al.* 1986).



Photo 8 - Utilisation supplémentaire de ligneux dans le contrôle de l'érosion: des arbres fruitiers, ici des bananiers, sont installés sur des bandes enherbées. Maha Illuppallama, Sri Lanka.



Photo 9 - Utilisation supplémentaire de ligneux dans le contrôle de l'érosion: Grevillea robusta sur les talus d'une structure de talus et fossés Butaré Rwanda.

Vu l'abondante production de litière tout au long de l'année, le contrôle de l'érosion est inhérent à ces systèmes, ce que confirme encore le fait que ces systèmes entretiennent la fertilité. Les quelques mesures effectuées suggèrent l'existence d'une plus forte érosivité des pluies sous les arbres qu'à découvert, mais une réduction importante de l'érosion grâce à la couverture des plantes herbacées et de la litière (Soemwarto, 1987).

Pratiques zonales

Culture intercalaire avec haies et barrages de haies

La culture intercalaire avec haies (également appelée culture en couloirs) a de multiples objectifs, dont l'entretien de la fertilité du sol, et peut être pratiquée sur terrain plat ou en pente. L'élément ligneux consiste le plus souvent en une haie vive dense, mais parfois aussi en une seule ou plusieurs rangées d'arbres. La plus grande partie des travaux expérimentaux ont été effectués sur terrain plane, mais on peut adapter la pratique aux terres en pente en plantant les haies le long des courbes de niveau.

On appelle barrage de haies, les haies alignées en courbes de niveau, dans le but spécifique de lutter contre l'érosion sur les pentes. Elles sont aussi appelées diguettes biologiques.

Il n'y a pas de distinction nette entre les systèmes désignés par ces deux noms: la culture intercalaire avec haies pratiquée sur une pente est constituée de barrages de haies, et une série de barrages de haies ressemble au système de culture intercalaire avec haies vives. Les mêmes espèces ligneuses sont généralement utilisées et leur fonction de contrôle de l'érosion est identique dans les deux cas. Bien que certains puissent préférer employer le terme de barrages de haies pour les systèmes visant principalement à contrôler l'érosion, les deux termes sont considérés ici comme interchangeables.

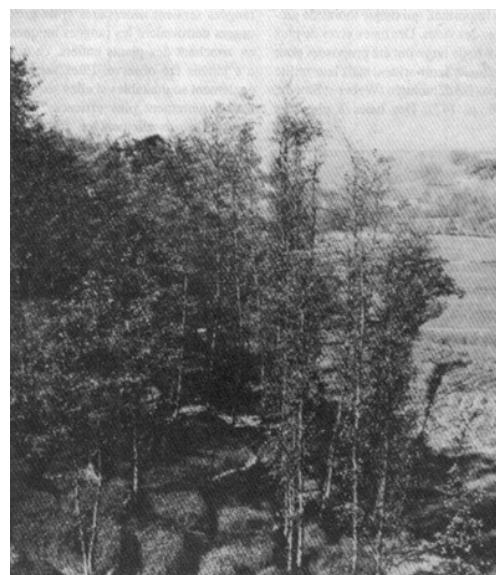


Photo 10 - Utilisation supplémentaire de ligneux dans le contrôle de l'érosion: Alnus nepalensis sur des ados de terrasses irriguées pour le riz; leur forme élancée et étroite est due aux émondages répétés. Kathmandu, Népal.

Fonctions. Dans les systèmes de culture intercalaire avec haies sur pente, les fonctions des haies dans la conservation du sol sont les suivantes:

- lutte contre la perte de sol par l'effet de couverture, par dépôt des résidus d'élagage à la surface du sol dans les couloirs cultivés;
- réduction du ruissellement, augmentation de l'infiltration et diminution de la perte de sol par l'effet de barrage;
- maintien ou amélioration de la fertilité du sol par la décomposition des résidus d'élagage et des racines;
- formation progressive de terrasses par l'accumulation de la terre en amont des haies et stabilisation des contremarches par les tiges et les racines.

Conception Les variables à prendre en compte dans la conception de tels systèmes sont les espèces ligneuses, L'espacement entre les plants à l'intérieur de la haie, la largeur des haies, L'espacement entre les haies (ou largeur des couloirs cultivés) et le traitement des résidus d'élagage Ces aspects doivent ensuite être conciliés avec des considérations liées aux objectifs autres que le contrôle de l'érosion: production (par exemple fourrage), maintien de la fertilité du sol, forme extérieure

(tendance à s'étendre), système racinaire et effets sur les ravageurs et les maladies

Le *Leucaena* est l'espèce la plus communément utilisée à ce jour pour les haies, mais il n'est pas idéal pour le contrôle de l'érosion car ses feuilles se décomposent en une ou deux semaines, ce qui réduit la couverture du sol. Cette espèce a prouvé sa capacité de générer une haie dense avec production élevée de biomasse dans les climats humides à subhumides secs. Pour le maintien d'une couverture du sol pendant la période des pluies érosives, des espèces dont les feuilles se décomposent plus lentement, comme *Cassia siamea* ou *Gliricidia sepium*, sont préférables. Des combinaisons d'espèces ayant des vitesses différentes de décomposition des feuilles devraient être essayées.

Les plants à l'intérieur des haies doivent être peu espacés. Dans les climats humides et subhumides à tendance humide, le semis direct s'est révélé fructueux; les plantules peuvent ensuite être éclaircies pour obtenir un espace de l'ordre de 10 cm. Lorsque de jeunes plants sont repiqués, comme ce doit être le cas sous les climats plus secs, un espace de 25 cm paraît suffisant: on comble les vides entre les tiges par les résidus des cultures et d'élagage déposés en amont des rangées d'arbres. S'il y a deux rangées ou plus, l'espace dans les rangées peut aller jusqu'à 50 cm.

Des haies constituées d'une à quatre rangées de plants ont été essayées, les rangées simples étant les plus répandues.

Une rangée simple minimise la perte de sol cultivable et peut n'occuper qu'une largeur de 50 cm si elle est élaguée court. Les rangées doubles, avec la partie ligneuse des résidus d'élagage disposée dans l'allée centrale, forment un barrage plus important, qui risque moins de présenter des vides. Des haies vives de plus de 10 m de large ont été proposées pour les climats semi-arides, mais leur utilité n'a pas été démontrée (Weber et Stoney, 1986, p. 147). Des haies à plusieurs rangées seraient nécessaires si de gros orages détruisaient les rangées uniques en arrachant des plants entiers, ce qui n'a jamais été observé. Elles seraient également souhaitables si elles se montraient nettement plus efficaces pour stopper le ruissellement ou filtrer les sédiments, mais des recherches sont nécessaires pour s'en assurer. Une autre option consiste à planter une rangée de plantes herbacées juste en amont de la haie.

Actuellement, les seules indications sur l'espace entre les haies proviennent de diverses formules relatives aux intervalles verticaux entre les levées de terre ou les fossés, fournies par les manuels nationaux de conservation des sols et les recueils de textes; des exemples accompagnés de représentations graphiques figurent dans Hudson (1981, pp. 142-143). On ignore dans quelle mesure il faut modifier ces formules pour les appliquer aux barrages de haies en partie perméables. Pour la plantation de haies de barrage, on a besoin de connaître la distance entre les rangées à la surface du sol. Une indication très approximative donne $W = S/100$, où W = l'écartement des rangées en mètres, et S = l'angle de la pente en degrés. Ainsi, les haies seraient espacées de 5 m sur une pente de 20° (36%). Une modification serait nécessaire selon l'érodibilité du sol.

La pente latérale douce utilisée dans certains systèmes de talus et fossés n'est pas nécessaire avec les haies, qui peuvent être plantées exactement sur les courbes de niveau. Avec ce type d'alignement, l'espace entre rangées variera latéralement.

Une autre méthode consiste à utiliser des haies étroites et très rapprochées sur les pentes fortes. Au Malawi, on a conservé la largeur standard de 90 cm séparant les rangs de mats et planté des haies de *Leucaena* entre chaque rang. En quelques années, des micro-terrasses se forment. On ignore si la forte compétition apparente entre les racines créera des difficultés.



Photo 11- Haies de *Leucaena leucocephala* en courbes de niveau sur un site de démonstration à flanc de colline. Leyte, Philippines.



Photo 12 - Rangées de haies de *Leucaena leucocephala* peu espacées. Ntcheu, Malawi.



Photo 13 - Vue de plus près du site de Ntcheu (photo 12) au Malawi, montrant la formation de microterrasse naturelles derrière chaque haie.

Il existe deux façons de disposer les résidus d'élagage: les déposer en amont des haies ou les répartir sur la surface des couloirs. Disposer les résidus le long des haies immédiatement après l'élagage sert à consolider les barrages et dégage les couloirs pour les travaux d'entretien. Répartir les résidus à la surface des couloirs est préférable pour le contrôle de l'érosion par couverture du sol, ainsi que pour l'effet de la décomposition de la litière sur la fertilité du sol. Pour obtenir la couverture maximale, les tiges ligneuses et les feuilles doivent être réparties telles quelles, ce qui peut nécessiter la plantation à la main de la culture.

Exemples. A Flores Island en Indonésie (climat humide), plus de 10 000 ha de fortes pentes volcaniques ont été stabilisés depuis 1973 par des haies de *Leucaena* en courbes de niveau, et on a signalé la formation progressive de terrasses (Metzner, 1976; Prussner, 1981; Parera, 1983). Des rangées doubles de *Leucaena* ont été utilisées aux Philippines dans le cadre de projets de conservation, dans certains cas en alternance avec des bandes enherbées plantées d'arbres; très souvent, la coopération des fermiers a été obtenue (Benge, 1979; Celestino, 1984, 1985; O'Sullivan, 1985). La culture intercalaire avec haies et paillis a été recommandée récemment comme moyen de traiter les graves problèmes d'érosion en Haïti (Zimmerman, 1986).

Au Rwanda et au Burundi, des projets d'assistance ont installé des parcelles de démonstration de culture intercalaire avec haies sur des pentes modérées à fortes. Au Projet de Nyabisindu, au Rwanda, des doubles rangs décalés et des haies denses à espacement aléatoire ont été utilisées (Neumann, 1983; Michon et Bizimana, 1984; GTZ, Association pour la coopération technique (Gesellschaft für technische Zusammenarbeit), 1983; Anger *et al.*, 1985; Lipman, 1986: 130-31). Des haies espacées de 4 à 8 m ont été plantées au Cameroun (Simon, 1983). On a déjà parlé plus haut des haies, très rapprochées sur fortes pentes dans le district de Ntcheu au Malawi; la parcelle de démonstration longe la principale route nord-sud du pays. D'importantes réductions de la perte de sol par comparaison avec une parcelle de contrôle plantée seulement de maïs ont été enregistrées (observation personnelle).

Aux Philippines, des haies simples ou doubles de *Gliricidia* ou *Leucaena* sont conseillées comme technique de mise en culture sur terres en pente. Dans certains cas, des terrasses atteignant jusqu'à 1 m se sont édifiées contre elles. L'adoption par les agriculteurs a été variable.

A la station de l'ICRAF de Machakos au Kenya (climat bimodal subhumide sec à tendance semi-aride), une parcelle de démonstration de barrages de haies a été établie en 1984, sur une pente de 8 à 10° (14 à 17%). Les haies sont constituées d'un seul rang de *Leucaena*, les plants étant espacés de 25 cm, et les rangs, de 4 m. Les deux méthodes de gestion des résidus d'élagage sont à l'essai. Les haies sont maintenant bien établies et ont conduit à une amorce de terrasse de 10 à 20 cm de haut. Deux cultures par an (maïs, légumineuse) ont été pratiquées, sans qu'aucune diminution évidente de la récolte ne se manifeste à cause de l'érosion. En 1988, cette parcelle de démonstration a été subdivisée en sous-parcelles pour la mesure de l'érosion.



Photo 14 - Une haie en courbe de niveau formée de quatre rangs de Leucaena leucocephala. Hyderabad, Inde.

Résumé. En dépit de la rareté des données expérimentales, tout porte à croire que les systèmes de barrages de haies, ou la culture intercalaire avec haies en courbes de niveau, sont un moyen acceptable de contrôler l'érosion sur pentes douces à modérées, jusqu'à 17° (30%). Ce bénéfice s'ajoute aux effets probables sur la fertilité du sol, traités ci-après. On pourrait également, en théorie du moins, mettre au point des systèmes permettant la mise en culture de fortes pentes de façon durable et acceptable pour l'environnement.

Les coûts d'établissement de tels systèmes sont très inférieurs à ceux de la construction d'ouvrages classiques. Selon les circonstances, la main-d'œuvre nécessaire pour assurer un élagage régulier peut ou non excéder celle exigée pour l'entretien des structures en terre.

Le potentiel apparemment élevé de cette pratique et son applicabilité aux terres en pentes dans tout un éventail de conditions climatiques justifient d'importantes recherches dès ce jour. Là où les essais et les démonstrations pilotes ont été fructueux, de plus amples essais en milieu réel susceptibles de déboucher sur des recommandations de vulgarisation générale peuvent se justifier.

Plantations de démarcation et haies vives

Les plantations bordant les champs, lorsqu'elles suivent les courbes de niveau, constituent un moyen efficace pour lutter contre l'érosion. C'est d'autant mieux si l'on peut, dans les haies vives ou les plantations de démarcation, combiner des fonctions de production et de service.

Arbres sur structures anti-érosives

Plantés sur les structures anti-érosives, les ligneux pérennes sont utilisés comme auxiliaires de contrôle du ruissellement et de l'érosion, contrôle assuré primitivement par d'autres moyens. Les arbres et arbustes servent d'abord à stabiliser les structures en terre grâce à leurs systèmes racinaires, et ensuite à tirer parti du terrain, par exemple par la production de fruits, de fourrage ou de bois de feu. A plus long terme, leur présence sur les structures de conservation du sol tendra en outre à en faire une partie intégrante et permanente du système d'exploitation agricole. Arbres et arbustes peuvent être ajoutés à des ouvrages de conservation déjà en place, ou inclus lors de leur construction.

Cette pratique nécessite moins de recherches, du fait que son efficacité pour contrôler le ruissellement et l'érosion est très proche de celle des mesures conventionnelles de conservation. Il est plus important d'être inventif dans la sélection des arbres censés répondre aux besoins des fermiers.

Il existe trois modèles pour cette pratique: arbres sur bandes enherbées, arbres sur structures de talus et fossés et arbres sur terrasses.

Arbres sur barrages de bandes enherbées. Là où les bandes enherbées de barrage se sont révélées *efficaces* et acceptables comme moyen de contrôle de l'érosion, la plantation additionnelle d'arbres peut procurer des bénéfices supplémentaires par la production de bois de feu, de fourrage ou de fruits, au gré du fermier, en plus du fourrage obtenu par la coupe de l'herbe. Les bandes enherbées ont typiquement 2 m de large. Lorsque la voûte des arbres est dense, comme c'est le cas pour beaucoup d'arbres fruitiers, l'espacement doit être modérément large, par exemple 10 m, de manière à éviter une réduction de la densité de l'herbe.

La principale précaution à prendre est d'éviter l'utilisation d'arbres qui provoquent une réduction de la densité du tapis herbeux. Sur le plan de la gestion, il est important de protéger les jeunes arbres en sarclant leur pourtour à nu pendant deux ou trois ans, à défaut de quoi, la compétition de l'herbe risque de réduire fortement leur taux de croissance, en particulier sous les climats secs.

Des exemples ont été rapportés aux Philippines, au Cameroun, au Rwanda, au Kenya et au Malawi. Parmi les espèces utilisées, citons *Grevillea robusta* pour le bois d'œuvre, et le quinquina, le cafier, le bananier, le goyavier, l'avocatier, le citronnier et autres arbres fruitiers. Les produits des ligneux peuvent être combinés avec le fourrage herbacé.

En raison du terrain occupé par les bandes, cette pratique ne convient qu'aux pentes douces. Elle semble convenir le mieux aux climats subhumides.

Arbres sur structures de talus et fossés. Beaucoup d'ouvrages en terre construits pour contrôler l'érosion combinent un fossé avec un remblai ou une diguette. Dans la méthode la plus commune, le fossé est large et peu profond et est situé au-dessus du remblai. Une autre forme connue au Kenya sous le nom de fanya juu comporte un fossé plus étroit à paroi raide, situé en dessous du remblai, dans le but de favoriser la formation progressive d'une terrasse (Wenner, 1980, 1981). Il existe également des fossés d'évacuation à la limite supérieure de la superficie cultivée.

Classiquement, ces ouvrages sont stabilisés par les herbes, mais se prêtent à la plantation d'arbres ou de haies. *Grevillea robusta* est largement cultivé ainsi pour le bois d'œuvre, mais on peut aussi planter une large gamme d'espèces à usages multiples.

Les arbres sont généralement plantés sur les remblais, mais dans les régions sèches, ils peuvent également l'être dans les fossés. Dans les conditions de climat sec subhumide (700 mm de précipitations) de la station de recherches de l'ICRAF à Machakos, six sortes d'arbres fruitiers plantés dans les fossés des structures de type fanya juu ont présenté des taux de survie et de croissance satisfaisants, parce que c'est là effectivement une forme de plantation en cuvettes qui s'est révélée par ailleurs avantageuse dans ce même environnement. A condition de prendre la précaution, normale en agroforesterie, d'éviter l'utilisation de ligneux incompatibles avec les cultures voisines, cette pratique peut à coup sûr être recommandée comme un complément avantageux aux ouvrages standard de conservation du sol.

Arbres sur terrasses. Sur les terres en pente où des terrasses existent déjà, il peut être avantageux de planter un dense couvert d'arbres sur les versants. Les arbres sont soit élagués, soit recépés. Leurs fonctions sont les suivantes:

- stabilisation des versants pour réduire les besoins d'entretien;
- production de bois de feu, de fourrage ou de fruits;
- amélioration de la fertilité par apport de litière.

Les espèces utilisées peuvent varier en fonction du climat et des besoins locaux. En Inde et au Népal, *Grewia oppositifolia* et *Alnus nepalensis* sont largement utilisés (Das, 1980; Fonzen et Oberholzer, 1984). Dans un rapport consultatif sur la région de Gojam dans les montagnes éthiopiennes, la plantation de *Racospermum salignum* (= *Acacia saligna*) et de *Grewia oppositifolia* sur les versants des terrasses existantes a été recommandée (von Carlowitz, 1986c).

Cette technique semble convenir à beaucoup de régions où la construction de terrasses est une pratique déjà établie. Elle peut être appliquée sur une terre en pente modérée, mais elle est particulièrement utile là où la plus grande partie des terres disponibles consiste en flancs de vallées en forte pente, profondément découpés, déjà aménagés en terrasses (pluviales ou irriguées). Du fait de la pression démographique intrinsèquement élevée dans de telles régions, il y a fréquemment des problèmes de pénurie de bois de feu et de fourrage, et de déclin de la fertilité du sol. La lutte contre l'érosion demeure efficace aussi longtemps que les terrasses sont entretenues. La plantation additionnelle d'arbres présente le double avantage potentiel d'augmenter la production (produits des ligneux et/ou amélioration de la fertilité du sol) tout en participant à la conservation du sol.

Lorsque l'aménagement complet en terrasses n'est pas possible, on peut tirer divers usages des fortes pentes en plantant des *arbres fruitiers* sur des *terre-pleins* formant des gradins semi-circulaires pour chaque arbre. Pour une bonne installation, il faut d'abord creuser un trou puis le remplir partiellement, de façon à combiner plantation en cuvettes et zone d'enracinement ameublie. Lorsque les arbres sont adultes, on peut pratiquer le pâturage contrôlé.

Brise-vent et rideaux abris

Le rôle des brise-vent et des rideaux abris dans la lutte contre l'érosion éolienne dans les régions semi-arides est bien établi: nous le mentionnons ici au passage en tant que pratique agroforestière de grande importance, mais ne le traitons pas en détail. On peut se référer à: FAO (1976b, 1986), Jensen (1983) et Depommier (1985).

Pratiques sylvopastorales

L'érosion du sol est souvent plus accentuée sur les pâturages que sur les terres cultivées. De graves érosions en nappe et en ravines sont communément observées. Le surpâturage en est la cause initiale: il conduit à la destruction partielle ou totale du couvert végétal, laissant le sol exposé à l'érosion. Il n'est pas rare que 10 cm de couche arable ou plus soient enlevés. Une érosion pareille se produit dans les régions semi-arides principalement à pâturages, et sur les terres utilisées pour le pâturage dans les régions d'agriculture mixte.

Les pratiques sylvopastorales incluent les arbres dispersés sur pâturage (par exemple, système avec *Acacia albida* ou autres espèces d'*Acacia* ou de *Racosperma*), les pâturages sous plantations (par exemple bétail sous cocotiers, moutons sous hévéas), les haies vives, les banques fourragères, les brise-vent, les rideaux abris, et les cultures intercalaires avec haies sur pâturages. Le rôle des brise-vent dans la lutte contre l'érosion éolienne est avéré. Il serait très intéressant de trouver le moyen d'appliquer les pratiques sylvopastorales à la lutte contre l'érosion hydrique.

Si l'on se contente, pour lutter contre l'érosion hydrique, de planter des arbres, sans modifier la gestion des terres de pâturage dégradées, l'échec est garanti. Les principes de base de la gestion des pâturages, tels que la restriction du nombre des

animaux et la rotation du pacage, sont des conditions indispensables au contrôle de l'érosion comme à tout autre aspect des systèmes sylvopastoraux.

Cependant, une fois assurée la gestion saine des pâturages, les arbres peuvent contribuer à la lutte contre l'érosion de bien des manières. Des haies vives permettent de contrôler les déplacements du bétail, ce qui facilite la rotation du pacage. Le feuillage des arbres n'aura guère d'effet protecteur contre l'impact des gouttes de pluie sur le sol.

Cependant, le potentiel le plus important se manifeste de manière indirecte. Une fonction connue des ligneux dans les systèmes sylvopastoraux consiste à fournir du fourrage riche en protéines à des époques de l'année où l'herbe manque ou est indigeste. Les ovins, les caprins et les animaux sauvages peuvent brouter directement les feuilles, mais le fourrage peut aussi être coupé et emporté. En réduisant la pression sur le pâturage, de telles méthodes peuvent aider à améliorer la couverture végétale et donc diminuer l'érosion à la période critique, au début des pluies.

Comme pour les pratiques sylvopastorales en général, ces considérations s'appliquent aux terres de pâturage semi-arides et subhumides, et aux zones des régions tropicales humides où les terres en pente sont utilisées comme pâturage, comme c'est fréquemment le cas en Amérique latine. Baumer (1987) a traité largement du potentiel du sylvopastoralisme en zone semi-aride.

Foresterie de réhabilitation à usages multiples

Le potentiel de la foresterie de réhabilitation pour restaurer la fertilité des terres dégradées est bien connu. Il existe des possibilités de combiner la restauration avec la production.

La première étape consiste à établir un couvert forestier complet, incluant au moins quelques espèces fixatrices d'azote, en protégeant les jeunes plants du pâturage et en permettant à tous les résidus végétaux d'atteindre le sol. Dès que l'érosion a pu être stoppée et que suffisamment de matière organique a été reconstituée, on peut, au moyen de l'agroforesterie, combiner le contrôle continu de l'érosion avec une utilisation productive.

Techniques et produits peuvent varier largement. On peut pratiquer une coupe sélective étroitement réglementée pour le bois de feu, ou le pâturage contrôlé, ou encore la coupe du fourrage. Toutes ces méthodes ont été combinées avec succès en Inde (Mathur *et al.*, 1979). Pour la restauration de collines gravement dégradées au nord du Viêt-nam, on conseille un système consistant à abattre des arbres en bandes de niveau, qui seront remises en culture, les autres arbres servant de ceintures pour la conservation et l'amélioration continue de la fertilité du sol (Poulsen, 1984; Young, 1985b).

Près de Mombasa au Kenya, le calcaire corallien laissé nu par l'exploitation de carrières a été réhabilité par la plantation de *Casuarina equisetifolia*; une petite superficie a été convertie, en réserve naturelle, où la forêt naturelle adulte et une couche arable humique se sont développées (Baumer *et al.*, 1991).

Agroforesterie dans la gestion des bassins versants

Quelques succès notables ont été obtenus avec la planification et l'aménagement des bassins versants, à savoir un contrôle intégré de l'utilisation des terres sur tout le bassin d'un cours d'eau. L'essentiel est de planifier correctement l'utilisation des terres pour le bassin tout entier, en se préoccupant tout particulièrement du contrôle de l'érosion et de la gestion de l'eau. Il est indispensable de disposer de mécanismes adéquats pour contrôler l'utilisation des terres et les pratiques de gestion, et de s'assurer la coopération des utilisateurs.

A ce jour, la plupart des systèmes de ce genre sont basés sur des combinaisons judicieuses d'agriculture, de structures anti-érosives, et de foresterie de protection, cette dernière en particulier dans les bassins de captage escarpés de premier ordre, et quelquefois le long des rives. Inclure l'agroforesterie parmi les types d'utilisation des terres retenus pour une telle planification présente un grand intérêt potentiel, mais on en a peu l'expérience (Baumer, 1984; Vergara, 1985; Sheng, 1986: 85-89).

La suggestion de Sheng (1986, pp. 5560) selon laquelle l'agroforesterie devrait occuper les sites de pente intermédiaire, entre ceux destinés à l'agriculture et ceux destinés à la foresterie, repose sur une notion trop simpliste de l'ensemble des pratiques. Inversement, il est irréaliste de penser que l'on peut appliquer des pratiques agroforestières sur tout un bassin versant. Ce qu'il faut, c'est garder en mémoire les diverses options agroforestières lors de l'attribution des terres selon les principes de planification de l'utilisation des terres.

On peut citer l'exemple de Shillong, dans la région de collines du nord-est de l'Inde (climat humide de mousson). Dans la pratique locale de culture itinérante ("jhum"), l'ancienne période de jachère de 20 à 30 ans a été réduite à 3 à 6 ans. Pendant la première et la deuxième années de mise en culture, l'érosion est très sévère, atteignant 150 t/ha/an. La construction de terrasses s'est révélée un moyen efficace de contrôle, mais elle exige beaucoup de main-d'œuvre. Un système de remplacement a été mis au point, dans lequel les pentes sont divisées en trois parties:

Partie supérieure	Couvert forestier naturel
Partie intermédiaire	Pâturage avec arbres fruitiers sur terrasses individuelles en demi-lune
Partie inférieure	Cultures en terrasses

Des expériences incluant l'agroforesterie sont réalisées à Shillong sur 13 bassins versants (Borthakur *et al.*, 1979; Singh et Singh, 1981).

Résumé

Le tableau 10 résume les pratiques agroforestières prometteuses pour la lutte contre l'érosion.

Les deux premières pratiques, combinaisons de cultures et jardins ligneux multiétages, sont de nature et d'effets comparables; toutes deux sont des mélanges denses, qui réussissent à contrôler l'érosion pour une grande part grâce à l'apport d'une importante couverture de litière fréquemment renouvelée. La culture intercalaires en haies contrôle l'érosion, en partie en freinant le ruissellement et la perte de sol grâce à un barrage de haies partiellement perméable, et en partie grâce à la

couverture du sol fournie par les résidus d'élagage. Dans la pratique des plantations ligneuses sur des ouvrages anti-érosifs bandes enherbées, structures de talus et fossés, et terrasses - les ligneux remplissent des fonctions supplémentaires en stabilisant les structures et en rendant productif le terrain qu'ils occupent.

Les brise-vent et rideaux abris, non décrits ici mais qui ont un potentiel démontré pour la lutte contre l'érosion éolienne dans les systèmes agricoles comme dans les systèmes pastoraux, sont ajoutés au tableau pour qu'il soit complet. Dans les autres pratiques sylvopastorales, le rôle des arbres dans le contrôle de l'érosion est indirect, mais il peut être important lorsqu'il est combiné avec une bonne gestion des pâturages.

Tableau 10 - Pratiques agroforestières prometteuses pour la lutte contre l'érosion du sol.

Pratiques agroforestières	Environnements où elles sont applicables	Remarques
Combinaisons de plantations et de cultures	Climats humides à subhumides mouilleux	Les combinaisons denses de cultures de rapport avec arbres à usages multiples semblent contrôler efficacement l'érosion sur les pentes au moins modérées
Jardins ligneux, multiétagés, jardins de case inclus	Surtout sous climats humides et subhumides mouilleux, mais envisageables dans régions plus sèches	Possèdent une capacité inhérente de contrôle de l'érosion par la combinaison d'une couverture herbacée avec une litière abondante
Culture en couloirs	Climats humides, subhumides et peut-être semi-arides	Apparemment très prometteuses pour combiner la lutte anti-érosion avec l'utilisation agricole sur pentes douces à modérées; potentiel plus hypothétique sur fortes pentes; données expérimentales rares
Arbres sur ouvrages anti-érosion	Tous climats	Les arbres stabilisent les ouvrages en terre et rentabilisent le terrain qu'ils occupent
Brise-vent et rideaux abris	Zone semi-aride	Potentiel démontré de réduction de l'érosion éolienne
Pratiques sylvopastorales	Climats semi-arides et subhumides, plus quelques climats humides (en particulier en Amérique du Sud)	Possibilités d'introduction d'arbres et arbustes dans les programmes globaux d'amélioration des pâturages
Foresterie de réhabilitation menant à plusieurs usages	Tous climats	Potentiel pour la planification du développement
Combinaisons des précédentes pratiques dans l'aménagement intégré des bassins versants	Tous climats	Occasions d'inclure l'agroforesterie et d'autres types importants d'utilisation des terres dans la planification et la gestion intégrées

Les deux dernières pratiques figurant dans le tableau concernent l'agroforesterie en tant qu'élément de la planification de l'utilisation des terres. Combinée avec la foresterie de réhabilitation, l'agroforesterie peut contribuer à préparer une utilisation productive des terres. Plus généralement, toutes les pratiques agroforestières peuvent et devraient être prises en considération dans la gestion intégrée des bassins versants et dans la planification de l'utilisation des terres.

Beaucoup de recherches sont nécessaires pour tirer le meilleur parti de ce potentiel. Les besoins de la recherche sont discutés au Chapitre 16.

Troisième partie - Agroforesterie et entretien de la fertilité du sol

"Elle était plantée dans un bon terrain, près d'une eau abondante, de manière à produire des branches et à porter du fruit, à devenir une vigne magnifique"

Ezechiel, 17, 8

Chapitre 7: Fertilité du sol et dégradation

Nous avons souligné précédemment que le principal effet néfaste de l'érosion du sol est la diminution de la fertilité, et que c'est là la principale raison pour laquelle des mesures anti-érosives doivent être prises. Le risque d'érosion hydrique est maximum sur les terres en pente, pratiquement sous tous les climats, et le risque d'érosion éolienne est extrême dans la zone semi-aride, quelle que soit la pente. Dans ces deux types d'environnements très répandus, la lutte contre l'érosion est un élément clé du maintien de la fertilité du sol.

Il ne s'agit là cependant que d'un élément. Les terres qui ne présentent pas de risque important d'érosion, comme les terrains plats ou presque plats des zones subhumides et humides, sont souvent sujettes à une dégradation du sol ou à une diminution de la fertilité, dues pour la plus grande part à ce que l'on qualifie vaguement de "surexploitation". Les possibilités qu'offre l'agroforesterie pour freiner ou stopper un tel déclin de la fertilité sont au moins aussi importantes que celles offertes pour lutter contre l'érosion.

En réalité, les deux problèmes sont liés. Toutes les terres sont sujettes à un certain degré d'érosion et à d'autres formes de dégradation du sol, qui conduisent à un déclin de la fertilité et à une perte de durabilité. Sur terrain plat, l'une des causes de la perte de fertilité, l'érosion, est heureusement absente. Sur les terres en pente, l'érosion hydrique sera probablement la principale cause de perte de fertilité, mais la plupart des autres formes de dégradation du sol seront également présentes. Dans cette section, nous nous occuperons des problèmes plus généraux du sol, applicables non seulement aux terres soumises à l'érosion, mais aussi à des régions où il n'y a pas de risque d'érosion et à celles où l'érosion a été contrôlée avec succès.

Productivité de la terre et fertilité du sol

La productivité de la terre est la capacité de celle-ci à supporter durablement la croissance de plantes utiles, notamment les cultures, les arbres et les pâturages. Cette propriété ne relève pas seulement du sol, mais de la terre considérée comme l'ensemble des caractéristiques de l'environnement physique qui affectent les possibilités d'utilisation: le sol, les éléments climatiques, hydrologiques et topographiques, la végétation et la faune. Il est impossible de considérer la productivité d'un sol séparément des autres facteurs.

L'homme ne peut modifier le climat, le relief, ni certaines propriétés du sol telles que la profondeur et la texture. Cependant, il peut en influencer de nombreuses autres, en bien ou en mal, par le mode d'utilisation du sol et la gestion. C'est ce qui explique l'importance du rôle des sols dans la recherche agronomique et la gestion de l'exploitation agricole.

Par conséquent, *la fertilité du sol* est la capacité de celui-ci à soutenir durablement la croissance des plantes, dans des conditions climatiques données et d'autres caractéristiques pertinentes de la terre. La notion de durabilité introduite dans cette définition se réfère à la capacité de supporter la croissance végétale de manière continue. Certains sols initialement productifs possèdent des réserves non protégées d'éléments nutritifs et perdent rapidement leur fertilité s'ils passent de la végétation naturelle à des écosystèmes aménagés. D'autres, notamment les nitosols sur roches basiques, possèdent des pouvoirs naturels de récupération qui leur permettent de reconstituer des éléments nutritifs par altération des roches.

On rencontre parfois une acceptation plus étroite de la notion de fertilité, réduite à la teneur en éléments nutritifs disponibles. Cela conduit à une gestion du sol restrictive qui néglige les propriétés physiques et biologiques. Il est préférable de désigner cet aspect sous le nom de teneur en éléments nutritifs.

Problèmes de dégradation du sol et faible fertilité du sol

Déclin de la fertilité

Les formes reconnues de dégradation du sol sont l'érosion, la dégradation physique, chimique et biologique, la salinisation et la pollution, où la dégradation chimique inclut tant l'acidification que la diminution de la teneur en éléments nutritifs. Elles sont étroitement liées: la dégradation biologique influence à la fois les propriétés physiques du sol et les éléments nutritifs, tandis que l'érosion est une cause de dégradation biologique et de perte d'éléments nutritifs.

Toutes ces formes de dégradation entraînent une baisse de la fertilité du sol et de la productivité de la terre. Cependant, c'est l'effet combiné de la diminution de la matière organique du sol, de la détérioration de ses propriétés physiques, de la réduction de la teneur en éléments nutritifs et (dans certains cas) de l'acidification qui est généralement désignée sous le nom de déclin de la fertilité.

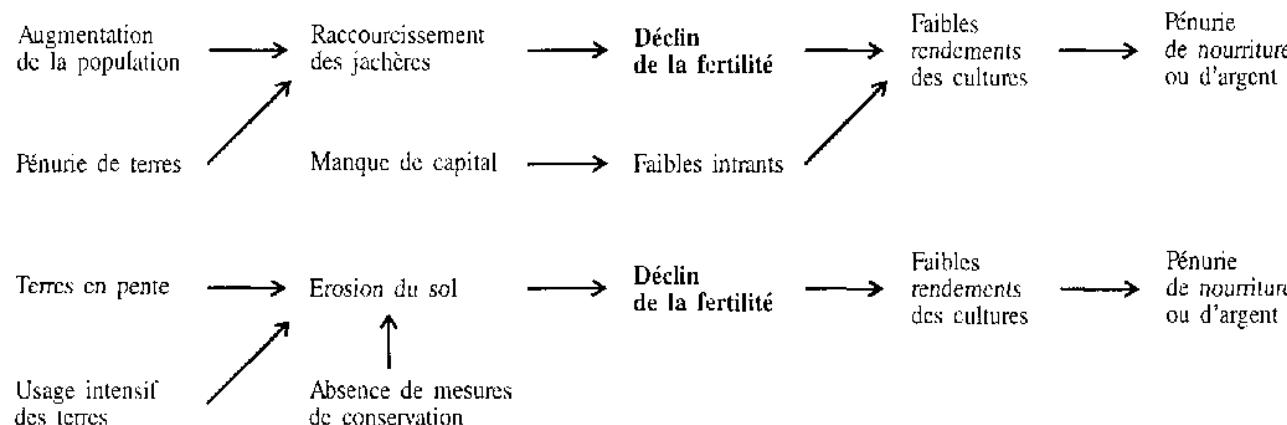


Figure 4 - Chaines des causes et effets liés au déclin de la fertilité du sol.

Un certain nombre de gouvernements et d'agences internationales ont fait des estimations des proportions de terres agricoles qui souffrent d'une dégradation légère, modérée ou grave du sol. Pris au pied de la lettre, ces chiffres sont d'une valeur douteuse, car aucune analyse pédologique n'a encore appliqué des méthodes objectives d'évaluation de la dégradation des sols. Nous pouvons encore moins distinguer les cas où la fertilité est encore en déclin, de ceux où un équilibre à un bas niveau a été atteint. Des méthodes commencent toutefois à être mises au point (FAO, 1979). L'évaluation de la dégradation est un des objectifs du GEMS (système global de suivi de l'environnement) du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), et des essais sont en cours pour l'inclure dans la base de données sur les sols et les terrains de l'International Society of Soil Science.

Quoi qu'il en soit, il ne fait aucun doute que, sur très vastes régions sous agriculture pluviale dans la zone tropicale, la fertilité du sol est inférieure à ce qu'elle était il y a 10, 20 ou 50 ans. Les exploitants âgés le reconnaissent aisément.

Dans ce contexte, il convient de citer l'expérience issue de l'application de la méthode D & D (diagnosis and design). Après identification des différents systèmes d'utilisation des terres, cette méthode vise d'abord à découvrir la nature et la gravité des problèmes existant dans ces systèmes, puis à en diagnostiquer les causes. Elle a été appliquée, par exemple, dans le All-India Coordinated Research Programme in Agroforestry et dans les Réseaux de recherche agroforestière pour l'Afrique de l'ICRAF. Le déclin de la fertilité du sol, parfois traduit par de faibles rendements des cultures, est l'un des problèmes le plus souvent observés dans un large éventail d'environnements. Dans les chaînes causales identifiées au stade du diagnostic, il est très fréquent de trouver des éléments tels que ceux exposés dans la Figure 4.

Non seulement la dégradation du sol abaisse les rendements agricoles que l'on pourrait obtenir d'après la fertilité intrinsèque du sol, mais elle peut aussi réduire fortement la réponse aux engrains ou autres intrants. Ceci réduit la marge économique sur l'application d'engrais, ce qui tend à perpétuer la situation caractérisée par de faibles intrants et de faibles entrants.

La riziculture inondée fait partie exception à la généralisation qui précède. D'un côté, ce système comporte des mécanismes naturels d'entretien de la fertilité du sol; de l'autre, il est maintenant courant dans de nombreux pays d'utiliser une certaine quantité de fumier et d'engrais. Il y a certainement des problèmes de déclin de la fertilité du sol, mais ils sont de nature différente.

Faible fertilité du sol

La faiblesse inhérente de fertilité du sol est un problème distinct de celui de la dégradation de sols précédemment fertiles. La croissance démographique a entraîné la mise en culture de nombreuses terres dites "marginales", autrefois forêts naturelles ou pâtures. Parmi les problèmes les plus fréquents de faible fertilité naturelle du sol, on peut citer:

- L'acidité;
- la faible teneur en éléments nutritifs en général;
- les déficits en éléments nutritifs spécifiques, le plus souvent l'azote et le phosphore;
- des propriétés physiques défavorables.

Les types de sols les plus répandus, fréquemment cultivés en dépit de problèmes importants de faible fertilité, sont:

- les sols rouges et jaunes, très altérés, fortement lessivés, de la zone tropicale humide (ferralsols et acrisols). Ces sols présentent des problèmes d'acidité, de lessivage rapide, de faible rétention des éléments nutritifs une fois que la matière organique de la couche arable est réduite, et de fixation du phosphore;
- les sols des plateaux de *sandveld*, très altérés et peu structurés, de la zone subhumide (p. 17). Ils ont une faible teneur en éléments nutritifs, une structure mal développée et, dans certains cas, sont acides;
- les argiles noires craquelées (vertisols). Leur problème majeur est leur forte teneur en argile gonflante, la grande taille des agrégats structuraux et la faible porosité (Young, 1987d).

Chacun des types de sols mentionnés ci-dessus est inclus dans les réseaux de recherche de l'International Board for Soil Research and Management (IBS-RAM).

Diagnostic des problèmes de fertilité du sol dans la planification de l'agroforesterie

La faible fertilité du sol et la baisse de fertilité sont des problèmes distincts. Ils sont liés dans la mesure où un sol intrinsèquement stérile risque de se dégrader plus rapidement.

Sur certains plans, les deux situations présentent un problème semblable: un déficit en éléments nutritifs ou une structure médiocre ont les mêmes effets, quelle qu'en soit la cause. Mais elles diffèrent sur le plan des possibilités d'amélioration par le travail du sol. Si le sol était primitivement plus fertile et s'est dégradé, on peut à première vue supposer que la fertilité peut être améliorée par des modes d'exploitation qui se rapprochent de l'écosystème naturel, par exemple par l'implantation d'arbres. Si le sol est infertile de nature, la tâche est intrinsèquement plus difficile. Dans le premier cas, nous travaillons avec la nature; dans le second cas, nous essayons d'y apporter des améliorations.

Par conséquent, le diagnostic du problème de faible rendement des cultures doit distinguer *la faible fertilité du sol* due aux conditions naturelles, et le *déclin de la fertilité du sol* résultant de l'utilisation qui en a été faite.

Options d'exploitation pour l'entretien de la fertilité du sol

Pratiques non agroforestières

Certaines terres sont occupées depuis peu, d'autres sont cultivées depuis des centaines ou des milliers d'années. De nombreuses méthodes, traditionnelles ou modernes, ont été mises au point pour entretenir la fertilité du sol; l'agroforesterie en est une. Chaque méthode est soumise à des contraintes qui en limitent l'application en tant qu'option pratique d'exploitation dans les pays moins développés.

Le tableau 11 donne une liste de 10 pratiques traditionnelles et de 2 pratiques modernes, plus l'agroforesterie. Il mentionne trois sortes d'obstacles à leur application dans les conditions pratiques d'exploitation agricole dans le monde moderne: le type de terrain, l'étendue de terre et les difficultés d'approvisionnement.

La contrainte liée au type de terrain signifie que la pratique en question n'est applicable qu'aux terres ayant certaines propriétés. Ceci concerne l'utilisation de sols naturellement durables, ainsi que l'irrigation par épandage et la riziculture inondée. Les sols naturellement durables sont ceux qui proviennent de roches basiques (nitrosols), capables de renouveler la fertilité par altération des roches minérales et de soutenir une mise en culture presque continue; ils sont peu étendus, connaissent des densités de population élevées et sont maintenant exploités si intensivement qu'ils ne sont plus à l'abri de la dégradation.

Le renouvellement de la fertilité résultant de l'apport d'éléments nutritifs par l'eau des crues était une caractéristique de certaines des plus anciennes formes d'agriculture, maintenant pour la plupart disparues par suite du contrôle des crues.

La riziculture inondée comporte des méthodes naturelles de renouvellement de la fertilité, tout en réagissant bien aux engrais. Elle fait déjà vivre près de la moitié de la population des pays moins développés, en Asie pour une grande part, et continue à s'étendre. Elle est essentiellement pratiquée sur des terres alluviales et il est irréaliste de supposer que l'énorme quantité de main-d'œuvre nécessaire pour construire des terrasses irriguées, comme celles existant à Java, aux Philippines ou au Népal, puisse être mobilisée sur les autres continents. Il est certain que, du fait de la productivité élevée par unité de surface de terre, cette forme de développement gardera sa valeur, mais seulement dans les fonds de vallées et les plaines alluviales.

La contrainte liée à l'étendue des terres affecte bien évidemment la pratique figurant en premier sur la liste, qui consiste à répondre au déclin des rendements agricoles par le défrichement et la mise en culture de nouvelles terres. Elle concerne aussi la pratique de l'engrais vert, forme de jachère améliorée improductive, qui a rarement eu la faveur des agriculteurs.

La technique de la mise en jachère, ou culture itinérante, était autrefois le moyen le plus répandu de restaurer la fertilité épuisée par la mise en culture. C'est également la plus ancienne pratique agroforestière. On a beaucoup écrit sur la culture itinérante; la conclusion principale est que cette pratique n'est durable qu'à condition que les périodes de jachère soient de longueur suffisante, mais qu'elle tend à dégrader le sol lorsque les périodes de jachère sont raccourcies à cause de la pression démographique sur les terres. Les durées relatives de mise en culture et de jachère sont exprimées par le facteur R, et le pourcentage de la durée d'exploitation dans le cycle total:

R% = Années d'exploitation/Années d'exploitation plus jachère x 100

Tableau 11 - Pratiques de gestions pour l'entretien de la fertilité du sol avec les contraintes à leur application.

	Contraintes de la terre	Contraintes en approvisionnement
	Type	Etendue
Exploitation de nouvelles terres		*
Mise en jachère (culture itinérante)		*
Utilisation de sols naturellement durables	*	
Restitution des résidus des cultures		*
Rotation des cultures		
Cultures en couloirs		
Fumure organique: fumier, compost, paillis		*
Engrais vert		*
Irrigation par crue	*	
Riziculture inondée	*	
Engrais		*
Travail minimum du sol		*
Agroforesterie	?	

Remarque: les pratiques énumérées ci-dessus peuvent se chevaucher. La culture itinérante est une pratique agroforestière, de nombreux types d'agroforesterie sont des formes de culture intercalaire et l'agroforesterie fournit fréquemment de la fumure organique.

Un premier calcul des facteurs R nécessaires pour entretenir la fertilité du sol avec l'agriculture itinérante (Nye et Greenland, 1960; Young, 1976: p.114) donnait les valeurs de 17 à 33% pour la forêt tropicale humide et 5 à 11% pour la savane (brûlée).

Une évaluation plus complète, basée sur des observations publiées et des questionnaires d'enquête, a été effectuée dans le cadre d'une étude de la FAO sur les capacités de charge démographique. Cette évaluation se fondait sur le *temps de repos nécessaire* défini comme le facteur R nécessaire pour maintenir la fertilité du sol cultivé chaque année. Des estimations du temps de repos nécessaire ont été obtenues, pour les trois principales zones écologiques des régions tropicales: forêt tropicale humide, savane et zone semi-aride; pour les types de sols de la FAO combinés en 10 groupes et pour trois niveaux d'intrants: faible (exploitation traditionnelle), intermédiaire (exploitation améliorée) et élevé (exploitation moderne, de haute technologie). Les résultats sont donnés au tableau 12.

Ces estimations posent beaucoup de difficultés, surtout parce que l'on sait rarement si les sols se dégradent avec le mode d'utilisation actuel, et dans quelle mesure ils le font. Les résultats fournissent néanmoins des ordres de grandeur. La caractéristique dominante est la faible proportion de temps d'exploitation qui permet de maintenir la fertilité avec un faible niveau d'intrants, en particulier sur les types de sols les plus répandus. Même avec le niveau intermédiaire d'intrants, le plus élevé qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre dans un futur prévisible, une période de jachère d'un an ou deux sur trois est encore nécessaire.

Ces données sont en désaccord avec le fait qu'actuellement, la forme prédominante d'agriculture pluviale sur de vastes régions des pays moins développés est plus ou moins la mise en culture continue. En résulte soit que la fertilité du sol est en déclin, soit qu'elle a atteint un état d'équilibre à un faible niveau, stable, mais avec de faibles rendements. Aucune de ces deux situations ne répond à la définition de la durabilité. La mise en jachère non productive n'est plus une option réalisable d'exploitation pour entretenir la fertilité du sol.

Quatre autres pratiques figurant au tableau 11 sont limitées dans leur applicabilité par des problèmes d'approvisionnement. La restitution des résidus des cultures est certes d'une valeur démontrée, mais beaucoup d'agriculteurs utilisent les résidus autrement, et il est parfois nécessaire de les enlever pour des raisons de lutte contre les ravageurs. L'apport d'engrais organiques, y compris le fumier, le compost et le paillis, a un intérêt considérable et démontré, mais à des niveaux d'application tels qu'une petite proportion seulement de la terre cultivée peut être traitée; on a souvent montré que 5 à 10 t/ha/an de fumier améliorent la fertilité du sol, alors que 1 à 2 t sont insuffisantes.

Tableau 12 - Périodes de repos nécessaires aux sols tropicaux. Toutes les valeurs se réfèrent au facteur de mise en culture, R, exprimé en pourcentage. Les nombres en tête des colonnes sont les périodes de croissance pour les cultures annuelles, en jours (Young et Wright, 1980).



Type de sol(FAO)	Faible niveau d'intrants			Niveau intermédiaire d'intrants			Niveau élevé d'intrants		
	Zone de forêt dense humide	Zone de savane	Zone semi-aride	Zone de forêt dense humide	Zone de savane	Zone semi-aride	Zone de forêt dense humide	Zone de savane	Zone semi-aride
	270-365	120-269	75-119	270-365	120-269	75-119	270-365	120-269	75-119
Régosols et arénosols	10	15	20	30	35	45	50	65	50
Ferralsols	15	15	20	35	35	40	70	70	75
acriques	5			10			60		
Acrisols	15	15	20	40	35	60	65	65	75
Lixisols	25	30	35	50	50	55	70	75	75
Cambisols	35	50	40	65	60	85	85	80	80
Nitisols dystriques	25	30	40	55	80	70	90	90	90
eutriques	40	55	75						
Vertisols	40	55	45	70	75	75	90	90	
Fluvisols et Gleysols	60	70	90	80	80	90	90	90	90

Aucune amélioration technique isolée n'a augmenté les rendements autant que l'apport d'engrais, mais la contrainte liée à l'approvisionnement se rencontre fréquemment. Elle ne provient pas d'une pénurie absolue à l'échelle mondiale, mais des nombreuses difficultés qui, dans la pratique, empêchent les fournitures d'arriver jusqu'au fermier: manque de devises étrangères au niveau national, absence de facilités de crédit ou système de distribution inefficace.

La seconde technique moderne de la liste, le labour minimum, s'est révélé être un moyen efficace d'entretien de la fertilité du sol, y compris de lutte contre l'érosion, dans des conditions expérimentales et sous une gestion de haut niveau, dans les régions tropicales humides à subhumides mouilleuses. Elle est très largement pratiquée avec l'agriculture mécanisée dans la zone tempérée, mais a rarement été adoptée par les agriculteurs des régions tropicales. Elle nécessite l'usage d'herbicides pour le contrôle des adventices, ce qui pose un problème direct d'approvisionnement, en plus du risque environnemental que comporte la distribution de substances toxiques aux petits exploitants. Bien que prometteuse du point de vue technique, elle reste problématique pour le développement, à moins d'être adoptée avec succès par les agriculteurs.

Ni les contraintes liées à la terre, ni celles liées à l'approvisionnement ne s'appliquent aux rotations des cultures.

Cependant, rotation et culture en couloirs sont davantage des moyens de partager efficacement les ressources limitées du sol que de les reconstituer.

Six de ces pratiques non agroforestières possèdent, combinées, un potentiel considérable d'amélioration ou de maintien de la fertilité du sol sur de vastes régions tropicales: la rotation des cultures, la culture en couloirs, la restitution des résidus des cultures, la fumure organique, la riziculture inondée et la fertilisation. L'applicabilité des autres est limitée ou en déclin dans le monde moderne, ou, dans un cas, non démontrée. A l'exception de la rotation et de la culture en couloirs, toutes les pratiques qui améliorent l'efficacité de l'utilisation des ressources du sol sont soumises à des contraintes importantes liées au type de terre, à l'étendue de la terre ou à l'approvisionnement.

L'agroforesterie comme option pratique d'exploitation

Dans quelle mesure ces contraintes affectent-elles l'agroforesterie? Cette question est cruciale lorsqu'il s'agit d'établir les avantages de l'agroforesterie, pour la fertilité du sol comme sur d'autres plans. Plus l'agroforesterie est largement applicable en tant qu'option d'exploitation agricole, plus il est nécessaire d'en évaluer les bénéfices et d'en améliorer les techniques.

Type de terre. A ses tout débuts, l'agroforesterie moderne était considérée comme particulièrement adaptée aux terres marginales, exposées à des risques de sécheresse, d'érosion ou de faible fertilité des sols. S'il en était ainsi, l'étendue de ses applications potentielles serait considérablement réduite, tout en couvrant encore de vastes régions.

L'inventaire des systèmes agroforestiers établi par l'ICRAF montre à l'évidence que tel n'est pas le cas. On trouve des systèmes agroforestiers dans des régions humides, sur des terres en pente douce et sur certains des sols les plus fertiles, aussi bien que dans des environnements plus arides. Par exemple, le système de jardins de case des Chagga est établi sur des sols relativement riches, alors que des systèmes de cultures intercalaires et de pâturages sous cocotiers existent principalement sur des sols plats, alluviaux, et dans les deux cas avec des précipitations abondantes (Nair, 1984-88, 1987b). Des recherches agroforestières sont en cours aussi bien dans des régions fertiles que sur des terres marginales, par exemple dans la plaine de Lilongwe du Malawi Central, la région agricole la plus riche du pays.

C'est parce que les problèmes d'utilisation des sols étaient supposés plus sérieux en général dans les zones marginales que l'on a eu recours à l'agroforesterie en premier lieu. Dans les premières années du Programme de collaboration de l'ICRAF, les environnements comportant des pentes fortes étaient sur-représentés; ils sont également communs dans l'inventaire des systèmes. Il existe certes des séries de conditions environnementales et sociales pour lesquelles le potentiel de l'agroforesterie est particulièrement élevé: par exemple, les terres montagneuses densément peuplées où les problèmes d'érosion, de déclin de la fertilité, de déboisement et de pénurie de bois de feu sont fréquents (Young, 1986c, 1989b).

Pour un type d'environnement important, celui des plaines alluviales, le potentiel de l'agroforesterie est probablement moindre que sur les terres érodées, à moins que la recherche ne démontre le contraire. On a enregistré plusieurs systèmes combinant les arbres avec la riziculture inondée (Tran Van Nao, 1983; Weerakoon et Gunasekera, 1985).

L'agroforesterie est donc potentiellement applicable à un très large éventail de types de terres dans les régions tropicales. Différentes pratiques sont applicables dans des environnements différents, par exemple, les brise-vent à usages multiples

dans les régions semi-arides, ou les arbres pour la conservation du sol sur les terres en pente. Des recherches sur l'évaluation des terres pour l'agroforesterie sont nécessaires pour identifier les types d'environnement qui conviennent particulièrement à des pratiques agroforestières spécifiques (Young, 1984a).

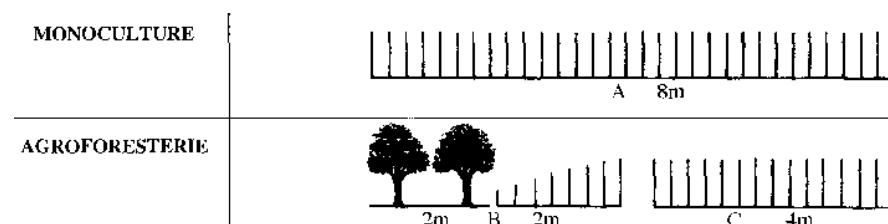
Etendue des terres. On a mentionné une contrainte liée à l'étendue des terres pour la mise en jachère et l'utilisation d'engrais vert, ce qui signifie que ces pratiques exigent plus de terre que nécessaire à des fins productives. Dans le contexte de l'agroforesterie, deux questions sont essentielles:

- si les arbres sont cultivés avec des plantes herbacées (cultures ou pâturages), le rendement des plantes herbacées est-il réduit?
- si oui, le rendement des arbres dépasse-t-il la différence de rendement des plantes herbacées?

Exprimée en termes économiques, la première question devient: "Dans une combinaison donnée d'arbres et de plantes herbacées, ces deux composantes sont-elles complémentaires (la présence de l'une augmente le rendement de l'autre), additionnelles (sans interaction mutuelle) ou compétitives (la présence de l'une réduit le rendement de l'autre)?"

Les systèmes traditionnels et les recherches récentes apportent des exemples aussi bien de gains que de pertes de rendement de la culture ou du pâturage après l'introduction de ligneux. Si l'on devait découvrir que, dans un grand nombre d'environnements et de conceptions agroforestières, les arbres conduisent à une perte de production vivrière, cela réduirait sérieusement le potentiel de l'agroforesterie. Dans certaines pratiques agroforestières spatiales, telles que les plantations de lisière ou les ligneux sur ouvrages de conservation, l'élément ligneux occupe du terrain qui serait autrement improductif. Dans d'autres, notamment les cultures intercalaires avec haies, il y a une réduction inévitable de la superficie cultivable (perçue par le profane comme l'un des obstacles majeurs à l'agroforesterie). On observe souvent également une baisse du rendement de la culture près de l'interface arbre-culture.

La question revient alors à savoir si une augmentation de rendement par unité de surface cultivée amenée grâce au contrôle de l'érosion et à l'amélioration de la fertilité par les arbres fait plus que compenser la perte de surface cultivable et une certaine réduction de la production près de l'interface. La figure 5 illustre ce problème, en comparant la monoculture avec un système agroforestier zonal dans lequel les arbres occupent jusqu'à 25% du terrain. Dans tous les cas, on suppose une réduction de moitié du rendement de la culture sur 2 m d'interface. Dans le premier cas, le rendement de la culture éloignée de l'interface n'est pas plus élevé que sur la surface témoin; la production totale est plus faible, de même que le revenu économique. Dans le deuxième cas, la présence d'arbres augmente le rendement de la culture de 40% loin de l'interface; ce n'est pas suffisant pour compenser les effets combinés du décalage et de la réduction due à l'interface, et la production est ici aussi plus faible, mais cette perte est un peu plus que compensée financièrement par le revenu tiré des arbres. Le troisième cas montre une augmentation de production de 80% par unité de surface cultivée (réaliste étant donné le contrôle de l'érosion), conduisant à une augmentation de 12,5% du rendement cultural pour la totalité de la superficie cultivée.



Rendement et production (unités arbitraires)

Figure 5 - Décalage entre cultures et ligneux, rendement, production et valeur

	CAS 1		CAS 2		CAS 3	
	Rendement par mètre	Production	Rendement par mètre	Production	Rendement par mètre	Production
MONOCULTURE:						
Unité A	100	800	100	800	100	800
AGROFORESTERIE:						
Unité B	50	100	70	140	90	180
Unité C	100	400	140	560	180	720
Total Culture		500		700		900
Ligneux		200		200		200
Valeur	1 unité de culture = 1 unité monétaire					
	1 unité ligneuse = 0,75 unité monétaire					
MONOCULTURE		800		800		800

AGROFORESTERIE	650	850	1050
	CAS 1: Perte de production	CAS 2: Production réduite mais compensation économique	CAS 3: Rendement cultural et production totale accrue

Les cas décrits dans la figure 5 peuvent être mis en parallèle avec les systèmes agroforestiers de rotation dans lesquels il y a une pure alternance d'arbres et de cultures, produisant un décalage dans le temps. Cela ne s'applique pas au système taungya, car la production de la culture chevauche la croissance des arbres. Dans les systèmes spatiaux mixtes, l'interface est plus ou moins omniprésente et il y a souvent très peu de décalage spatial ou de réduction de la surface cultivée: la question se résume alors à savoir si le rendement culturel est plus élevé avec ou sans les arbres. Savoir lequel des trois cas est susceptible de prévaloir dans diverses circonstances est fondamental pour la recherche agroforestière.

Approvisionnement. Les principaux intrants nécessaires à l'agroforesterie, en plus de ceux nécessaires à l'agriculture, sont le matériel génétique et les plants. Bien que des pénuries locales temporaires soient possibles, il n'existe pas de problème intrinsèque d'approvisionnement. Les pépinières locales sont simples et relativement peu onéreuses à mettre en place. Dans les projets de développement agroforestiers, le montant des dépenses engagées n'est en rien comparable à celui, par exemple, de la construction de barrages ou de routes. La contrainte liée à l'approvisionnement en engrains est susceptible d'être réduite ou de se maintenir.

A l'heure actuelle, les coûts principaux liés à la mise au point de l'agroforesterie concernent la recherche et la formation. Celles-ci demeureront nécessaires, mais l'ampleur actuelle des besoins est un phénomène temporaire, né de la prise de conscience croissante du potentiel de l'agroforesterie pour le développement. En ce qui concerne les intrants et l'investissement, l'agroforesterie est donc une forme de développement relativement peu exigeante, qui ne pose pas de sérieux problèmes d'approvisionnement.

L'agroforesterie est aussi une option d'aménagement facilement réalisable au niveau de l'exploitation. Elle n'exige ni investissement important ni machinerie, et les agriculteurs peu formés peuvent aisément apprendre les techniques nécessaires pour s'occuper des arbres.

Résumé. En ce qui concerne les trois contraintes à son application, l'agroforesterie se situe comme suit:

- type de terre:
étant donné le nombre de pratiques, l'agroforesterie est applicable à un large éventail de types de terre, avec un plus grand potentiel pour certains d'entre eux;
- étendue de terre:
beaucoup de pratiques agroforestières impliquent, suite à l'occupation par des arbres, une certaine réduction de la superficie cultivée. Cette perte de surface cultivée peut être compensée soit par l'augmentation de rendement par unité de surface cultivée, soit par une production ligneuse qui compense la perte de production agricole. C'est à la recherche de déterminer laquelle de ces situations s'applique aux différents cas;
- approvisionnement:
L'agroforesterie n'exige aucun intrant susceptible de manquer ou qui doit être importé et payé en devises étrangères; c'est une forme de développement relativement peu coûteuse pour le gouvernement comme pour l'agriculteur.

L'agroforesterie est donc très largement applicable comme option pratique d'exploitation, tant au niveau du gouvernement qu'à celui de l'agriculteur.

L'agroforesterie comme option pratique d'exploitation
• Type de terre: la grande variété de pratiques permet d'appliquer l'agroforesterie à une grande diversité de conditions environnementales.
• Etendue de terre: la plupart des pratiques agroforestières, à l'exception de celles par rotations, ne sont pas extensives.
• Approvisionnement en intrants: l'agroforesterie n'exige pas d'intrants coûteux ou rares. C'est une forme relativement peu onéreuse de valorisation de la terre.
• Technique: la technique utilisée, qui consiste en la gestion des arbres, est généralement familiale aux agriculteurs.
• L'agroforesterie est donc une option pratique d'exploitation largement applicable.

Chapitre 8: Effets des ligneux sur les sols

Comment savons-nous que les arbres améliorent le sol?

Le principe fondamental selon lequel les arbres améliorent le sol sous-tend toute considération sur le rôle de l'agroforesterie dans l'entretien de la fertilité. Il convient d'exposer comment nous savons qu'il en est bien ainsi, avant d'examiner en détail les processus et les preuves:

- le qui se forme sous la forêt claire naturelle ou la forêt dense, la terre brune classique des régions tempérées ou la terre rouge des régions tropicales, est fertile. Il est bien structuré, a une bonne capacité de rétention de l'humidité, il résiste à l'érosion et possède une réserve de fertilité dans les éléments nutritifs liés en molécules organiques. Depuis les temps immémoriaux, les paysans savent qu'ils obtiendront une bonne récolte en plantant sur forêt naturelle

défrichée;

- les cycles du carbone et des principaux éléments nutritifs sous végétation naturelle ont été mis en évidence, en particulier en forêt tropicale humide mais aussi en savane et dans les écosystèmes semi-arides. Ces cycles sont relativement fermés. Ainsi, non seulement nous pouvons observer le fait que les arbres maintiennent la fertilité du sol, mais nous connaissons les détails de ces processus;
- la pratique de l'agriculture itinérante démontre que la forêt est capable de restaurer la fertilité. De nos jours, cette pratique est souvent considérée comme indésirable pour l'environnement, d'autant plus que la pression démographique sur les terres a obligé à raccourcir les périodes de jachère. Cependant, moyennant suffisamment de terres et donc une période de jachère suffisamment longue, cette pratique est durable et prouve la capacité de la forêt ou des terres boisées de restaurer la fertilité perdue pendant la période de mise en culture;
- la foresterie de réhabilitation, ou le reboisement de terres érodées ou autrement dégradées, a démontré le pouvoir des arbres de reconstituer la fertilité du sol, notamment en Inde;
- enfin, parmi ces considérations générales, il faut noter le déclin presque inévitable de la fertilité du sol constaté à la suite de la coupe à blanc de la forêt.

Tableau 13 - Propriétés des sols en dessous des arbres.

A. Nord-Ouest de l'Inde, climat semi-aride (Aggarwal, 1980)			
Eléments nutritifs disponibles à deux niveaux du sol (kg/ha)	Sous <i>Prosopis cineraria</i>	Sous <i>Prosopis juliflora</i>	Terrain nu
N: 0 à 15 cm	250	203	
15 à 30 cm	193	212	196
P: 0 à 15 cm	22	10	8
15 à 30 cm	10	5	4
K: 0 à 15 cm	633	409	370
15 à 30 cm	325	258	235
B. Nord du Nigeria, climat de savane sèche (Radwanski et Wickens, 1981)			
Propriétés du sol	Jachère sous <i>Azadirachta indica</i>	Terre agricole en jachère nue	
pH	6,8	5,4	
Carbone organique C (%)	0,57	0,12	
Azote total N (%)	0,047	0,013	
P (ppm)	68	195	
	(plus faible)		
T.E.B. (me/100 g)	2,40	0,39	
C.E.C. (me/100 g)	2,25	1,70	
Saturation en calions (%)	98	20	
C. Californie, Etats-Unis, aride avec eau souterraine (Virginia, 1986)			
Eléments nutritifs (mg/kg)	Sous <i>Prosopis glandulosa</i>	Au-delà du couvert	
NO ₃ - N	195,62		
PO ₄ - P	7,70,8		

Transects arbre-sol

La comparaison des propriétés du sol sous la cime d'arbres isolés avec celles du sol environnant sans couvert d'arbres apporte de nouvelles preuves des effets des ligneux sur le sol. Pour *Faidherbia albida*, on a enregistré des cas d'augmentation de 50 à 100% de la matière organique et de l'azote sous les arbres, en même temps qu'une augmentation de la capacité de rétention de l'eau (Felker, 1978). Sous climats semi-arides, il est courant de trouver des teneurs plus élevées en matière organique et en éléments nutritifs sous les cimes des arbres que sur le terrain découvert avoisinant (tableau 13). Le maïs et le sorgho mis en pots avec de la terre provenant de sol prélevé sous des arbres au nord du Nigeria poussaient 2 à 3 fois plus vite qu'avec de la terre provenant d'un sol sans arbres; l'ordre de fertilité était *Azadirachta indica* > *Prosopis juliflora* = *Eucalyptus camaldulensis* > pas d'arbres (Verinumbe, 1987).

Cette méthode a pris de l'extension avec la technique des transects arbre-sol, échantillons linéaires prélevés depuis le tronc des arbres jusqu'à la zone située au-delà du couvert des arbres. Jusqu'à présent, cette méthode a été appliquée aux savanes naturelles. Dans la zone subhumide à tendance humide du Bélgica, des transects arbre-sol d'arbres de savane à larges feuilles ont montré une richesse considérable en azote, phosphore, potassium, calcium et autres bases sous les arbres, les

différences commençant près de la limite du couvert et augmentant en direction du tronc (Figure 6A). Les isoplèthes de calcium et de magnésium et la saturation en cations métalliques ont été cartographiés sur la base d'une grille d'échantillonnage de la couche arable. La prise d'échantillons en profondeur a montré que pour une espèce, l'enrichissement de la couche arable se faisait apparemment aux dépens de valeurs plus faibles à 20 à 40 cm, mais pour d'autres, l'effet positif de l'arbre se prolongeait en profondeur. Le dégagement des racines a montré des systèmes étonnamment peu profonds, qui ont conduit à attribuer ces différences non pas à l'extraction d'éléments des horizons profonds du sol, mais à l'effet cumulatif dans le temps de la rétention préférentielle d'éléments nutritifs apportés par l'atmosphère, conduisant à un cycle nutritif plus riche entre le sol et l'arbre sous ce dernier (Kellman, 1980).

Sur un luvisol sableux dans la zone semi-aride du nord du Sénégal, les flux de carbone organique du sol, d'azote total et d'azote minéral ont montré une diminution progressive du tronc à la limite du couvert sous *Acacia senegal*, *Balanites aegyptica* et *Adansonia digitata* (baobab) (Figure 6B). On a considéré ce résultat soit comme l'effet direct de la litière ligneuse, soit comme un effet secondaire, l'évapotranspiration réduite permettant une meilleure croissance des plantes herbacées (Bernhard-Reversat, 1982). A Tlaxcala au Mexique (climat subhumide), des ligneux associés à du maïs ont influencé les propriétés du sol dans un rayon de 6 à 10 m; sous *Prunus capuli* et *Juniperus* sp., l'azote (N) était 1,5 à 3 fois plus abondant sous les ligneux, le phosphore (P) 4 à 7 fois, le potassium (K) 1,5 à 3 fois et le calcium, le magnésium, le carbone et la capacité d'échange cationique (CEC) étaient également augmentés (Altieri *et al.*, 1986) (Figure 6C).

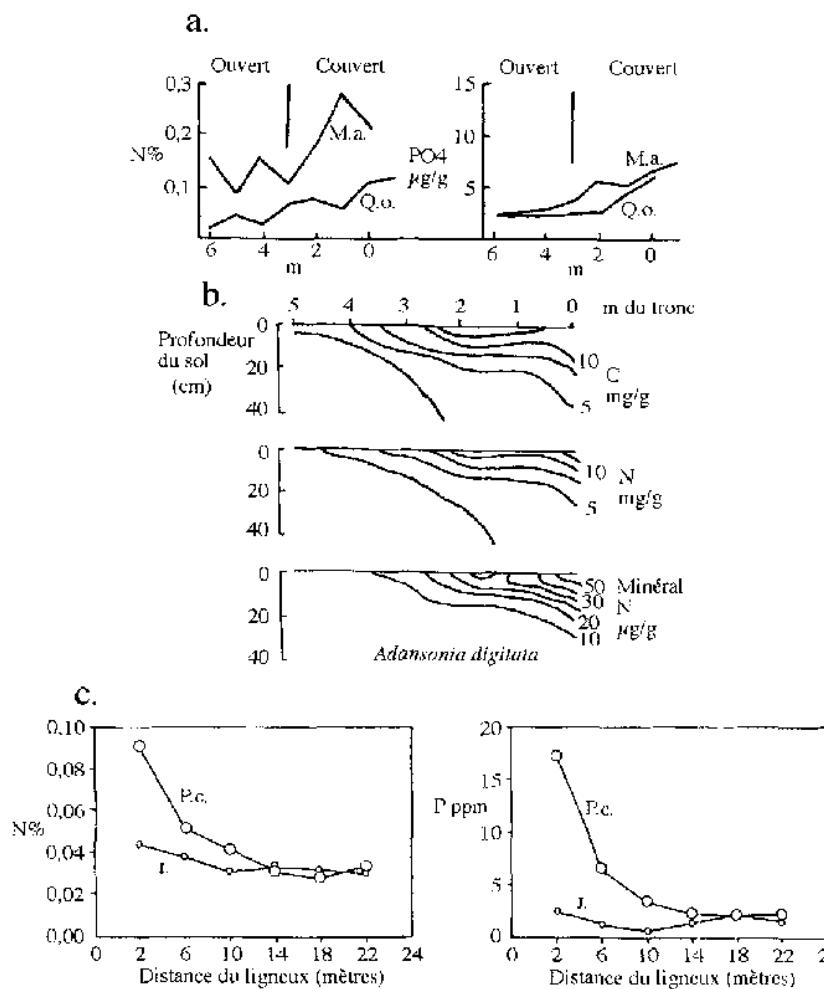


Figure 6 - Transects arbre-sol.

A. Savane, Belize, couche arable. M.a.= *Miconia albicans*, Q.o.= *Quercus oleoides* (d'après Kellman, 1980).

B. Terre de pâturage semi-aride, Sénégal (d'après Bernhard-Reversat, 1982).

C. Tlaxcala, Mexique, P.c.= *Prunus capuli*, J.= *Juniperus sp. pl.* (d'après Altieri et al., 1986).

Les recherches en cours dans les régions semi-arides du Parc national occidental du Tsavo au Kenya ont montré des teneurs nettement plus élevées en matière organique et en azote, une plus grande activité microbienne et en particulier une plus forte teneur en phosphore sous le couvert des baobabs (*Adansonia digitata*) et des *Acacia tortilis*. Il faut noter, parmi les causes possibles, les fientes d'oiseaux et les excréments d'éléphants. Les propriétés physiques du sol étaient meilleures sous les arbres et l'humidité était retenue plus longtemps. La croissance de l'herbe était presque deux fois plus rapide et la composition des espèces herbacées tout à fait différente. La biomasse microbienne était de 30% supérieure (Belsky et al, 1989).

Un tel enrichissement du sol peut résulter de bien des causes: l'écoulement sur l'écorce de l'arbre, le captage préférentiel d'intrants atmosphériques, la meilleure assimilation d'éléments nutritifs en profondeur, la réduction des pertes par lessivage au niveau des racines ou l'effet des animaux et des oiseaux. Les animaux (sauvages et domestiques), comme les humains, préfèrent se tenir sous les arbres pour autant que leurs activités le leur permettent; ils concentrent donc sélectivement les éléments nutritifs provenant des terres avoisinantes sur lesquelles ils paissent.

Il y a là un terrain fertile pour la recherche! La technique de base du transect pourrait également être appliquée à des lignes de bouquets de ligneux dans les systèmes agroforestiers, et aux arbres nouvellement plantés aussi bien qu'à la végétation naturelle. Citons, par exemple, les transects d'expériences sur l'interface ligneux/culture, en travers des haies dans les systèmes de culture intercalaire avec haies et en travers des rideaux abris. On peut faire preuve de beaucoup d'inventivité dans la conception de méthodes permettant de séparer les diverses causes de différenciation des sols.

Tableau 14 - Processus par lesquels les ligneux maintiennent ou améliorent les sols (les effets figurant sur la liste ne sont pas tous prouvés; voir texte).

Processus qui augmentent les apports au sol
• entretien ou augmentation de la matière organique du sol par la fixation du carbone par la photosynthèse, et son transfert au travers de la litière et de la décomposition des racines;
• fixation de l'azote par certaines légumineuses et quelques ligneux non légumineux;
• assimilation d'éléments nutritifs: prélèvement d'éléments nutritifs libérés par altération de la roche dans les couches plus profondes du sol;
• apport atmosphérique: création par les ligneux de conditions favorables à l'apport d'éléments nutritifs par la pluie et la poussière, y compris par les précipitations au sol et l'écoulement sur l'écorce;
• exsudation par la rhizosphère de substances stimulant la croissance.
Processus qui réduisent les pertes du sol
• protection contre l'érosion et donc contre la perte de matière organique et d'éléments nutritifs;
• récupération d'éléments nutritifs: captage et recyclage d'éléments qui autrement seraient perdus par lessivage, y compris par l'action de systèmes de mycorhizes associés aux racines des ligneux et l'exsudation par les racines;
• réduction du taux de décomposition de la matière organique par l'effet d'ombrage.
Processus qui affectent les conditions physiques du sol
• maintien ou amélioration des propriétés physiques du sol (structure, porosité, capacité de rétention d'humidité et perméabilité) par la combinaison de l'entretien de la matière organique et des effets dus aux racines;
• fragmentation des couches compactes ou durcies par les racines;
• modification des extrêmes de température du sol par la combinaison de l'ombrage dû au couvert et de la couverture de litière.
Processus qui affectent les conditions chimiques du sol
• réduction de l'acidité par l'addition de bases à la litière des ligneux;
• réduction de la salinité ou de la sodicité.
Processus biologiques du sol et leurs effets
• production d'une série de qualités différentes de litière végétale par l'apport d'un mélange de matériels ligneux et herbacés, y compris les résidus de racines.

- répartition dans le temps de la libération des éléments nutritifs, grâce au potentiel de contrôle de la décomposition de la litière par la sélection des espèces ligneuses et la gestion de l'élagage de manière à synchroniser la libération des éléments nutritifs provenant de la décomposition de la litière avec les besoins des plantes en éléments nutritifs;
- effets sur la faune du sol;
- transfert des assimilats entre systèmes racinaires.

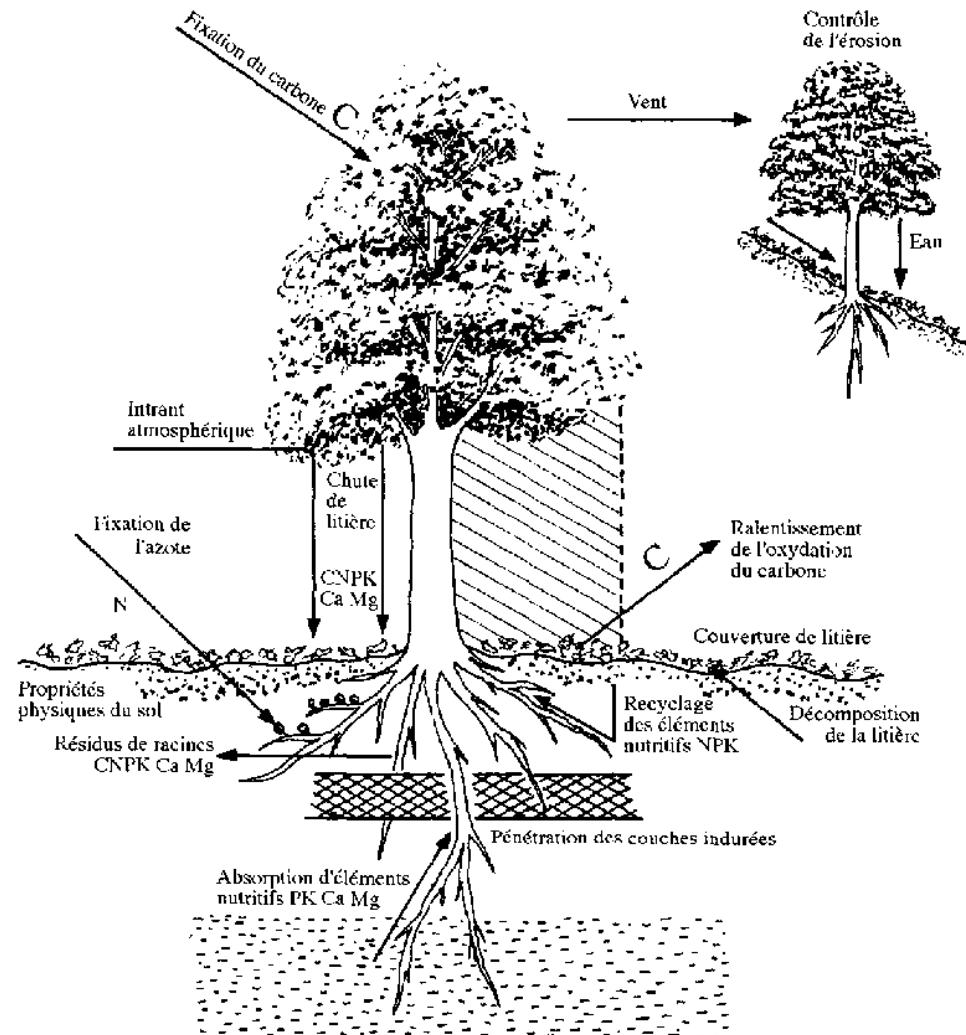


Figure 7 - Processus par lesquels les ligneux améliorent les sols.

Comment les ligneux améliorent-ils les sols

- en augmentant les apports (matière organique, fixation d'azote, assimilation d'éléments nutritifs);
- en réduisant les pertes (matière organique, éléments nutritifs) en favorisant le recyclage et en contrôlant l'érosion;
- en améliorant les propriétés physiques du sol, y compris la capacité de rétention d'eau;
- par les effets bénéfiques sur les processus biologiques du sol

Processus d'amélioration du sol

Le tableau 14 et la figure 7 montrent les effets connus ou possibles des arbres sur les sols. Ils se réfèrent à un couvert de buissons ou d'arbres en général, sans viser spécifiquement les systèmes agroforestiers. Ces effets vont d'effets prouvés et quantitativement démontrés à des hypothèses plausibles mais non vérifiées. L'encadré de cette page montre la position de chacun des effets suggérés, dont beaucoup sont discutés plus en détail dans les sections suivantes.

Processus qui accroissent les apports au sol

Maintien ou accroissement de la matière organique du sol. C'est un processus prouvé et largement démontré, englobant la formation de matière organique dans les jachères forestières, la foresterie de réhabilitation et les chrono-séquences de formation du sol sur sédiments récents. Des études du cycle de la matière organique en forêt naturelle l'ont démontré en termes quantitatifs.

Fixation de l'azote. Processus prouvé, indirectement par des études du bilan de l'azote du sol et directement par l'observation de la nodulation et des études de marquage à l'azote 15.

Assimilation des éléments nutritifs. Cette hypothèse est plausible, mais n'a pas été démontrée spécifiquement. On suppose en général que les ligneux sont plus efficaces que les plantes herbacées dans l'assimilation d'éléments nutritifs libérés par l'altération qui se produit dans les horizons profonds du sol. Du potassium, du phosphore, des bases et des oligoéléments sont libérés par la décomposition des roches, en particulier dans les horizons B/C et C dans lesquels les racines des ligneux pénètrent dans bien des cas. La forte variation dans la teneur en éléments nutritifs entre les couches superficielles et les couches sous-jacentes des sols de forêt indique un recyclage à travers la litière, bien que d'autres processus entrent également en jeu. Il serait difficile d'obtenir une preuve directe.

Apport atmosphérique. Les dépôts d'origine atmosphérique apportent une contribution importante au recyclage des éléments nutritifs, d'autant plus dans les régions humides que dans les régions sèches. Il s'agit des éléments nutritifs dissous dans l'eau de pluie (dépôts pluviaux) et ceux contenus dans la poussière (dépôts éoliens). Les ligneux n'augmentent pas la pluviosité, mais ils réduisent certainement la vitesse du vent et par là, assurent des conditions favorables au dépôt de poussières.

Le cas des éléments nutritifs contenus dans les précipitations au sol et l'écoulement sur écorce, c'est-à-dire les gouttes de pluie tombant du couvert de ligneux et celles qui s'écoulent le long du tronc, est plus complexe. Ces éléments sont présents en quantités importantes et constituent, dans certaines forêts, la principale source de potassium, de sodium et de soufre (supérieure même à la litière). Il cépendant difficile de déterminer dans quelle mesure les proportions d'éléments nutritifs dissous proviennent du lessivage des feuilles (et donc du recyclage) ou du lavage (donc d'un apport atmosphérique direct), et les estimations varient largement (Parker, 1983).

Il serait utile de réaliser des expériences comparatives entre l'accumulation d'éléments nutritifs sur les sites boisés et sur les sites découverts. Un élément agroforestier pourrait être ajouté en incluant dans l'expérience des sites avec des ceintures de ligneux (par exemple, brise-vent, cultures en couloirs avec haies).

Exsudation par la rhizosphère de substances stimulant la croissance. Ce phénomène a été suggéré, mais non démontré. Des études biochimiques spécialisées seraient nécessaires pour démontrer la présence et l'ampleur d'un tel effet, et pour le séparer d'autres effets des racines sur la croissance végétale.

Processus qui réduisent les pertes de sol

Protection contre l'érosion. Elle a été discutée dans la 2e partie du présent document. Il faut retenir que (1) le principal effet néfaste de l'érosion est la perte de matière organique et d'éléments nutritifs, entraînant un abaissement du rendement des cultures; (2) un couvert forestier réduit l'érosion à de faibles niveaux, principalement grâce à l'effet de couverture de la litière et du sous-étage de végétation, la protection assurée par la voûte des arbres étant relativement ténue.

Récupération d'éléments nutritifs. On suppose généralement que les systèmes racinaires des ligneux interceptent, absorbent et recyclent les éléments nutritifs en solution dans le sol, qui auraient autrement été perdus par entraînement, et bouclent ainsi plus étroitement le cycle des éléments nutritifs. Les systèmes de mycorhizes associés aux racines des ligneux jouent un rôle dans ce processus grâce à leur pénétration d'une grande proportion du volume du sol, ce qui permet l'absorption des éléments qui ne peuvent migrer que sur de courtes distances. Ce mécanisme a été mis en évidence par la présence, constatée en forêt, de cycles nutritifs relativement fermés. L'efficacité des mycorhizes est démontrée par les effets quelquefois spectaculaires de l'inoculation de mycorhizes sur la croissance végétale (Atkinson *et al.*, 1983; CIPEA, 1986). La démonstration directe du processus de récupération des éléments nutritifs demanderait des études par marquage isotopique, comparant l'assimilation d'un engrangé marqué sous couvert végétal ligneux et non ligneux.

Réduction du taux de décomposition de la matière organique. On sait que le taux de perte de matière organique humifiée est plus faible en forêt qu'en terrain cultivé. L'ombrage fourni par le couvert des arbres et la couverture de litière, en abaissant les températures, explique en partie cet effet.

Processus qui affectent les conditions physiques du sol

Maintien ou amélioration des propriétés physiques du sol. Les caractéristiques supérieures de structure du sol, de porosité, d'humidité et de résistance à l'érosion sous la forêt ont été largement décrites, de même que leur diminution en cas de

défrichement. La porosité est la clé de beaucoup d'autres propriétés physiques: les pores de 5 à 50 µm de diamètre déterminent la capacité de rétention d'eau, tandis que ceux de plus de 250 µm sont nécessaires à la pénétration des racines. De nombreuses études attestent de l'influence des propriétés physiques des sols tropicaux sur la croissance des cultures, indépendamment des éléments nutritifs ou d'autres effets (Lal et Greenland, 1979).

Ameublissement des couches compactes ou indurées par les racines. Ce potentiel des ligneux a été démontré dans les plantations forestières.

Modification des extrêmes de température du sol. Des études réalisées sur le travail minimum du sol ont révélé qu'une couverture de litière réduit fortement les températures extrêmement élevées de surface, dépassant parfois 50°C, que connaissent les sols nus des régions tropicales; il a en outre été prouvé que les températures élevées nuisent à la croissance des cultures (Harrison-Murray et Lal, 1979). La couverture de litière de feuilles fournie par les ligneux produit sans aucun doute des effets comparables.

Processus qui affectent les conditions chimiques du sol

Réduction de l'acidité. Les ligneux tendent à modérer les effets du lessivage par l'apport de bases à la surface du sol. Cependant, étant donné les ordres de grandeur impliqués, on peut douter que la litière de ligneux augmente de manière significative le pH des sols acides, exception faite de la libération de bases qui se sont accumulées pendant les longues années de croissance des ligneux, notamment lors du défrichement ou dans le système *chitemene* d'agriculture itinérante.

Réduction de la salinité ou de la sodicité. Le reboisement a été utilisé avec succès comme moyen de réhabilitation des sols salés et alcalins. Par exemple, sous *Acacia nilotica* et *Eucalyptus tereticornis* à Karnal (Inde), on a enregistré un abaissement du pH de la couche arable de 10,5 à 9,5 en cinq ans, et de la conductivité électrique de 4 à 2, mais l'établissement de ligneux était assisté par l'addition de gypse et de fumier (Gill et Abrol, 1986; Grewal et Abrol, 1986). Dans ce type de foresterie de réhabilitation, l'amélioration du sol est sans doute due en partie à l'amélioration du drainage par des fossés, ce qui permet un meilleur lessivage. Le rôle des ligneux pourrait être testé par comparaison avec des parcelles de contrôle bénéficiant du même drainage, de la même amélioration du sol et autres mesures de gestion, mais dépourvues de ligneux.

Processus biologiques du sol et leurs effets

Production de diverses qualités de litière végétale. Elle a pour effet de répartir dans le temps la libération des éléments nutritifs minéralisés par la décomposition de la litière. Les ligneux produisent des résidus ligneux aussi bien qu'herbacés, donc diverses qualités de litière couvrant la surface du sol et de résidus des racines. On ignore si les résidus ligneux confèrent aux sols des propriétés distinctives, ou s'ils contribuent à la différenciation de certaines fractions d'humus.

Liberation progressive d'éléments nutritifs. Compte tenu de la diversité de qualité des résidus ligneux, leurs différents taux de décomposition entraîneront l'étalement dans le temps de la libération d'éléments nutritifs. Dans les systèmes aménagés, cette libération peut être en partie contrôlée par la sélection d'espèces ligneuses basée sur les taux de décomposition des feuilles et par le choix du moment d'élagage. Il est donc possible de synchroniser partiellement la libération d'éléments nutritifs de la litière avec les besoins d'assimilation des plantes. Cette hypothèse est fondamentale dans le programme sur la biologie et la fertilité des sols tropicaux (TSBF) (Swift, 1984, 1985, 1987; Ingram et Swift, 1989).

Effets sur la faune du sol. Les ligneux modifient grandement le, espèces et les quantités d'animaux vivant dans le sol, généralement dans un sens favorable à la fertilité, mais il y a encore beaucoup à apprendre à ce sujet. On a émis l'hypothèse que les arbres d'ombrage, dans les plantations, exercent un effet indirect spécifique, en limitant les adventices grâce à l'ombrage, ce qui entraîne une utilisation réduite d'herbicides chimiques dont l'effet est nocif pour la faune du sol (Beer, 1987).

Transfert des assimilats entre systèmes racinaires. Un transfert direct de matière entre les systèmes racinaires, peut-être par des liaisons de mycorhizes, a été suggéré (Fitter, 1985). S'il était prouvé, cela pourrait constituer un mécanisme de transfert d'éléments nutritifs des ligneux aux cultures.

Effets défavorables

Les ligneux peuvent avoir des effets directement défavorables sur les propriétés du sol, alors que leurs effets sont différents lorsqu'ils sont cultivés en association avec des plantes herbacées. Outre le problème de l'ombrage, capital au niveau de l'interface arbre/culture mais sans rapport avec le sol, les principales difficultés qui peuvent se présenter en rapport avec le sol figurent au tableau 15.

Perte de matière organique et d'éléments nutritifs par la récolte de produits ligneux. L'épuisement des ressources du sol par les ligneux à croissance rapide est une préoccupation pour la foresterie, par ses conséquences sur les rotations ultérieures. Les ligneux amassent des quantités considérables d'éléments nutritifs dans leur biomasse, dont une partie est nécessairement enlevée lors de la récolte. Le problème est le plus grave lorsqu'il y a exploitation d'arbres entiers avec, le plus souvent, ramassage du petit bois et de la litière par les populations locales après l'abattage. Du point de vue de la gestion du sol, il est souhaitable de laisser toutes les branches et la litière se décomposer sur place et même de laisser l'écorce, mais il y a fréquemment conflit avec les nécessités sociales - cela semble totalement déraisonnable aux populations locales! En agroforesterie, le potentiel d'amélioration des sols par les ligneux est grandement réduit si le feuillage et le bois sont l'un et l'autre recueillis, comme fourrage et comme bois de feu.

Compétition entre ligneux et cultures pour les éléments nutritifs. En général, les ligneux sont moins exigeants en éléments nutritifs que les cultures. Le problème est susceptible de devenir sérieux lorsque les arbres ou buissons ont un système racinaire établi qui peut dominer celui des cultures annuelles nouvellement plantées. En agroforesterie, il est souhaitable que les ligneux aient des systèmes racinaires qui pénètrent profondément mais s'étendent peu latéralement. Alors que l'étalement latéral du couvert peut être contrôlé par l'élagage, la taille des racines est généralement trop coûteuse pour être praticable.

Compétition entre ligneux- et cultures pour L'humidité. Dans les zones de savane semi-aride et sèche, la compétition pour l'humidité est peut-être le problème le plus sérieux pour la recherche et la conception en agroforesterie. Discuter de la compétition pour l'humidité du sol n'entre pas dans le cadre de la présente étude.

Tableau 15 - Effets défavorables des ligneux sur les sols.

- | |
|--|
| • perte de matière organique et d'éléments nutritifs par la récolte des produits ligneux |
| • compétition entre ligneux et cultures pour les éléments nutritifs; |

- compétition entre ligneux et cultures pour l'humidité;
- production de substances inhibitrices de la germination ou de la croissance;
- acidification par les ligneux qui produisent de l'humus de type mor.

Production substances qui inhibent la croissance ou la germination. Certaines espèces d'*Eucalyptus* produisent des toxines qui peuvent inhiber la germination ou la croissance de certaines plantes herbacées annuelles (Poore et Fries, 1985). On a suggéré que la production de substances allélopathiques par les racines des ligneux pouvait constituer un problème en agroforesterie, bien qu'il existe peu de preuves.

Acidification par des ligneux produisant un humus de type mor. Ce problème est fréquent dans les plantations de conifères de la zone tempérée.

Chaque fois qu'une diminution de croissance est observée dans une culture ou sur un pâturage situés sous des arbres ou des arbustes ou à proximité, il est important de déterminer dans quelle mesure c'est dû à l'effet d'ombragé, à la compétition pour les éléments nutritifs, à la compétition pour l'humidité, à l'inhibition de la croissance ou à une suppression de la lumière par la litière de feuilles.

Chapitre: Matière organique du sol

Matière organique et fertilité du sol

De tous les effets des ligneux, celui de maintenir les niveaux de la matière organique (MO) des sols par l'apport de litière et de résidus racinaires est le principal facteur d'amélioration de la fertilité. C'est la cause première dont dépendent bon nombre d'autres processus d'amélioration du sol (tableau 16).

La matière organique agit principalement sur les propriétés physiques du sol et sur l'approvisionnement en éléments nutritifs. Les effets physiques se produisent par l'action des gommes organiques et des mycelia fongiques qui lient les particules du sol en agrégats, et par la croissance et le pourrissement des systèmes racinaires. Ceci entraîne le maintien de la structure des sols et leur stabilité structurelle, et une distribution équilibrée de la dimension des pores, tant pour les pores fins (rétenzione d'eau) que pour les pores grossiers (transmission). Les conséquences sont une combinaison de la capacité de rétention de l'eau avec la perméabilité et l'aération, la facilité de pénétration des racines et, par l'alliance d'une structure stable avec la perméabilité, la résistance à l'érosion.

Tableau 16 - Effets de la matière organique sur la fertilité du sol.

Effets premiers	Conséquences
Effets physiques	
Liaison de particules, action racinaire conduisant à une stabilité structurale améliorée, équilibre entre pores fins, moyens et gros	Amélioration de la pénétration des racines, de la résistance à l'érosion et des propriétés hydriques: capacité de rétention de l'eau, perméabilité, aération
Effets chimiques	
Source d'éléments nutritifs, approvisionnement équilibré, non sujet au lessivage, avec libération lente, partiellement contrôlable	Y compris une meilleure réponse aux engrains, source d'azote non acidifiant, minéralisation du P sous des formes utilisables
Complexification et disponibilité augmentée des micro-éléments	Meilleure retenue des éléments nutritifs des engrains
Accroissement des échanges cationiques	
Disponibilité en P améliorée par blocage des lieux de fixation	
Effets biologiques	
Création d'un environnement favorable à la fixation de l'azote	
Activité faunique accrue	

Note: Voir Young (1976), Swift et Sanchez (1984), Lal et Kang (1982), IRRI (1984), Piccolo (1986), Dusal (1986), Johnston (1986).

Le tout forme un ensemble interactif de processus qui produisent des propriétés physiques favorables tant que la matière organique est maintenue; la perte de matière organique conduit à une dégradation des sols qui peut aller, en cas de perte importante, de la formation d'une cuirasse ou d'une croûte jusqu'au compactage.

L'effet chimique principal concerne l'approvisionnement en éléments nutritifs, avec trois aspects favorables: l'apport est équilibré entre les éléments nutritifs primaires, secondaires, et les oligo-éléments: tant qu'ils restent sous la forme de molécules organiques, ils sont protégés du lessivage (sauf dans le cas spécial des podzols); et il y a une libération lente des éléments nutritifs, sous des formes utilisables, par la minéralisation. Cette libération est, dans une certaine mesure, synchronisée avec les besoins des plantes par le fait que la décomposition de la litière est la plus rapide au début des pluies; la capacité de déterminer la période d'élagage et l'addition de litière permet, en agroforesterie, de régulariser la libération d'éléments nutritifs de manière à la synchroniser encore mieux avec les besoins des plantes.

D'autres effets favorables de la matière organique (MO) sur l'approvisionnement en éléments nutritifs sont le blocage des sites de fixation du phosphore par les complexes organiques et la complexification et la disponibilité accrue des micro-éléments. On a également suggéré qu'un bon statut de la MO fournit un environnement pédologique propice à la fixation de l'azote.

Il convient de souligner une limite à la capacité des résidus organiques à fournir des éléments nutritifs, à savoir que ce qui n'existe pas au départ ne peut être recyclé. Si le matériel parental est pauvre en phosphore ou en K, si fermé que soit le système sol-plante, il ne peut s'enrichir en ces éléments sans apports extérieurs.

Fonctions de la matière organique dans le maintien de la fertilité du sol

- sous tous les systèmes d'utilisation des terres: elle maintient de bonnes conditions physiques du sol, y compris la capacité de rétention de l'eau;
- dans les systèmes à faibles taux d'intrants: elle fournit des éléments nutritifs de façon équilibrée, les protège contre le lessivage jusqu'à ce qu'ils soient relâchés par la minéralisation;
- dans les systèmes à taux moyen ou élevé d'intrants: elle conduit à une utilisation plus efficace des engrains par l'amélioration de la capacité d'échange des ions, un recyclage plus important et l'apport de micro-éléments.

Un autre effet chimique est le renforcement considérable de la capacité d'échange cationique (CEC) par le complexe argilo-humique; ceci est particulièrement important lorsque la CEC des minéraux argileux est faible, comme dans les sols dominés par des minéraux kaoliniques et des oxydes de fer libres, tels que les ferralsols et les acrisols. Augmenter la CEC améliore la rétention des éléments nutritifs, tant des éléments recyclés naturellement que de ceux apportés dans les engrains. On a souvent observé une meilleure réponse aux engrains dans les sols avec un bon statut de la matière organique.

L'humus du sol exerce également une action tampon contre l'acidité. Alliée aux propriétés non acidifiantes des sources naturelles d'azote, cette action permet de résoudre le problème de l'acidification du sol.

Quant aux effets de la matière organique sur l'activité biologique du sol, on a noté un lien possible avec la fixation de l'azote. L'humus est le substrat de la faune du sol et tandis que celle-ci est la cause principale des pertes de MO par oxydation, on note aussi des effets favorables, tels que la rupture des résidus de pesticides. Swift (1984, p.17) donne une liste de 22 liaisons possibles entre les processus biologiques du sol et les pratiques de gestion.

Deux des aspects ci-dessus sont des thèmes majeurs du programme TSBF, qui vise à préciser les options de gestion permettant d'améliorer la fertilité des sols tropicaux par des processus pédobiologiques. Le thème de la synchronie (SYNCH) vise à décrire les mécanismes qui déterminent le transfert des éléments nutritifs de la MO en décomposition jusqu'aux racines des plantes. La compréhension de ces mécanismes devrait permettre de synchroniser le transfert des éléments nutritifs par des pratiques de gestion. Le thème de la MO du sol (MOS) vise à établir les relations entre les intrants organiques et inorganiques du sol et la quantité et la qualité de la MO formée, une fois encore dans le but de comprendre les processus qui permettraient la manipulation par la gestion. Les publications successives de ce programme montrent qu'on reconnaît de plus en plus que l'agroforesterie fournit quelques-unes des principales options pratiques d'exploitation pour améliorer la fertilité par des processus pédobiologiques (Swift, 1984, 1985, 1987, Woomer et Ingram, 1990).

Nature de la matière organique du sol

Généralités

La matière organique du sol est très complexe et sa nature fait l'objet d'études spécialisées, bien éloignées du cours normal de la recherche agroforestière. Nous donnons ici un aperçu de quelques-uns de ces aspects pour deux raisons. D'abord, ceux qui conduisent des études sur les effets des systèmes agroforestiers sur les sols devraient savoir que la MO du sol n'est pas une entité simple ni homogène. Ensuite, les ligneux diffèrent des cultures en ce qu'ils fournissent du bois aussi bien que des résidus herbacés, et il peut s'avérer que ces matières ligneuses apportent une contribution déterminante à la MO du sol. Le lecteur trouvera à la fin de cette section une hypothèse de travail pour la recherche agroforestière.

Fractions de la matière organique

En termes physiques, le matériel organique présent dans le sol est constitué de deux parties, des résidus végétaux et de la MO complètement décomposée ou humus. Quand on prépare un sol pour l'analyse, on enlève généralement les plus gros morceaux de litière végétale et de racines, la première en la grattant de la surface avant de prélever l'échantillon, les secondes par criblage au tamis de 2 mm lors du prétraitement. Mais il reste des fragments végétaux en morceaux très fins mais seulement partiellement décomposés. C'est ce qu'on a appelé la fraction légère de la MO, étant donné qu'on peut la séparer par dispersion ultrasonique et flottaison (densité < 2). Cette fraction peut abriter jusqu'à 25 % des réserves nutritives stockées dans le sol (Ford et Greenland, 1968; Ford et al., 1969).

Les premiers travaux sur le cycle de la MO du sol étaient axés sur les deux composants: litière et humus (où la "litière" incluait les restes de racines). Dans le processus de conversion de la litière en humus par l'action de la faune du sol, il y a une perte de carbone par oxydation microbienne. L'importance de cette perte est l'une des plus grandes inconnues dans le cycle du carbone. Nye et Greenland (1960) ont suggéré que de 10 à 20% du carbone de la litière étaient transformés en humus du sol, contre 20 et 50% des résidus racinaires. On y fera référence sous le nom de *perte de conversion de la litière à l'humus* c'est-à-dire 80 à 90% pour les résidus végétaux de surface et 50 à 80% pour les racines.

Après la transformation en humus, la perte de carbone se poursuit, toujours par oxydation microbienne. Le concept fondamental est que la quantité de carbone ainsi perdue est proportionnelle à celle présente initialement, la raison étant que la taille de la population des organismes responsables dépend du substrat sur lequel ils se nourrissent, c'est-à-dire le matériel organique. La proportion de carbone humique du sol perdu par oxydation pendant un an est la *constante de décomposition de l'humus*. Au départ de calculs basés sur les échanges de carbone et les niveaux d'équilibre sous culture itinérante, Nye et Greenland ont estimé que la constante de décomposition sous Jachère forestière (Kf) était de 0,03, et qu'en période de culture (Kc), où le sol est plus perturbé, de 0,04 (en pourcentages, 3 et 4% respectivement). L'équation qui en découle se présente sous la forme

$$C_1 = C_0 - KC_0$$

$$\text{ou } C_1 = C_0(1 - K)$$

dans laquelle C_0 est le carbone humique initial du sol, C_1 le carbone après une année et K , la constante de décomposition.

Ces deux paramètres, la perte de conversion et la constante de décomposition, sont la base des premières approches du bilan de la MO. Le tableau 17 donne des estimations de ces valeurs. Cette approche est toujours valable, moyennant certaines réserves, et reste la base de nombreuses recherches appliquées.

Tableau 17 - Evaluation de la perte de conversion de la litière à l'humus et de la constante de décomposition de l'humus. Les résultats ne sont pas tout à fait comparables, en raison de la différence d'hypothèses.

Pays, environnement	Perte de conversion de la litière à l'humus en 1 an (fraction)	Constante de décomposition de l'humus(fraction)	Source
<i>Afrique de l'Ouest</i>			
Forêt	en surface au-dessus du sol:	Kf = 0,03 Kc = 0,033	Nye et Greenland (1960)
Savane	- 0,75 à 0,9 racines: 0,5 à 0,8	Kf = 0,008 à 0,009 Kc = 0,045	
<i>Sénégal</i>			
Savane boisée	0,5 à 0,9	Kf = 0,04 à 0,07 Kc = 0,02 à 0,05	Charreau et Fauck (1970)
Savane forestière		Kf = 0,44 Kc = 0,06	Charreau (1975)
		K = 0,02 à 0,09	
<i>Nigeria</i>			
Savane		Kc = 0,04 à 0,05	Jones et Wild (1975) Jenkinson et Ayanaba (1977)
Subhumide mouilleux		K = 0,07	
Costa Rica	0,65	K = 0,13	Sauerbeck et Gonzalez (1977)
Royaume-Uni Tempéré		Ka = 0,014	Jenkinson et Rayner(1977)
		Kb = 0,00035	
Costa Rica	0,64 à 0,77	r = 0,12 à 0,23	Gonzalez et Sauerbeck (1982)
Queensland		Ka = 0,153 à 0,371	Dalal (1982)
		Kb = 0,022 à 0,0036	
Australie du Sud	0,7		Ladd et Amato (1985)
Thailande		K = 0,077 à 0,088	Kyuma et al. (1985)
Royaume-Uni Tempéré		Kn = 0,028	
Etats-Unis Tempéré		Kn = 0,024 à 0,063	
			Lathwell et Bouldin (1981) de sources citées
Zaïre		Kn = 0,330	
Assam, Inde		Kn= 0,099	
Puerto Rico		Kn = 0,224	

Kf = SOI/S végétation (jachère) Kc = SOUS culture Ka Kb = diverses fractions de la matière organique Kn = pour la libération de l'azote r = voir le texte.

Un nouvel éclairage a été projeté sur la décomposition de la MO avec la technique du marquage isotopique. Des végétaux qui ont poussé dans une atmosphère artificiellement en carbone 14 acquièrent des tissus porteurs de cet isotope. La quantité de carbone 14 présente peut être détectée quel que soit l'état physique du végétal. En ajoutant au sol ce matériau marqué, on peut suivre son évolution ultérieure. Les méthodes sont décrites par Vose (1980).

Cette technique a d'abord été appliquée aux sols dans un environnement tempéré, puis sous les tropiques. Les principales études et revues fondées sur la méthode isotopique dont s'inspire le compte rendu ci-après sont: Jenkinson (1977), Jenkinson et Ayanaba (1977), Jenkinson et Rayner (1977), Sauerbeck (1977, 1983), Sauerbeck et Gonzalez (1977), Schnitzer (1977), IAEA (1977), Paul et Van Veen (1978), Cerri et al. (1982), Gonzalez et Sauerbeck (1982). Van Faassen et Smilde (1985), Ladd et Amato (1985).

Lorsqu'on ajoute au sol des résidus végétaux enrichis en carbone 14, on observe une courbe de décomposition de même type dans les sols tempérés et dans les sols tropicaux. Cette courbe montre une perte rapide dans les 3 à 6 premiers mois et se transforme brutalement en une courbe plus lente et exponentielle (fig. 8). Une étude comparative sous climat tempéré (Rothamsted, G.B.) et sous climat tropical subhumide (Ibadan, Nigeria) montre deux courbes qui peuvent se superposer presque exactement pourvu que l'on divise par 4 l'échelle du temps du Nigeria. Des travaux réalisés ultérieurement en Australie méridionale, sous des conditions climatiques intermédiaires, ont montré un taux de décomposition égal à la moitié de celui d'Ibadan. Au Costa Rica, dans un environnement tropical humide, le taux était semblable à celui de l'étude nigériane. Cette dernière étude a été conduite sur différents sols pour voir dans quelle mesure les résultats variaient en fonction des propriétés du sol; contrairement aux attentes, les différences étaient relativement faibles et ne laissaient apparaître aucune relation.

Les courbes de décomposition exponentielle du carbone sont de la forme:

$$C_t = C_0 e^{-rt}$$

où C_t est le carbone après un temps t en années, e est la constante exponentielle et r un paramètre qui décrit le taux de décomposition.

Pour des périodes d'un an et des taux lents (K et $r < 0,1$) les deux équations précédentes sont presque équivalentes et K est presque égal à r . La demi-vie du carbone humique du sol, $t_{1/2}$ (années), est donnée par:

$$t_{1/2} = 0,693 \cdot r$$

où 0.693 est le logarithme naturel de 2.

Lorsqu'on a une courbe en deux parties, comme dans la figure 8, l'équation pour la décomposition devient

$$C_t = C_1 \cdot e^{-r_1 t} + C_2 \cdot e^{-r_2 t}$$

où C_1 et C_2 sont les fractions de carbone en décomposition la plus rapide et la plus lente et r_1 et r_2 les valeurs correspondantes de r .

Dans les résultats de Gonzalez et Sauerbeck (1982) au Costa Rica, C_1 allait de 52 à 72% du carbone total et C_2 allait de 28 à 48%. Les valeurs de r_1 se situaient surtout dans la fourchette de 3,4 à 7,4 et celles de r_2 , de 0,12 à 0,23. Les valeurs trouvées par Jenkinson et Ayanaba (1977) pour le Nigeria sont comparables.

Pour trois raisons, on peut penser qu'il existe une troisième fraction de MO avec un taux de décomposition considérablement plus lent. La première est que depuis longtemps, la datation de la MO du sol au radiocarbone fournit quelquefois des valeurs anormales en centaines d'années. étant donné les valeurs de r_1 et r_2 , il est possible de prévoir l'équilibre du carbone du sol, qui est de l'ordre de 1,5 à 3 fois l'ajout annuel de litière; toutefois, les valeurs observées sont bien plus élevées, ce qui laisse présager qu'une troisième fraction doit exister, avec un taux de décomposition substantiellement plus lent. La troisième preuve vient de la décomposition dans ces mêmes expériences de carbone non marqué, c'est-à-dire de carbone déjà présent dans le sol au début de l'expérience de marquage. Celui-ci est perdu bien plus lentement que le carbone marqué, à un taux d'environ 3% par an, valeur qui, dans les premiers travaux, était prise comme constante de décomposition. Ce carbone non marqué est supposé inclure un mélange de matériaux ajoutés récemment et de matériaux plus vieux; pour obtenir une différence dans les taux entre le carbone marqué (entièrement ajouté récemment) et le carbone non marqué, une partie du matériel plus ancien doit avoir un taux de décomposition considérablement plus lent.

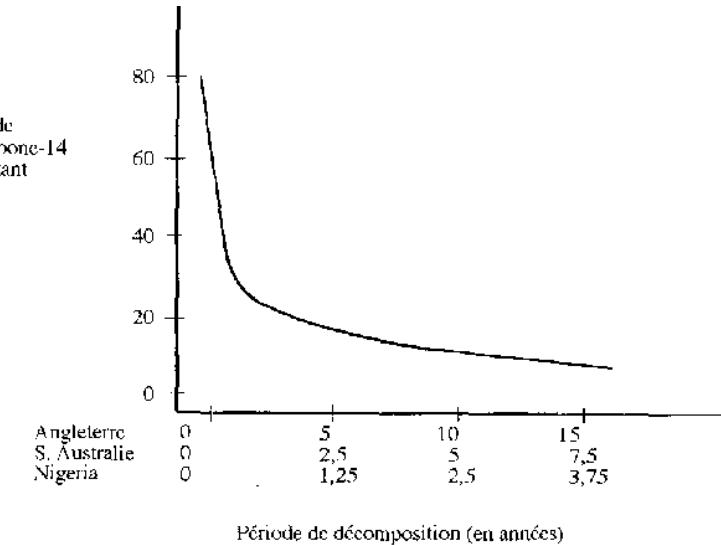


Figure 8 - Courbe de décomposition pour la perte de résidus végétaux ajoutés au sol après marquage au carbone 14 (d'après Ladd et Amato 1985).

Si l'on associe ces deux approches, il paraît probable que la "perte de conversion" des premiers travaux correspond au matériel à décomposition rapide dans les études du carbone 14. C'est-à-dire que le matériel organique qui est perdu en six mois ou moins est formé de litière pulvérisée mais pas complètement décomposée et qui n'a pas atteint le stade humique. Ceci indique l'existence d'au moins trois fractions de MO du sol, dont seules la deuxième et la troisième sont de l'humus:

- des résidus végétaux non humifiés, avec une demi-vie dans les sols tropicaux de moins de six mois; on peut considérer alternativement cette fraction comme la perte de conversion de la litière à l'humus;
- de l'humus *labilis* ou instable avec une demi-vie dans les sols tropicaux de l'ordre de trois ans;
- de l'*humus stable*, capable de se maintenir dans le sol pendant plus de 50 ans.

Le matériau non humifié et l'humus instable seront probablement les principaux agents de la libération des éléments nutritifs. On a suggéré que l'humus stabilisé contribue particulièrement au maintien des propriétés physiques du sol, mais rien n'a permis de le confirmer ni de l'inflimer.

Les propositions émises sur la nature des différentes tractions de la litière et de la MO du sol sont indiquées au tableau 18. Les deux premières lignes se rapportent au matériau non humifié, la troisième au carbone pendant son passage par la faune du sol, et les autres à l'humus.

Implications pour l'agroforesterie: recherche spécialisée

Le principe généralement admis est que la fraction stable, à décomposition lente, de l'humus a son origine dans la transformation microbienne de la fraction labile, en tant que métabolites. Le maintien de la fraction stable serait alors dépendant d'un apport continu de matériau labile, et la dégradation de ce dernier aurait pour résultat un déclin retardé et ralenti du matériau stable.

Une alternative possible serait que les résidus de plantes riches en lignine contribuent directement, ou du moins favorisent, la formation de la fraction humique stable. S'il en était ainsi, il en résulterait pour l'agroforesterie une implication sur la gestion, à savoir que lorsque c'est possible, les rameaux et les petites branches devraient être laissés à pourrir avec la litière feuillue au lieu d'être enlevés pour faciliter les opérations agricoles.

Une hypothèse plus générale, née au sein du programme sur la biologie et la fertilité des sols tropicaux, serait que les qualités différentes de litière végétale contribuent différemment aux propriétés et au maintien de l'humus (Swift, 1987; Ingram et Swift, 1989; Woomer et Ingram, 1990). C'est clairement le cas en ce qui concerne les taux de décomposition de la litière et la libération qui s'ensuit d'éléments nutritifs avant l'humification. Nous ignorons encore si le maintien ou l'enlèvement des résidus ligneux a des implications sur la nature et le maintien de l'humus du sol. Les conditions physiques du sol sont particulièrement favorables sous les écosystèmes forestiers naturels, où il y a un équilibre entre résidus herbacés et résidus ligneux. En termes très généraux, le potentiel de l'agroforesterie pour fournir ces deux types de résidus est un point en sa faveur. Une expérience à long terme basée sur l'approvisionnement de parcelles avec des résidus herbeux seulement, avec des résidus ligneux seulement et avec un mélange des deux, devrait permettre de faire la lumière sur ce point.

Tableau 18 - Fractionnement de la matière organique de la litière et du sol. Les fractions indiquées sur la même ligne ne sont pas nécessairement équivalentes.

Jenkinson et Rayner (1977)	Rosswall (1984)	Coleman (1985) Parton <i>et al.</i> (1987)
Matériel végétal décomposable	Litière végétale instable	Carbone végétal métabolique
Matériel végétal résistant	Litière végétale réfractaire	Carbone végétal structural
Biomasse du sol	Biomasse microbienne, nécromasse et métabolites	Carbone du sol actif (microbien)
Humus stabilisé physiquement	Matière organique stabilisée	Carbone du sol lent
Humus stabilisé chimiquement	Matière organique ancienne	Carbone du sol passif

Ce qui précède est en grande partie matière à des recherches pédologiques par des institutions à caractère spécial. Le travail sur les isotopes est fait par un réseau à la division conjointe FAO/AIEA à Vienne, en Autriche, qui a inclus récemment l'agroforesterie dans son champ d'intérêts (IAEA, sous presse; Young, sous presse,

c) Des progrès dans les connaissances dans ces domaines spécialisés pourraient avoir une portée considérable pour l'agroforesterie.

Hypothèse de travail pour le suivi du sol dans la recherche agroforestière en général

La plupart des stations de recherche agroforestière ne veulent ou n'ont pas les moyens de conduire de tels travaux spécialisés. Cependant, le suivi des changements du sol devrait faire partie intégrante de la plupart des travaux expérimentaux en agroforesterie, tant des études d'interactions ligneux/cultures que des essais de systèmes. A cette fin, une hypothèse de travail doit être définie: bien que n'ignorant pas la complexité du sujet, elle doit permettre d'obtenir des résultats utiles avec les méthodes standard d'échantillonnage et d'analyse.

Nous savons très peu de choses sur la fraction humique stable, en dehors de son existence; elle constitue une partie du carbone organique donné par la méthode d'analyse standard (Walkley-Black) et de la matière organique donne par la méthode de chauffage à 375°C. Son taux de perte par oxydation n'est pas connu et si elle est un tant soit peu affectée par la gestion, elle ne l'est que lentement. C'est la fraction instable qui présente un intérêt particulier pour des recherches de méthodes pratiques de maintien de la fertilité du sol, car elle peut être augmentée ou réduite en quelques années par l'apport de résidus végétaux.

L'humification de la litière végétale se déroule à la surface ou dans les couches superficielles du sol, 15 à 30 cm tout au plus, où la MO impose sa couleur au sol. C'est là que se concentre la plus grande partie de l'activité biologique (autre que celle des termites). On peut raisonnablement supposer que le plus gros de l'humus présent dans les horizons superficiels riches en matière organique se trouve sous forme instable et inversement, que dans les horizons profonds, l'humus, dont la couleur ne domine pas le rouge ou le jaune des oxydes de fer, contient une quantité d'humus stable proportionnellement plus grande.

Pour la facilité, on considère simplement que *tout* le carbone complètement humifié de l'horizon superficiel de couleur sombre appartient à la fraction instable, avec une constante de décomposition de l'ordre de 3 à 10%; et on se concentre principalement, quoique non exclusivement, sur les changements de la MO du sol dans cet horizon. Le suivi, peut-être à plusieurs années d'intervalle, des changements correspondants dans les horizons inférieurs devrait permettre d'établir des relations approximatives avec les changements dans l'horizon de surface

Cycle de la matière organique

Introduction

Sous la végétation naturelle, le niveau de la MO du sol est amélioré ou maintenu; sous une culture pluviale, il décroît. La composante ligneuse de l'agroforesterie est capable de produire une biomasse au moins égale à celle de la végétation naturelle. L'hypothèse de base à considérer est qu'il est possible de mettre au point des systèmes agrosylvicoles où la perte de MO due à la composante culturale est compensée par un gain par la composante ligneuse. Pour être d'un usage pratique, de tels systèmes doivent aussi satisfaire les besoins des utilisateurs du sol pour des cultures vivrières et d'autres produits.

L'étude par les spécialistes de l'écologie du cycle de la MO plantes/sol sous végétation naturelle est un point de départ. Les travaux expérimentaux sur les changements pédologiques sous récoltes continues ou jachères courtes, dont une grande partie vise à trouver un substitut à la culture itinérante, en sont une autre. Ces travaux donnent des informations qu'on peut appliquer à la situation fondamentale des systèmes agrosylvicoles, c'est-à-dire l'association dans l'espace ou dans le temps de ligneux et de cultures.

Le cycle est étudié en termes de carbone organique, supposé constituer la moitié de la matière sèche (MS) du matériel végétal et 58% de la MO du sol. Les résultats sont donnés en kg/ha ou en kg/ha/an.

Le cycle sous la végétation naturelle

La modélisation du cycle de la MO repose sur l'étude classique de Nye et Greenland (1960); la présente section est basée largement sur l'analyse de leurs résultats donnée dans Young (1976). D'autres études remarquables de la végétation naturelle sont celles des forêts humides de plaine par Bernhard-Reversat (1977), Bernhard-Reversat *et al.* (1975), Golley *et al.* (1975) et Jordan (1982); celle des forêts d'altitude par Lundgren (1978); et celle des forêts et des savanes par Lelong *et al.* (1984). Ces dernières études ont confirmé les ordres de grandeur des quantités de carbone stockées et des flux de carbone établis par Nye et Greenland.

Des valeurs représentatives des réserves et des flux de carbone pour deux zones écologiques, humide et subhumide mouilleuse, sont présentées dans la figure 9. Les résultats pour la savane sont subdivisés suivant qu'elle a été brûlée (avec une perte supposée de la végétation de surface) ou non. Les pertes de l'humus en carbone, par oxydation bactérienne, sont évaluées en fonction du concept de la constante de décomposition. Sa valeur sous forêt Kf est estimée à 3% (0,03) et sa valeur

sous culture, K_c , à 4%. L'hypothèse de la constante de décomposition fournit un mécanisme homéostatique où la MO du sol tendra vers une valeur d'équilibre à un niveau constant d'intrants, quel que soit ce niveau. Ce modèle ne tient pas compte de l'existence des diverses qualités de la MO du sol, avec taux d'altération différents.

La figure 9 donne les cycles correspondant aux conditions de la forêt dense humide et de la savane humide, et montre la situation en condition d'équilibre. Les gains humiques égalent les pertes, à 1 900 kg/ha/an dans un environnement forestier et à 1 200 kg/ha/an sous savane. Les teneurs du sol en humus, soit respectivement 63 300 et 57 000 kg/ha/an de carbone, sont équivalents, moyennant un certain nombre de suppositions, aux niveaux de MO du sol de surface de 4,2% sous forêt et de 3,8% sous savane.

Le cycle sous agriculture: cultures continues

Comme base de discussion des flux de carbone sous agriculture, on n'a choisi qu'un seul de ces environnements, celui de la forêt dense humide. On suppose une culture céréalière (par exemple, du maïs) donnant 3 000 kg/ha de grains, représentant des intrants intermédiaires ou une culture améliorée. Il s'agit de choisir si l'on laisse les résidus de culture sur le sol ou non. On suppose que la culture a déjà abaissé l'humus du sol à la moitié de ce qu'il était sous forêt, soit 35 000 kg/ha de carbone. L'indice de récolte (grains en pourcentage de la biomasse épigée) est supposé de 33%, et la biomasse racinaire est estimée à 33% de la biomasse épigée. Les hypothèses sont identiques à celles de la figure 9, à savoir que le rapport entre l'humification et la perte par oxydation est de 15:85 pour les résidus de culture et de 33:67 pour les racines.

On observe une perte nette de carbone du sol atteignant 2,5% de sa valeur initiale avec enlèvement des résidus de récolte, et 1,2% lorsqu'ils sont laissés en place. Le cycle avec enlèvement des résidus est illustré sur la figure 10. En exploitation céréalière continue, le sol se dégrade à une vitesse considérable. Ceci réduit la croissance de la culture, abaisse ainsi les apports de résidus végétaux et accélère la perte. Un équilibre est finalement atteint, mais à un niveau inacceptablement bas de production et avec des propriétés du sol sévèrement dégradées. Un tel lien entre les conditions pédologiques et la croissance des plantes, qui conduit à un taux de dégradation du sol qui va en s'accélérant et au déclin du rendement cultural, peut se démontrer à l'aide du modèle informatique SCUAF (Soil Changes Under Agroforestry; sur les changements du sol en agroforesterie) décrit au chapitre 15.

Le cycle sous un système agroforestier spatial

En prenant les mêmes données de végétation naturelle et de culture continue que dans les descriptions qui précèdent, on peut esquisser une première approximation du cycle de la MO (représentée par le carbone) sous un système agroforestier schématique. Le modèle s'appuie sur les hypothèses suivantes:

- un climat tropical humide, un niveau initial de MO du sol d'environ 60% de celui caractérisant typiquement un sol à texture moyenne de cet environnement;
- une plantation d'arbres qui ont un taux de croissance, et par conséquent une production de litière,
- égaux à ceux d'une jachère forestière naturelle;
- une production céréalière "modérée" (3 000 kg/ha de grain) avec enlèvement des résidus de culture;
- un système agrosylvicole où ligneux et cultures se partagent l'espace à égalité.

Ce cycle schématique s'applique soit à un système agroforestier spatial mixte, soit à un système zonal dans lequel, par un moyen ou un autre, les intrants et les entrants de carbone se répartissent de manière égale dans l'espace sur plusieurs années. Les effets sont semblables pour un système à rotation cultures/ligneux, sauf que la courbe du carbone par rapport au temps est en dents de scie.

Le cycle du carbone est illustré par la figure 11. Les intrants des composants ligneux et culturaux sont inchangés, mais l'hypothèse relative à la constante de décomposition conduit à diminuer approximativement de moitié les pertes par oxydation. Sous la composante culturelle, il y a encore une perte nette annuelle de 860 kg/ha de carbone, mais elle est compensée par un gain net égal sous la composante ligneuse. Globalement, le système agroforestier- sol, organismes du sol, ligneux, cultures et environnement - est stable.

L'hypothèse d'un rapport de 50:50 entre les composants ligneux et culturaux est plausible pour un système où ils sont mélangés dans l'espace mais pas pour la plupart des systèmes zonaux. Toutefois, ceci peut être compensé par les taux de croissance plus élevés qu'on peut obtenir par la gestion des ligneux dans les systèmes spatiaux. Ainsi, on pourrait obtenir le même résultat avec un système de cultures en couloirs avec haies offrant une couverture ligneuse de 25% et un taux de croissance double de celui de la végétation naturelle.

Les perspectives que laisse entrevoir ce résultat sont excitantes. Cela revient à supposer que, pourvu que les hypothèses se vérifient, on peut concevoir des systèmes agroforestiers qui soient productifs en termes agricoles et qui, en même temps, stabilisent la MO du sol.

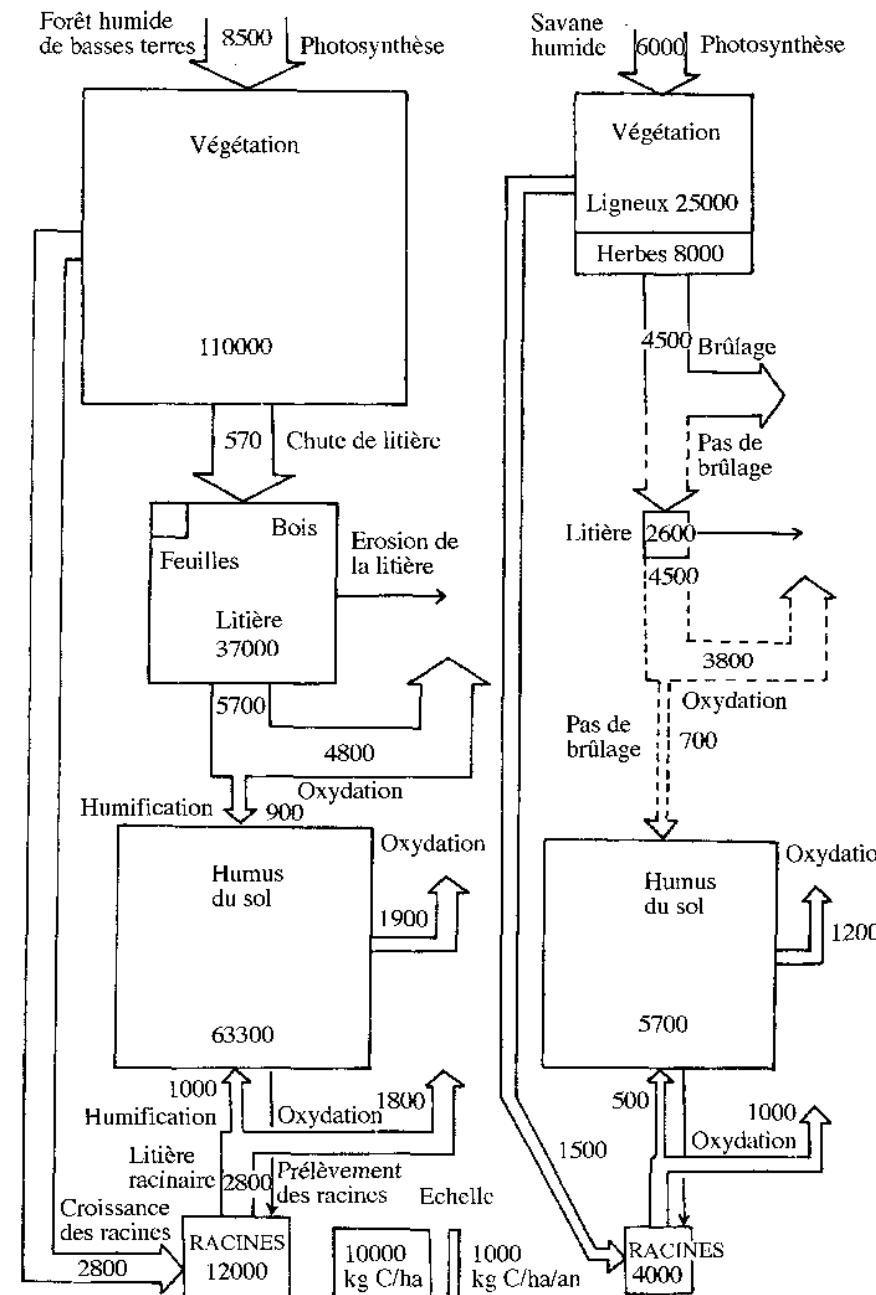


Figure 9 - Cycle du carbone sous végétation naturelle (*d'après Young 1976: p. 111, se basant principalement sur les résultats de Nye et Greenland, 1960*).

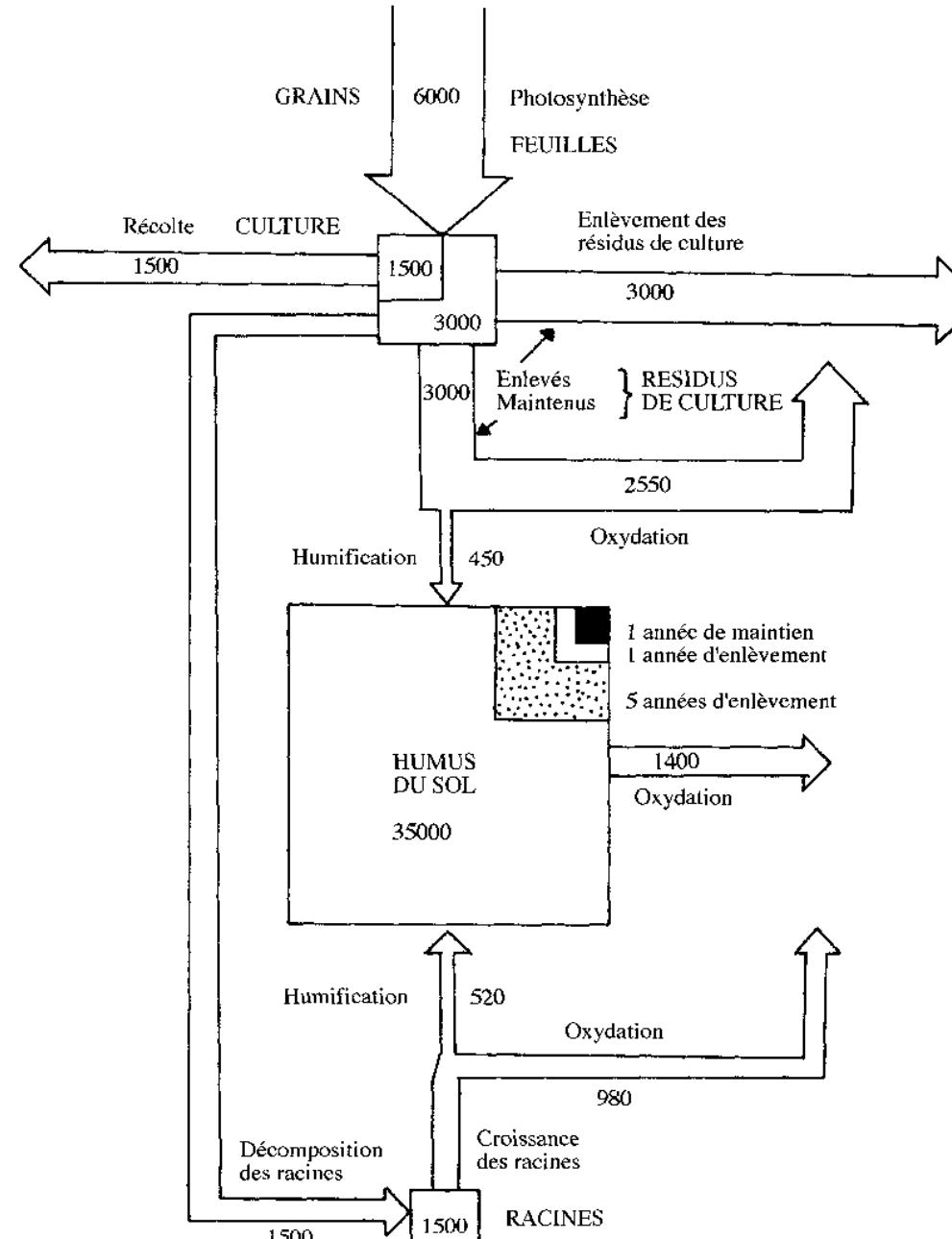


Figure 10 - Cycle du carbone sous une culture céréalière, en zone humide basse, avec une production de 3 000 kg/ha. Les valeurs sont exprimées en kg C/ha et en kg C/ha/an. Les zones ombrées montrent des pertes nettes de carbone du sol.

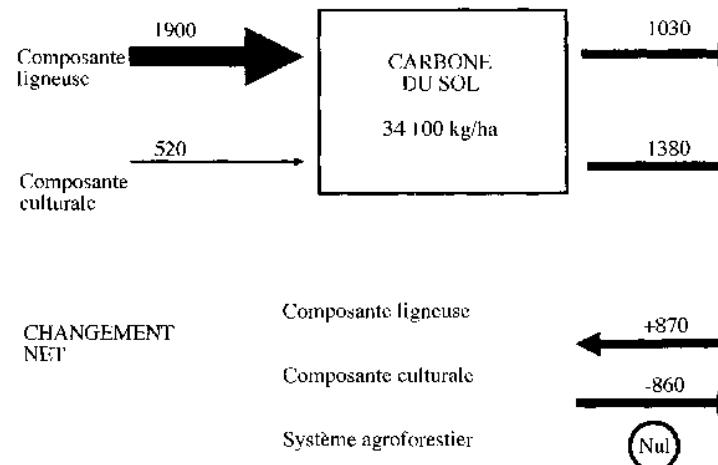


Figure 11 - Changements dans le carbone du sol sous agroforesterie. Données et hypothèses identiques à celles des figures 9 et 10.

Les ligneux comme producteurs de biomasse

Végétation naturelle

Les mesures des taux de production primaire nette en écosystème naturel servent doublement de point de référence pour l'agroforesterie. Premièrement, elles indiquent la productivité biologique relative qu'on peut attendre sous différents climats. Ensuite, elles constitueront les valeurs minimales à attendre si l'on était sûr qu'en agroforesterie, les effets combinés de la sélection des espèces et de leur gestion permettent des taux plus élevés de production de biomasse.

Le tableau 19 reprend en résumé les extrêmes et les valeurs moyennes fournis par la compilation de données primaires. La moyenne la plus représentative pour la forêt dense humide est de 20 000 kg MS/ha/an, les extrêmes allant de la moitié au double de cette valeur; la forêt semi-caduque, sous des climats avec une courte saison sèche, n'a une valeur typique que légèrement plus faible que la forêt sempervirente, mais n'atteint pas les taux très élevés de quelques-unes de ces dernières. Les forêts de haute altitude n'ont pas nécessairement une croissance plus lente; la valeur typique indiquée de 22 000 kg/ha/an est presque identique à celle mesurée ultérieurement en Tanzanie par Lundgren (1978).

Les peuplements de savane montrent une large gamme de productivité, qui diffère entre la savane humide, dominée par des espèces à feuilles larges et par une pluviosité de quelque 1000 mm/an, et la savane sèche, dominée par des espèces à feuilles étroites. Des valeurs de 10 000 kg/ha/an pour la savane humide et 5 000 pour la savane sèche sont représentatives. Les peuplements qui étaient décrits comme brousses prédésertiques ou semblables ont des chiffres inférieurs à 2 500 kg/ha/an.

En résumé, les études des écosystèmes naturels suggèrent certains taux de production primaire nette (MS épigée) en fonction des zones climatiques (cf. ci-dessous).

Tropiques humides sans saison sèche	20 000 kg/ha/an ou plus
Tropiques humides avec brève saison sèche	20 000 kg/ha/an
Tropiques subhumides (mouilleux)	10 000 kg/ha/an
Tropiques subhumides (secs)	5 000 kg/ha/an
Zone semi-aride	2 500 kg/ha/an ou moins

Tableau 19. Production de biomasse par la végétation naturelle. Les valeurs ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) se rapportent à la matière sèche épigée. Les sources sont des rapports se basant sur des données primaires

Communauté végétale	Equivalent climatique (Köppen)	NPP (kg MS/ha/an) fourchette	Valeur moyenne ou typique	Source
---------------------	--------------------------------	------------------------------	---------------------------	--------

Forêt humide sempervirente	Af	10 000 à 35 000	28 000	Lieth (1976)
			23 000	Lieth et Whittaker (1975)
			23 000	Murphy (1975)
		22 000 à 32 000		UNESCO (1978)
		10 000 à 50 000	20 000	Whittaker et Woodwell (1971)
			33 000	Rodin et Basilevic (1968)
Forêt humide semi-caduque	Am	16 000 à 25 000	17 500	Lieth (1976)
			18 000	Lieth et Whittaker (1975)
		13 000 à 17 000		UNESCO (1978)
			21 000	Murphy (1975)
Forêt humide de montagne ("de nuages")	Cf. Cm		22 000	Lieth et Whittaker (1976)
Savane	Aw	2 000 à 29 000	8 000	Lieth (1976)
			9 000	Lieth et Whittaker (1975)
		2 000 à 20 000	7 000	Whittaker et Woodwell (1971)
Savane humide	Aw	5 000 à 15 000	10 000	Murphy (1975)
			7 000	Rodin and Basilevic (1968)
Savane sèche	Aw	3 000 à 8 000	5 000	Murphy (1975)
			7 000	Rodin et Basilevic (1968)
Végétation semi-désertique	BS	100 à 2 500	700	Lieth (1976)
			2 000	Rodin et Basilevic (1968)

Production de biomasse par les arbres utilisés en agroforesterie

Le tableau 20A fournit des exemples de production de biomasse par des végétaux ligneux à usages multiples, poussant soit dans des systèmes agroforestiers soit dans des plantations. Ces résultats sont fragmentaires et seront considérablement étoffés dans quelques années par les résultats d'essais commencés récemment.

La plupart des taux indiqués ne dépassent pas les chiffres de base donnés ci-avant pour la végétation naturelle sous des climats correspondants. Deux espèces qui ont fait l'objet de programmes d'amélioration génétique, *Leucaena* et *Prosopis*, font cependant exception. La plupart des autres données s'étalement entre les taux de production primaire nette typiques de la végétation naturelle et la moitié de ces valeurs.

Les résultats se rapportent à la production de biomasse par la composante ligneuse dans des systèmes pratiques; au Nigeria, les rangées de ligneux sont espacées de 4 m et occupent ainsi quelque 25% de la surface totale du sol. Si l'on ajoute la production primaire nette de la culture, d'environ 10 000 kg/ha/an (avec deux cultures), la production de biomasse totale du système atteint quelque 15 000 kg/ha/an. Le site (IITA, à Ibadan) est proche de la limite entre le climat humide et le climat subhumide frais, aussi ce chiffre est-il à peu près ce que l'on peut attendre des écosystèmes naturels.

Pour un système spatial mixte, il existe plusieurs études sur des associations plantation-culture répandues en Amérique centrale et en Amérique du Sud. Parmi celles-ci, le cafier ou le cacaoyer sont associés à *Cordia alliodora* et/ou *Erythrina poeppigiana*.

La composante *Cordia/Erythrina* fournit à elle seule quelque 10 000 kg/ha/an de biomasse. Dans ces systèmes, la composante culturale est également une plante ligneuse pérenne, et si l'on ajoute sa biomasse, le total atteint quelque 15 000 kg/ha/an. Le tableau 20B montre la production correspondante de matériel foliaire (herbacé) seul. La biomasse est considérablement plus faible, de l'ordre de 2 000 à 4 000 kg/ha/an pour les climats humides et subhumides. Les valeurs de la production fourragère de feuilles réunies dans l'inventaire de l'ICRAF sur les arbres et arbustes à usages multiples sont encore plus faibles, le plus souvent de l'ordre de quelques centaines de kg/ha/an (von Carlowitz, 1986b: p.311).

La répartition de la production de MS entre les quatre composants des plantes, à savoir les feuilles (herbacées), l'appareil reproducteur (fleurs et fruits), le bois et les racines, est d'une importance considérable pour l'agroforesterie, car certains d'entre eux seront récoltés et d'autres retourneront au sol. Ceci ne dépend pas seulement de l'espèce ligneuse mais aussi de la gestion et de l'environnement; par exemple, un apport irrégulier en éléments nutritifs réduit la croissance des pousses épigées par rapport à celle des racines, la récolte des fruits augmente la croissance des parties végétales, tandis que l'enlèvement répété de parties végétales comme dans l'émondage réduit la croissance végétale future. Une étude de la répartition de la MS dans les cultures ligneuses a été faite par Cannell (1985).

Tableau 20 - Production de biomasse par les ligneux à usages multiples. A. Production primaire épigée nette (kg MS/ha/an).

Climat, pays	Utilisation des terres	Ligneux	Production primaire nette (NPP)	Source
Humide				
Malaisie	Plantation	<i>Acacia mangium</i>	18 000	Lim (1985)
Sarawak	Plantation	<i>Acacia mangium</i>	15 500-18 300	Tsai et Hazah (1985)
Philippines	Plantation	<i>Albizia falcataria</i>	11 300	Kawahara <i>et al.</i> (1981)
Costa Rica	Cultures en couloirs	<i>Calliandra calothyrsus</i>	4 390	Baggio et Heuveldorp (1984)
Colombie	Combinaison de culture et de plantation	<i>Caféier + arbres d'ombrage</i>	4 600-13 000	Bornemisza (1982)
Mexique	Combinaison de culture et de plantation	<i>Caféier, Inga sp. pl.</i>	8 400-9 500	Jimenez et Martinez (1979)
Mexique	Combinaison de culture et de plantation	<i>Caféier, Inga sp. pl., bananier</i>	10 250	Jimenez et Martinez (1979)
Costa Rica	Combinaison de culture et de plantation	<i>Erythrina poeppigiana</i>	13 700-22 700	Russo et Budowski (1986)
Costa Rica	Combinaison de culture et de plantation	<i>Cordia alliodora</i>	9 720	Alpizar <i>et al.</i> (1986, 1988)
		<i>C. alliodora + cacaoyer</i>	16 360	
		<i>Erythrina poeppigiana</i>	8 710	
		<i>E. poeppigiana + cacaoyer</i>	15 740	
Philippines	Plantation	<i>Gmelina arborea</i>	12 700	Kawahara <i>et al.</i> (1981)
Hawaii, etc.	Plantation	<i>Leucaena leucocephala</i>	20 000-30 000	Pound et Cairo 1983
Divers	Plantation	<i>Leucaena leucocephala</i>	40 000-80 000	Browbaker (1987)
Subhumide mouilleux bimodal				
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Cassia siamea</i>	7 390	Yamoah <i>et al.</i> (1986b)
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Flemingia congesta</i>	2 370	Yamoah <i>et al.</i> (1986b)
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Gliricidia sepium</i>	4 770	Sumberg (1986)
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Gliricidia sepium</i>	5 410	Yamoah <i>et al.</i> (1986b)
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Gliricidia sepium</i>	3 000-4 500	Bahiru Duguma <i>et al.</i> (1988)
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Leucaena leucocephala</i>	6 770	Kang <i>et al.</i> (1985)
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Leucaena leucocephala</i>	8 000-16 000	Bahiru Duguma <i>et al.</i> (1988)
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Sesbania grandiflora</i>	1 000-3 500	Bahiru Duguma <i>et al.</i> (1988)
Subhumide bimodal				
Sri-Lanka	Culture en couloirs	<i>Leucaena leucocephala</i>	2 800	Weerakoon (1983)
Subhumide				
Inde	Plantation	<i>Leucaena leucocephala</i>	38 200	Mishra <i>et al.</i> (1986)
Divers	Plantation	<i>Leucaena leucocephala</i>	10 000-25 000	Pound et Cairo (1983)
Terres de parcours	Plantation	<i>Leucaena leucocephala</i>	20 000-50 000	Browbaker (1987)
Subhumide sec				
Inde	Plantation	<i>Prosopis juliflora</i>	30 000	Gurumurti <i>et al.</i> (1984)
Aride				
Etats-Unis	Boisement	<i>Prosopis glandulosa</i>	3 700	Rundel <i>et al.</i> (1982)
Aride, avec eau souterraine				
Californie (E.U.)	Boisement naturel	<i>Prosopis glandulosa</i>	4 000	Virginia (1986)

Aride, irrigué				
Etats-Unis	Plantation	<i>Quatre Prosopis sp. pl.</i>	7 000-14 500	Felker <i>et al.</i> (1983)
Divers				
Nigeria/Brésil	Plantation	<i>Gmelina arborea</i>	9 300-24 900	Chijoke (1980)

Tableau 20 - Production de biomasse de ligneux à usages multiples. B. Production de feuilles (kg MS/ha/an).

Climat, pays	Utilisation des terres	Ligneux	Production primaire nette (NPP)	Source
Humide				
Malaisie	Plantation	<i>Acacia mangium</i>	3 060	Lim (1985)
Philippines	Plantation	<i>Albizia falcata</i>	180	Kawahara <i>et al.</i> (1981)
Costa Rica	Culture en couloirs	<i>Calliandra calothyrsus</i>	2 760	Baggio et Heuveldorp (1984)
Philippines	Plantation	<i>Gmelina arborea</i>	140	Kawahara <i>et al.</i> (1981)
Java	Plantation	<i>L. leucocephala,</i>	3 000-5 000	Buck (1986)
		<i>A. falcata</i>		
		<i>Dalbergia latifolia</i>		
		<i>Acacia auriculiformis</i>		
Costa Rica et de plantation	Combinaison de culture	<i>Cordia alliodora</i>	2 690	Alpizar <i>et al.</i> (1986, 1988)
		<i>C. alliodora + cacaoyer</i>	6 460	
		<i>Erythrina poeppigiana</i>	4 270	
		<i>E. poeppigiana + cacaoyer</i>	8 180	
Subhumide mouilleux bimodal				
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Cajanus cajan</i>	4 100	Agboola (1982)
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Gliricidia sepium</i>	2 300	Agboola (1982)
Nigeria	Culture en couloirs	<i>L. leucacephala</i>	2 470	Agboola (1982)
Nigeria	Culture en couloirs	<i>Tephrosia candida</i>	3 070	Agboola (1982)
Subhumide				
Inde	Plantation	<i>L. leucacephala</i>	2 300	Mishra <i>et al.</i> (1986)

La croissance peut être affectée non seulement par l'espèce ligneuse, le climat et le sol, mais aussi par le régime d'élagage. A Ibadan, au Nigeria, des fréquences d'émondage de 3, 2 et 1 mois ont réduit progressivement la production de MS par rapport à un émondage semestriel: des hauteurs de coupe moins élevées ont eu un effet moindre mais encore substantiel (Bahiru Duguma *et al.* 1988). Ainsi les coupes fréquentes, souhaitables pour réduire l'ombrage, peuvent avoir un effet négatif sur la croissance des ligneux; trouver une solution de compromis est l'affaire de la recherche appliquée au niveau local.

La production estimée de biomasse végétale et la proportion qui en sera retournée au sol doivent être estimées pour chaque site donné, chaque système agroforestier, chaque espèce ligneuse et chaque mode de gestion. On peut résumer en termes généraux les propos ci-dessus:

- la production de biomasse par la composante ligneuse des systèmes agroforestiers peut approcher celle de la végétation naturelle dans la même zone climatique, voire la dépasser si les espèces ont fait l'objet d'une amélioration par sélection ou par croisement,
- en ce qui concerne la fourniture de biomasse pour maintenir la MO du sol, il est essentiel de savoir d'abord comment se répartit la biomasse entre les différentes parties de la plante, mais aussi quelles sont les parties de la plante qui retournent au sol comme litière.

Besoins en résidus végétaux pour maintenir la matière organique du sol

Le tableau 21 tente d'estimer, en termes très généraux, la quantité de résidus végétaux à ajouter au sol pour maintenir la MO dans trois zones climatiques des tropiques. L'hypothèse de travail proposée plus haut reste valable: on ne considère que le

carbone du sol superficiel et on suppose que tout ce carbone appartient à la fraction labile. Les valeurs obtenues sont les suivantes:

- *carbone initial du sol superficiel et pourcentage de carbone dans le sol superficiel*: valeurs représentatives de la MO du sol superficiel pour la zone, sous utilisation agricole ou agroforestière, aux niveaux jugés habituellement acceptables pour maintenir les conditions physiques du sol; divisées par 1,72 pour obtenir le carbone;
- *perte par oxydation*. On suppose une constante de décomposition de 0,04;
- *perte par érosion*. Ce facteur variera suivant les conditions du site d'une valeur quasi nulle à des valeurs élevées. On suppose que l'érosion a été réduite à ce qui est normalement considéré comme un taux acceptable, soit 10 t/ha/an. On multiplie par le carbone du sol superficiel, et par 2, le facteur d'enrichissement en carbone des sédiments érodés;
- *addition nécessaire à l'humus du sol*. Somme des pertes par oxydation et par érosion;
- *apports nécessaires de résidus végétaux au sol*. Premièrement, on suppose que les racines représentent 40% de la production épigée primaire nette. La perte de conversion est considérée de 85% pour les résidus épigée et de 67% pour les racines. On suppose que la MS est constituée à 50% de carbone et on arrondit les résultats à la centaine la plus proche.

Tableau 21- Besoins indicatifs de biomasse végétale pour le maintien de la matière organique du sol.

Zone climatique	Carbone dans le sol superficiel à l'origine (kg C/ha)	Carbone dans le sol superficiel (%)	Perte par oxydation (kg C/ha/an)	Perte par érosion (kg C/ha/an)	Addition nécessaire à l'humus du sol (kg C/ha/an)	Apports nécessaires de résidus végétaux sol (kg MS/ha/an)	
						au-dessus du sol	aux racines
humide	30 000	2.0	1 200	400	1 600	8 400	5 800
subhumide	15 000	1.0	600	200	800	4 200	2 900
semi -aride	7 500	0.5	300	100	400	2 100	1400

Etant donné que les racines sont presque invariablement ajoutées au sol, on peut considérer que les résultats correspondent à la biomasse épigée. Sous les tropiques humides, un système d'utilisation des terres devrait, pour maintenir la MO, apporter quelque 8 000 kg MS/ha/an au sol. Pour les zones subhumide et semi-aride, les valeurs correspondantes sont respectivement de 4 000 et 2 000 kg MS/ha/an.

Une comparaison avec le tableau 20 montre qu'il est certainement possible de satisfaire à ces exigences si l'on ajoute la totalité de la biomasse ligneuse au sol, et plus certainement encore si l'on y ajoute les résidus herbacés des cultures. Si l'on récolte la composante ligneuse des arbres, il devient plus difficile de satisfaire aux exigences et ce sera carrément impossible si l'on enlève également le feuillage des ligneux et les résidus de culture. On peut estimer l'équilibre entre les apports et les pertes de carbone humique du sol pour chaque système donné, dans un environnement spécifique, par des calculs semblables; le modèle informatique SCUAF, décrit au chapitre 15, aide à explorer les différentes possibilités.

Qualité de la litière et décomposition

Aussi longtemps que les éléments nutritifs contenus dans la litière des plantes demeurent sous la forme de molécules organiques, ils sont protégés contre le lessivage. Quand la litière se décompose, ces éléments nutritifs sont libérés dans la solution du sol. Ils deviennent alors assimilables par les racines des végétaux, mais en même temps, risquent davantage d'être lessivés du système plante-sol.

Le concept de *qualité* des résidus végétaux se rapporte à leur teneur relative en sucres, en cellulose, en hémicellulose, en lignine et en phénols et aux proportions relatives des éléments nutritifs. Une litière de grande qualité (riche en éléments nutritifs, pauvre en lignine) se décompose et libère rapidement les éléments nutritifs, une litière de pauvre qualité (riche en lignine et/ou en phénols) se décompose lentement (Swift *et al.*, 1979). Les résidus ligneux (tiges, branches, rameaux et crosses racines) sont de maigre qualité, de même que quelques produits herbacés tels que la paille.

Il est évident que les ligneux utilisés en agroforesterie varient largement quant à la qualité et au taux de décomposition. Les feuilles de *Leucaena* disparaissent en quelques semaines, celles de *Cassia siamea* à une vitesse moyenne, tandis que celles de *Gmelina arborea* d'*Acacia mangium* et de nombreuses espèces d'*Eucalyptus* se décomposent plutôt lentement. Par exemple, les émondades de *Leucaena*, de *Gliricidia* et de *Cassia* libèrent la majorité de leur azote dans les 60 jours suivant leur application au sol. Celles de *Leucaena* se décomposent quasiment totalement en 40 jours, et d'autant plus rapidement qu'elles sont appliquées fraîches plutôt que sèches, et enterrées plutôt que laissées à la surface. A Ibadan (Nigeria), pour les mêmes conditions climatiques et pédologiques, la vitesse de décomposition des émondades est *Leucaena leucocephala* > *Gliricidia sepium* > *Cassia siamea* > *Flemingia congesta* (pour les recépages ou la première coupe, l'ordre de *Cassia* et de *Flemingia* est inversé) (Yamoah *et al.*, 1986a, 1986c; Wilson *et al.*, 1986).

En Colombie, la demi-vie de la litière était de 60 jours pour *Albizia carbonaria*, de 80 jours pour *Gliricidia sepium* et *Sesbania grandiflora*, de 120 jours pour *Erythrina* sp. et *Cajanus cajan* et de 170 jours pour *Cassia grandis*. Le taux de décomposition de toutes ces espèces était directement proportionnel à la pluviosité. Pour *Albizia*, *Sesbania* et *Gliricidia* plus de 80% de l'azote, du phosphore et du potassium ont été libérés en 170 jours (Arias, 1988). Dans les résidus de culture, la paille met plusieurs mois à s'aluminer, et les résidus ligneux grossiers, encore plus longtemps.

Le taux de décomposition de la litière s'exprime par la *constante de décomposition de la litière* Klit (couramment exprimé par "k" mais appelé ici Klit pour la distinguer de la constante de décomposition de l'humus du sol). Le taux de changement dans la litière accumulée en surface, dL/dt , est donné par la formule:

$$dL/dt = A - (K_{lit} \times L)$$

où A représente les apports annuels de litière et L, la litière accumulée en surface.

Si $K_{lit} < 1$, le temps moyen de rémanence de la litière en surface est inférieur à un an. C'est le cas de la plupart des écosystèmes naturels sous les tropiques.

La constante de décomposition d'un site pour une espèce de plante donnée est relativement facile à mesurer par la technique du sac de litière (Anderson et Ingram, 1989) Ceci devrait devenir un élément standard de la recherche agroforestière pour arriver à établir des constantes de décomposition des espèces ligneuses communes dans des conditions environnementales données, en particulier par rapport aux principales zones climatiques.

Il y a quatre possibilités de gestion de la litière: le dépôt à la surface du sol, l'enfouissement, le compostage ou l'utilisation fourragère avec retour au sol du fumier. La litière enfouie se décompose plus vite que la litière déposée en surface (Wilson et al., 1986). Le dépôt en surface est souhaitable pour contrôler l'érosion, mais le choix du rythme de libération des éléments nutritifs dépendra de l'interaction du climat, des espèces ligneuses et du calendrier de demande des cultures. Le compostage est courant dans les zones tempérées, pour éviter le déficit d'azote causé par le fort rapport C/N du matériel végétal frais, mais ceci ne semble pas être un problème sous les tropiques où les conditions de décomposition sont plus rapides. Le compostage est une pratique courante dans certains pays tropicaux (par exemple, le Rwanda) et il a ses inébranlables défenseurs (Dalzell et al., 1987). La plupart des systèmes agroforestiers, traditionnels et modernes, ont aujourd'hui recours à l'apport de surface. L'enterrement ou le compostage sont plus souhaitables pour des résidus céréaliers, riches en lignine, que pour des feuilles de ligneux qui donnent généralement une litière de qualité supérieure.

La connaissance des taux de décomposition de la litière permet de jouer sur le rythme de libération des éléments nutritifs. Les besoins des cultures annuelles en éléments nutritifs varient au cours de leur croissance. Aussi est-il bénéfique de faire libérer des éléments nutritifs provenant de la décomposition de la litière en concordance avec les besoins d'assimilation des cultures. De cette façon, le rapport entre l'absorption par la plante et les pertes par entraînement sera augmenté, rendant plus hermétique le système plante-sol. L'idée que la libération des éléments nutritifs et les besoins d'absorption peuvent dans une certaine mesure être synchronisés par des formes de gestion constitue l'une des hypothèses fondamentales du programme sur la biologie et la fertilité des sols tropicaux (L'hypothèse de la synchronie ou "SYNCH") (Swift, 1984, 1985, 1981; Ingram et Swift, 1989; Woomer et Ingram, 1990).

Ceci explique le succès des combinaisons de *Leucaena*, *Gliricidia*, *Flemingia* et *Cassia* avec le maïs. La libération d'azote par les émondages est bien synchronisée avec l'absorption d'azote par le maïs; si les émondages sont appliquées au moment de la germination, l'absorption dépasse la libération après 40 à 50 jours (Yamoah et al., 1986a). Dans les systèmes de cultures annuelles, il semble souhaitable d'utiliser des espèces ligneuses à litière feuillue de grande qualité, non seulement à cause de leur teneur plus élevée en éléments nutritifs, mais aussi parce que la libération des éléments nutritifs correspond bien aux besoins d'absorption des cultures.

Les systèmes agroforestiers diffèrent des peuplements naturels, d'abord en ce qu'ils présentent une certaine sélection des espèces végétales et, ensuite, en ce que les composants ligneux et cultureaux sont gérés, par exemple par la coupe et la récolte. Ainsi, beaucoup de systèmes agroforestiers donnent l'occasion de manipuler le calendrier de la décomposition de la litière et de la libération des éléments nutritifs. Plusieurs méthodes permettent d'y arriver:

- la sélection d'espèces végétales ayant différents taux de décomposition de la litière;
- la manipulation du moment d'apport de litière au sol, par des ajustements dans le calendrier de l'émondage ou d'autres opérations de coupe des ligneux;
- le contrôle du mode d'ajout de la litière, par exemple le dépôt en surface ou l'enfouissement.

La sélection des espèces ligneuses est influencée par des considérations variées, tandis que la période d'émondage est souvent déterminée par la nécessité de réduire l'ombre sur les jeunes cultures. Cependant, lorsqu'on dispose d'un minimum de connaissances sur le calendrier de décomposition de la litière, on a souvent l'occasion de modifier un ou plusieurs des trois points ci-dessus pour synchroniser la libération des éléments nutritifs avec les besoins des plantes, accroître ainsi l'absorption par les plantes par rapport à la perte par lessivage et fermer encore davantage le cycle nutritif plante-sol.

Qualité des résidus végétaux

- Résidus de haute qualité: riches en azote, pauvres en lignine et en phénols; se décomposent rapidement, libérant les éléments nutritifs à temps pour répondre aux besoins des plantes.
- Résidus de qualité médiocre: pauvres en azote, riches en lignine et/ou phénols; se décomposent lentement, libèrent progressivement les nutriments, protégés du lessivage jusqu'à minéralisation.

Chapitre 10: Éléments nutritifs des plantes

Parce qu'elle s'intéresse au cycle du matériel végétal, l'agroforesterie s'intéresse nécessairement à la gamme complète des éléments nutritifs des plantes: les éléments principaux: L'azote, le phosphore et le potassium; les éléments secondaires: le calcium, le magnésium et le soufre; et les éléments à l'état de traces ou micro-éléments, dont à peu près sept sont nécessaires à la croissance des végétaux.

Très fréquemment, L'azote ou le phosphore sont des éléments nutritifs déficients dans les sols tropicaux. La réponse initiale à l'apport d'engrais azoté est presque toujours importante. Le manque de phosphore apparaît fréquemment après quelques années de culture, quand les réserves du sol s'épuisent. Le potassium est moins souvent un facteur limitant, sauf pour les cultures racinaires. On peut constater localement une carence en soufre lorsque celui-ci fait défaut dans la roche mère.

Les insuffisances en micro-éléments apparaissent le plus souvent lorsque des engrains ont été appliqués pour remédier au manque d'éléments nutritifs principaux. Sous cet angle, les moyens biologiques d'amélioration du sol ont un avantage inhérent, en ce que les résidus végétaux contiennent probablement les petites quantités d'éléments nécessaires. Ceci pourrait être un avantage significatif de l'agroforesterie.

Il y a une différence fondamentale de nature entre L'azote, fixé à partir de l'atmosphère, et les autres éléments nutritifs, provenant à l'origine de l'altération des roches. Par le biais de la fixation biologique de L'azote on peut, pour ainsi dire, "gagner sans investir" et en combinant la fixation avec un recyclage efficace, on peut mettre au point des écosystèmes autonomes mais productifs. Mais puisque les éléments nutritifs sont forcément enlevés par la récolte, il faut les remplacer, et s'ils ne sont pas présents dans la roche mère, aucun recyclage ne peut y remédier. Si des réserves nutritives sont présentes dans les roches en cours d'altération, mais seulement dans les horizons profonds, les racines des arbres peuvent arriver à puiser dans

ces sources inaccessibles aux cultures. Les dépôts atmosphériques, par les pluies et les poussières, constituent une seconde source qui peut être importante par rapport aux faibles besoins de la végétation naturelle, mais qui reste insuffisante en comparaison des quantités prélevées par la récolte.

Ainsi, on peut dire qu'en général, les systèmes d'utilisation des terres sans intrants artificiels ne sont durables qu'avec un faible niveau d'entrants. Ce serait cependant une erreur de considérer l'agroforesterie comme un moyen de maintenir la fertilité seulement par des moyens biologiques. Son potentiel serait plus grand si l'on pouvait aussi montrer qu'elle augmente l'efficacité de l'utilisation des engrains.

Fixation de l'azote par les arbres et les arbustes

La fixation biologique de l'azote se fait par des processus tant symbiotiques que non symbiotiques. La fixation non symbiotique est celle accomplie par des organismes vivant librement dans le sol. Elle peut être considérable par rapport aux besoins modérés des écosystèmes naturels, mais est faible par rapport aux besoins supérieurs des systèmes agricoles. Elle varie probablement avec le statut de la MO, et par conséquent avec l'activité microbiologique du sol.

La fixation symbiotique se produit par l'association de bactéries fixatrices d'azote avec les racines. Bon nombre de légumineuses sont associées à des *Rhizobium*, tandis que quelques espèces non légumineuses sont associées à des *Frankia*. Ces symbioses se produisent en association avec des champignons qui infectent les racines pour former des mycorhizes (von Carlowitz, 1986a: p.243).

La fixation de l'azote par des légumineuses herbacées est depuis longtemps une pratique agricole reconnue, que ce soit comme culture de production (graines de légumineuses, arachides), engrais vert (*Stylosanthes* sp.pl., *Centrosema pubescens*), y compris les leys à base de légumineuses, ou bien culture de couverture dans les plantations pérennes (par exemple, *Pueraria phaseoloides*). Typiquement, les quantités fixées par des légumineuses herbacées sont de l'ordre de 40 à 200 kg N/ha/an (Nutman, 1976; LaRue et Patterson, 1981; Gibson *et al.*, 1982).

Le tableau 22 donne des exemples de quantités d'azote fixées par des arbres et des buissons. Elles sont très approximatives, car chacune des trois méthodes de mesure présente des problèmes: différence d'azote, réduction de l'acétylène et marquage à l'azote 15 (Dommergues, 1987: p.262). Le marquage au 15-N permet d'estimer la proportion d'azote des tissus végétaux dérivant de la fixation, soit 34 à 39% chez *Leucaena* à Ibadan (Nigeria) et 60% chez *Prosopis glandulosa* en Californie (Sanginga *et al.*, 1987; Virginia, 1986).

Tableau 22 - Fixation d'azote par les ligneux. Nair (1984) et Dommergues (1987) sont des compilations de sources antérieures.

Espèces	Fixation d'azote (kg N/ha/an)	Source
<i>Acacia albida</i>	20	Nair (1984)
<i>Acacia mearnsii</i>	200	Dommergues (1987)
<i>Allocasuarina littoralis</i>	220 (?)	Dommergues (1987)
<i>Casuarina equisetifolia</i>	60-110	Dommergues (1987)
Caféier + <i>Inga</i> sp.pl.	35	Roskoski et van Kessel (1985)
<i>Coriaria arborea</i>	190	Dommergues (1987)
<i>Erythrina poeppigiana</i>	60	Dommergues (1987)
<i>Gliricida sepium</i>	13	Dommergues (1987)
<i>Inga jinicuil</i>	35-40	Dommergues (1987)
<i>Inga jinicuil</i>	50	Roskoski (1982)
<i>Inga jinicuil</i>	35	Roskoski et van Kessel (1985)
<i>Leucaena leucocephala</i>	100-500	Dommergues (1987)
<i>Leucaena leucocephala</i> (en couloirs)	75-120	Mulongoy (1986)
<i>Leucaena leucocephala</i>	100-130 (six mois)	Sanginga <i>et al.</i> (1987)
<i>Prosopis glandulosa</i>	25-30	Rundel <i>et al.</i> (1982)
<i>Prosopis glandulosa</i>	40-50	Virginia (1986)
<i>Prosopis tamarugo</i>	200	Nair (1984)
Jachère en forêt dense humide	40-100	Greenland (1985)
Forêt dense humide adulte	16	Jordan <i>et al.</i> (1982)

Le cas du *Cassia siamea* est un peu particulier: on pense qu'il n'est pas fixateur d'azote, mais il contient cependant dans ses feuilles de grandes quantités d'azote et paraît capable d'améliorer l'azote du sol. La plupart des données du tableau ont trait à des arbres en peuplements purs, mais celles relatives au caféier avec *Inga* et les cultures en couloirs avec *Leucaena* concernent des cultures respectivement dans des systèmes spatiaux mixtes et dans des systèmes zonaux. La fourchette est large,

de 20 à 200 kg N/ha/an, *Leucaena* étant seul capable de valeurs plus élevées sous conditions climatiques et pédologiques favorables. Il faut davantage de données, mais il n'est pas exclu que l'on puisse identifier des ligneux capables, dans des systèmes agroforestiers, de fixer environ 50 à 100 kg N/ha/an.

L'emploi de ligneux fixateurs d'azote peut réduire la compétition des racines avec les cultures. L'azote est un élément nutritif relativement mobile. Le fait que le ligneux comble ses besoins partiellement par fixation réduit l'épuisement du sol autour de ses racines et met davantage d'azote à la disposition des associées non fixatrices d'azote (Gillespie, 1989).

Pour sélectionner les ligneux fixateurs d'azote, on dispose de la base de données de la NFTA, Nitrogen-Fixing Tree Association (Halliday, 1984) et de l'inventaire de l'ICRAF sur les arbres et arbustes à usages multiples. L'une et l'autre de ces sources permettent de faire des recherches selon les critères de zone climatique, de précipitation, de température et d'altitude, de contraintes dues au sol, de phénologie et d'utilisations. Des listes des espèces les mieux connues ou économiquement importantes sont données par MacDicken et Brewbaker (1984), Brewbaker (1986), et von Carlowitz (1986a: Tableau 3). Des espèces non légumineuses à nodulation sont citées par Bond (1976).

Cycle des éléments nutritifs dans les systèmes agroforestiers

La figure 12 montre le cycle des éléments nutritifs entre le sol et la plante adapté à la situation de base de l'agroforesterie, celle de l'association des ligneux et des cultures. Alors qu'on représente souvent séparément les cycles de l'azote, du phosphore, du potassium et d'autres éléments nutritifs, ils sont, en réalité, étroitement liés par les éléments communs des végétaux, de la litière et de l'humus (voir Frissel, 1977; Brunig et Sander, 1983; Stevenson, 1986; et pour la cycle de l'azote, Rosswall, 1980; Wetselaar *et al.*, 1981; Robertson *et al.*, 1983).

Le cycle est constitué de réserves et de flux internes au système, et de gains et de pertes qui lui sont extérieurs. Les magasins d'éléments nutritifs sont les pousses et les racines des ligneux et des cultures, les résidus végétaux, la faune du sol, la MO du sol stable et instable, les minéraux argileux secondaires (par la fixation) et le stock d'éléments nutritifs disponibles sous forme minérale dans la solution du sol. Les principaux flux internes vont des composants de la plante aux résidus, passent ensuite dans l'humus par la faune du sol, se transforment en éléments nutritifs minéraux par le processus de minéralisation et retournent à la plante par les prélevements des racines. Les gains et les pertes de l'écosystème sol-plante sont résumés ci-après (voir p. 100).

La différence essentielle dans les sources externes de gains se situe dans l'atmosphère pour l'azote et dans les roches minérales pour les autres éléments nutritifs. En ce qui concerne les pertes, une grande partie de l'azote et du soufre se perdent en cas de combustion, tandis que les autres éléments nutritifs sont maintenus dans le système. Tous les éléments sont susceptibles d'être entraînés par lessivage hors du magasin minéral que constitue la solution du sol ou d'être perdus par érosion, tant lorsqu'ils sont contenus dans l'humus et les minéraux argileux que lorsqu'ils sont sous forme de minéraux dissous dans l'eau de ruissellement. L'immobilisation par fixation dans les minéraux argileux secondaires est plus importante dans les cycles du phosphore et de quelques micro-éléments.

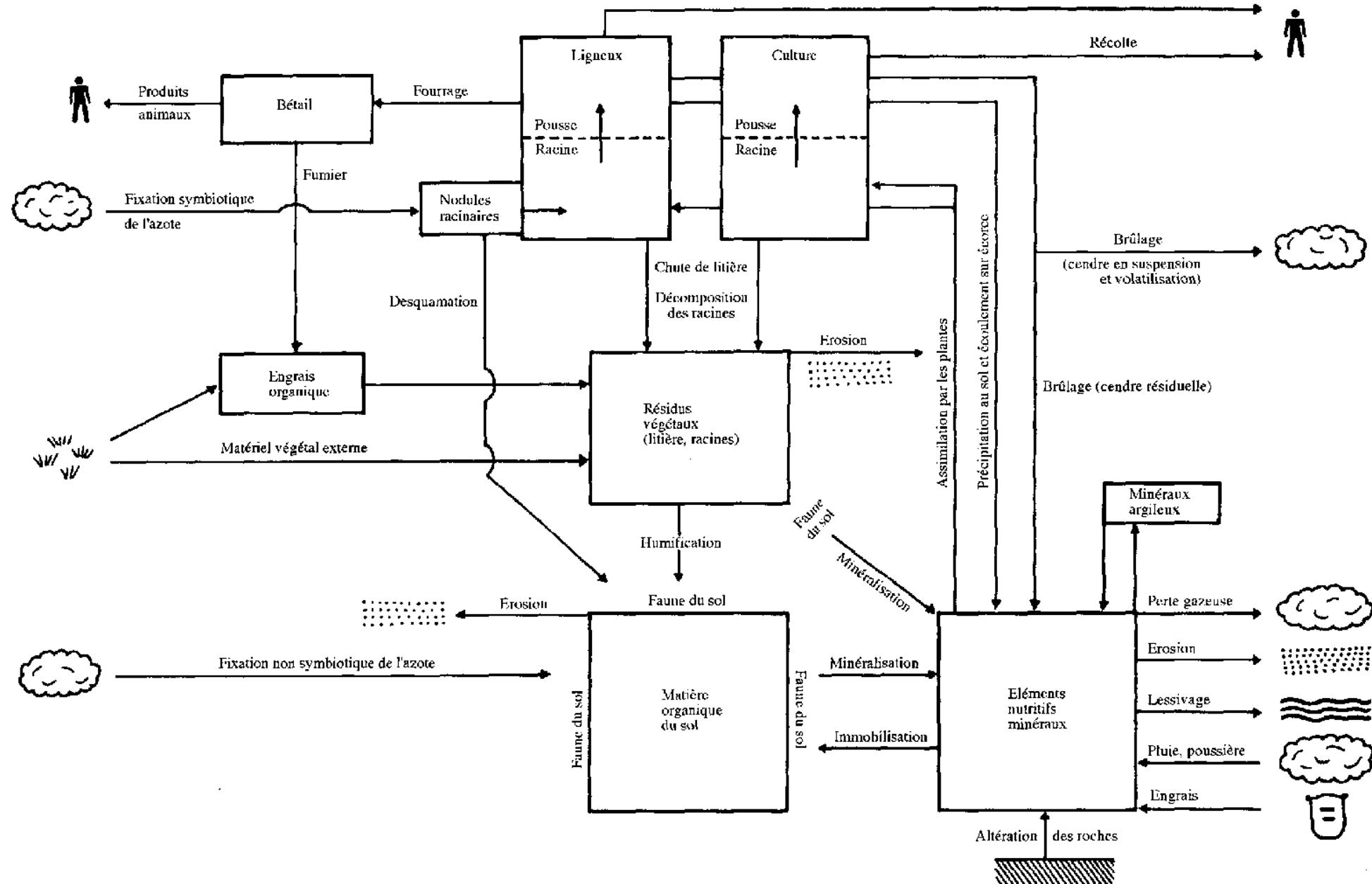


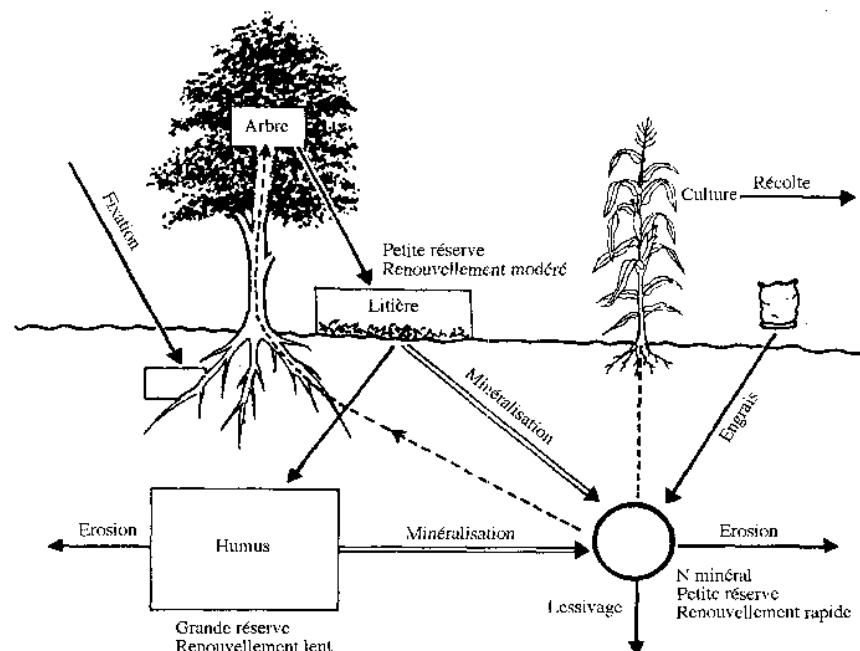
Figure 12 - Cycles des éléments nutritifs en agroforesterie

	Gains	Pertes
Azote	Fixation symbiotique	Pertes gazeuses (dénitrification) et volatilisation
Autres éléments nutritifs	Fixation non symbiotique Altération des roches	Brûlage (aussi soufre)
Tous les éléments nutritifs	Pluie et poussière Matériel organique extérieur au système Engrais	Lessivage Erosion Récolte (y compris fourrage)

Une caractéristique importante est qu'une forte proportion des éléments nutritifs présents dans le sol à quelque moment que ce soit est retenue sous forme organique; pour l'azote, près de 1% seulement se trouve à un moment donné sous une forme minérale disponible. Une fois minéralisés, les éléments nutritifs deviennent assimilables par les racines des plantes, mais deviennent en même temps très sensibles au lessivage.

Ce dernier trait est illustré par un diagramme simplifié du cycle de l'azote (fig. 13). Parallèlement à l'apport direct par fixation symbiotique, l'azote disponible pour les plantes provient du magasin minéral du sol, de petite taille mais à renouvellement rapide. Ce magasin est alimenté grâce à trois sources: la litière (résidus épigés des plantes et restes de racines), l'humus du sol et les engrais. La réserve de litière est très petite à un moment précis, mais elle est renouvelée par un cycle annuel, avec des variations saisonnières plus ou moins grandes suivant la périodicité du climat. La plus grande réserve d'azote est de loin constituée par les molécules organiques de l'humus; celles-ci se minéralisent lentement, à la même vitesse que la constante de décomposition du carbone du sol, soit 3 à 4% par an.

L'objectif de la mise au point et de la gestion des systèmes agroforestiers est de modifier les cycles de façon à rendre plus efficace l'utilisation des éléments nutritifs, que ceux-ci soient issus d'engrais ou de processus naturels de renouvellement. Précisément, il est souhaitable de réduire le coefficient intrants/extrants et le recyclage interne. Les écosystèmes agricoles sont largement ouverts, avec des intrants et des extrants qui atteignent parfois jusqu'à 40% du cycle interne; les écosystèmes forestiers naturels sont plus fermés, et les intrants et extrants y représentent quelquefois moins de 10% du cycle interne. Si l'on peut réduire ce rapport, les éléments nutritifs sont réutilisés plus souvent par les plantes avant de se perdre hors du système.

**Figure 13 - Cycle de l'azote en agroforesterie simplifié pour montrer les réserves et les flux principaux.**

Agroforesterie et cycle des éléments nutritifs

Les systèmes agroforestiers favorisent un cycle des éléments nutritifs plus fermé que les systèmes agricoles par:

- *l'absorption et le recyclage*: ils captent les éléments nutritifs du sol par les systèmes racinaires et les recyclent sous forme de litière, y compris les restes de racines;
- *la synchronisation*: ils aident à synchroniser la libération des éléments nutritifs avec les besoins des cultures, par le contrôle de la qualité, du moment et du mode d'apport des résidus des végétaux

Les systèmes agroforestiers offrent diverses occasions de modifier le cycle des éléments nutritifs:

- ils accroissent les gains de la fixation symbiotique par l'utilisation de ligneux fixateurs d'azote (cf. plus haut, potentiel considérable et démontré);
- ils accroissent l'absorption des autres éléments nutritifs libérés par l'altération des roches grâce aux systèmes racinaires profonds des arbres. Alors qu'on ne doute pas de l'existence de ce processus, on ignore totalement s'il est d'ampleur négligeable, moyenne ou importante: l'établir représente un défi difficile à relever pour la mise au point expérimentale;
- ils réduisent la fixation des éléments nutritifs sur les minéraux argileux et augmentent leur disponibilité par la libération de composés organiques;
- ils referment le cycle des éléments nutritifs en améliorant le rapport entre l'absorption par les plantes et les pertes par lessivage grâce à deux mécanismes:
 - l'absorption par les systèmes racinaires des arbres et leurs mycorhizes associés, avec recyclage sous la forme de litière;
 - la synchronisation du temps de minéralisation avec les besoins de la plante en éléments nutritifs, par le contrôle de la qualité, du moment et du mode d'apport des résidus végétaux.

Des occasions appréciables semblent s'offrir dans deux autres domaines, bien que des recherches soient encore nécessaires:

- l'apport équilibré en éléments nutritifs sous la forme de résidus organiques, réduisant ainsi la probabilité de carences en micro-éléments;
- la réduction des pertes nutritives dues à l'érosion (cf. deuxième partie, potentiel considérable et démontré).

Exemples

Il faut être prudent quand on utilise les données relatives à la teneur des feuilles en éléments nutritifs. Les arbres à feuilles caduques transfèrent les éléments nutritifs des feuilles vers des organes pérennes bien avant la chute des feuilles, et la quantité d'éléments nutritifs contenus dans les feuilles vivantes est d'ordinaire plus importante que dans la litière (Bernhard-Reversat, 1987; Tolsma *et al.*, 1987). Ainsi, le transfert des éléments nutritifs vers le sol sera différent selon qu'il s'agit d'émondages de feuilles vertes ou de chute de la litière.

Le tableau 23 montre quelques données sur la teneur en éléments nutritifs de parties végétales chez quelques ligneux utilisés dans les systèmes agroforestiers. Si la composante foliaire des ligneux retourne au sol, une valeur typique pour la production de biomasse foliaire de 4 000 kg MS/ha/an donnera les quantités reprises dans le tableau ci-dessous.

Le produit des données sur la production de MS dans les coupes de *Leucaena leucocephala* dans des cultures en couloirs à Ibadan, et du pourcentage de la teneur en éléments nutritifs, donne un retour annuel au sol d'environ:

$$\begin{aligned}
 6\,000 \text{ kg MS/ha/an} \times 3,00\% \text{ N} &= 180 \text{ kg N/ha/an} \\
 6\,000 \text{ kg MS/ha/an} \times 0,28\% \text{ P} &= 16,8 \text{ kg P/ha/an} \\
 6\,000 \text{ kg MS/ha/an} \times 2,50\% \text{ K} &= 150 \text{ kg K/ha/an} \\
 6\,000 \text{ kg MS/ha/an} \times 1,49\% \text{ Ca} &= 98,4 \text{ kg Ca/ha/an}
 \end{aligned}$$

(Kang *et al.*, 1985; Wilson *et al.*, 1986)

Elément nutritif	% dans la feuille	Teneur potentielle en éléments nutritifs dans la litière de feuilles ou dans l'émondage(kg/ha/an)
Azote	2,0	80 à 120
Phosphore	0,2 à 0,3	8 à 12
Potassium	1,0 à 3,0	40 à 120
Calcium	0,5 à 1,5	20 à 60

Tableau 23 - Contenu en éléments nutritifs (%) de ligneux à usages multiples (Kang et al., 1984 et Buck 1986 constituent des sources secondaires)

Ligneux	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Source
<i>Acacia auriculiformis</i>	L 1.63				Buck (1986)
<i>Acacia seyal</i>	L2.26, LL1.63	LL0.085	L1.05, LL0.78	L1.23, LL1.93	Bernhard-Reversat (1987)
<i>Acacia tortilis</i>	L3.0,56. 3	L0.12, S0.38	L120, S0.90	L2.00, S1.00	Tolsma et al.. (1987)
<i>Acioa barteri</i>	L2.57	L0.16	L1.78	L0.90	Kang et al. (1984)
<i>Acioa barteri</i>	L2.57	L0.16	L1.78	L0.90	Wilson et al. (1986)
<i>Albizia falcataria</i>	L2.22				Buck (1986)
<i>Alchornea cordifolia</i>	L3.29	L0.23	L I.74	L0.46	Kang et al.. (1984)
<i>Alchornea cordifolia</i>	L3.29	L0.23	L1.74	L0.46	Wilson et al. (1986)
<i>Brachystegia spp. etc.</i>	L3.0, SW1.4	L0.23, SW0.43	L1.10, SW0.65		Stromgaard (1984)
<i>Cajanus cajan</i>	L3.6	L0.2			Agboola (1982)
<i>Cassia siamea</i>	PR2.52	PR0.27	PR1.35		Yamoah et al.. (1986)
<i>Coffea arabica</i>	L1.6.F1.5				Aranguren et al.. (1982)
Caféier + arbres d'ombrage	W0.5				Bornemisza (1982)
<i>Dalbergia latifolia</i>	L1.78				Buck (1986)
<i>Erythrina poeppigiana</i>	L3.3, BR0.84	L0.18, BR0.13	L1.16, BR0.60	L1.52, BR1.15	Russo et Budowski (1986)
<i>Erythrina sp..</i>	L1.52, W0.9				Aranguren et al. (1982)
<i>Ficus sp.</i>	L1.41, W0.8				Aranguren et al. (1982)
<i>Flemingia congesta</i>	PR3.30	PR0.34	PR2.41		Yamoah et al. (1986)
<i>Gliricida sepium</i>	L3.7	L0.2			Agboola (1982)
<i>Gliricida sepium</i>	L4.2 1	L0.29	L3.43	L1.40	Kang et al. (1984)
<i>Gliricida sepium</i>	L4.2 1	L0.29	L3.43	L 1.40	Wilson et al. (1986)
<i>Gliricida sepium</i>	PR4.40	PR0.26	PR2.81		Yamoah et al. (1986)
<i>Gmelina arborea</i>	L2.07, W0.22	L0.23, W0.03	L 1.1 6 W0.3 7	L0.57, W0.19	Chijoke (1980)
<i>Inga sp.</i>	L1.61 W2.28				Aranguren et al. (1982)
<i>Leucaena leucocephala</i>	L4.2	L0.2			Agboola (1982)
<i>Leucaena leucocephala</i>	L2.5 1				Buck (1986)
<i>Leucaena leucocephala</i>	L4.33	L0.28	L2.50	L 1.49	Kang et al. (1984)
<i>Leucaena leucocephala</i>		PR0.3	PR1.0	PR2.5, L3.0	Akbar et Gupta (1984)
<i>Leucaena leucocephala</i>	PR2.53				Kang et al. (1985)
<i>Leucaena leucocephala</i>	L4.33	L0.28	L2.50	L1.49	Wilson et al. (1986)
<i>Leucaena leucocephala</i>	L4.0				BOSTID (1984)
<i>Leucaena leucocephala</i>	L3.15, BR0.41	L0.15, BR0.053	L1.38, BR0.34	L1.02, BR0.39	Lulandala (1991)
<i>Prosopis glandulosa</i>	L2.8, W0.7				Rundel et al. (1982)
<i>Sesbania grandiflora</i>	L3.36-3.64				Ghai et al. (1985)
<i>Sesbania sesban</i>	L2.43-4.36				Ghai et al. (1985)
<i>Tephrosia candida</i>	L3.8		L0.2		Agboola (1982)

L =feuilles; PR = émondades (probablement feuilles surtout); W = bois BR = bois de branches SW = bois du tronc; S = semences; LL = litière de feuilles tombée naturellement; F =fruit.

La mesure et l'analyse de la litière (feuilles et branches) dans les systèmes du Costa Rica à cacaoyer- *Cordia alliodora* et à cacaoyer - *Erythrina poeppigiana* donnent des retours annuels au sol de:

- Cacaoyer - *Cordia*

- 115 kg N/ha/an dont 71 venant du *Cordia*
- 14 kgP/ha/an dont 6 venant du *Cordia*
- 65 kgK/ha/an dont 35 venant du *Cordia*

- Cacaoyer - *Erythrina*

- 175 kg N/ha/an dont 122 venant de *l'Erythrina*
- 9 kgP/ha/an dont 7 venant de *l'Erythrina*
- 54 kgK/ha/an dont 27 venant de *l'Erythrina*

(Alpizar et al., 1986 1988)

On peut comparer ceci aux éléments nutritifs enlevés lors de la récolte du cacaoyer Une récolte respective de 626 et 712 kg/ha/an dans chacun des systèmes comprend 19 et 26 kg/ha/an de N, 4 et 4 kg/ha/an de P et 28 et 27 kg/ha/an de K. Ces chiffres donnent les coefficients recyclage/récolte de 6 à 7 pour l'azote, de 1,5 à 1 75 pour le phosphore et de 1,0 et 1 25 pour le potassium. Un autre résultat frappant est que pour N et K (mais pas pour P), les quantités recyclées par la litière sont du même ordre de grandeur que l'apport annuel d'engrais (120-33-20).

Le tableau 24 donne des résultats sur la teneur en azote de la litière tombée et des émondades en systèmes agroforestiers, et une comparaison avec quelques communautés de végétation naturelle. Les données agroforestières correspondent à des climats humides et subhumides frais. Dans des systèmes de cultures intercalaires en haies, on connaît une série d'espèces capables de fournir 100 à 200 kg N/ha/an si l'on laisse sur le sol toutes les émondades; ceci est du même ordre de grandeur que l'enlèvement d'azote par la récolte de la culture. Dans les plantations de caféier et de cacaoyer avec des arbres d'ombrage (partiellement fixateurs d'azote) en Amérique latine, la teneur de la litière et des émondades est de l'ordre de 100 à 300 kg N/ha/an. C'est bien plus que les quantités provenant de la fixation de l'azote.

Tableau 24 - Azote dans les émondades et dans la litière.

Pays et climat	Utilisation des terres	Azote(kg/ha/an)	Source
Nigeria, subhumide	Culture en couloirs allées de 4m, émondades:		Kang et Bahiru Duguma (1985)
	<i>Leucaena leucocephala</i>	200	
	<i>Gliricida sepium</i>	100	
Nigeria, en couloirs subhumide	Culture en couloirs allées de 2m, émondades,		Bahiru Duguma et al., (1988)
	<i>Leucaena leucocephala</i>	150-280	
	<i>Gliricida sepium</i> (6 mois)	160-200	
	<i>Sesbania grandiflora</i> (6 mois)	50-100	
Vénézuéla, humide	Café-Erythrina-Inga non fertilisé:		Aranguren et al. (1982)
	arbres seuls	86	
	arbres + café	172	
	Cacao-Erythrina-Inga		Aranguren et al. (1982)
	arbres seuls	175	
	arbres + cacao	321	
Costa Rica, humide	Cacao-Cordia (fertilisé)	115	Alpizar et al., (1986, 1988)
	<i>Cacao-Erythrina</i>	175	
	<i>poeppigiana</i> (fertilisé)		
Divers, humide	Forêt humide	60-220	Bartolemew (1977)
Divers, humide	<i>Leucaena leucocephala</i> plantation:		BOSTID (1984)
	feuilles	500-600	

	litière	100	
18 sites, humide	Forêts	134 en moyenne	Lundgren (1978)
Côte d'Ivoire humide	113 170		Bernhard-Reversat (1977)
Brésil, humide	Forêt humide	61	Jordan et al. (1982
Etats-Unis: Californie, humide	Prosopis glandulosa(bois)	45	Rundel et al. (1982)

La figure 14 illustre l'emmagasinage et le flux annuel de N et de P dans un système à cacaoyer- *Erythrina - Inga*

Dans l'étude sur la culture en couloirs, le retour au sol par les émondages est du même ordre de grandeur que les prélevements par la récolte de céréales et de légumineuses cultivées en mélange. Pour les cultures fertilisées, l'azote de la litière dépasse la quantité enlevée par la récolte.

Les caractéristiques du cycle des éléments nutritifs sous la végétation naturelle sont pertinentes pour représenter l'extrémité "lignieux sels" d'un spectre ligneux-cultures. La figure 15 montre le cycle de P tel qu'il ressort d'une étude sur la forêt tropicale humide à Panama. La quantité de P qui entre dans le cycle ne représente que 6,6% des réserves du sol et de la végétation: la litière contient 9,1 kg P/ha/an et 11,8 si l'on ajoute les apports par la pluie et les résidus animaux; l'absorption par les plantes est de 11 kg, comparée à des stocks de 144 kg P/ha/an dans la végétation et de 22 kg supplémentaires dans le sol. Il est frappant de constater l'ampleur des gains et des pertes du système, par rapport au cycle interne: 1 kg P/ha/an apporté par la pluie, 0,2 kg perdu dans les horizons profonds du sol et 0,7 kg par lessivage, ce qui fait que les gains et les pertes totaux ne touchent que 5% du P dans le cycle interne. Les chiffres correspondants pour le cycle de K sont, selon cette étude, de 187,5 kg K/ha/an, avec un équilibre à 9,3 pour les gains et les pertes, soit à nouveau 5% du cycle interne. Ainsi, un écosystème forestier est susceptible de conserver un cycle d'éléments nutritifs clos à 95%.

Dans les climats très humides, le temps de rémanence des éléments nutritifs dans la litière et dans le sol est court et le recyclage est rapide. Dans la forêt équatoriale, les arbres à racines profondes jouent un rôle vital en capturant les éléments nutritifs avant qu'ils ne soient lessivés hors du système.

Dans les savanes de la zone subhumide, on a distingué deux cycles, par les plantes ligneuses et par les plantes herbacées. Dans la savane à *Burkea africana* du Transvaal, sur des ferralsols sableux, les éléments nutritifs ont un cycle 1,2 à 2,4 fois plus lent dans les structures ligneuses que dans la couche herbacée. Lorsque le système est perturbé, les lignieux interviennent comme facteur stabilisant (Frost, 1985; Swift et al sous presse). Ce même principe devrait s'appliquer aux systèmes agroforestiers.

Des données comparables sur le cycle nutritif en cultures annuelles font ressortir la grande quantité d'éléments nutritifs éliminés par la récolte, ou parfois par une érosion considérable, associée à des entrées sous la forme d'engrais ou à une perte nette dans le sol. Lelong et al. (1984) ont donné des résultats pour comparer directement la végétation naturelle à du maïs fertilisé dans trois environnements d'Afrique occidentale, humide, subhumide mouilleux et subhumide sec; ces chiffres se caractérisent par de grandes pertes par érosion sur les parcelles cultivées, les pertes par entraînement sont quelquefois plus petites sous le maïs que sous la végétation naturelle, probablement à cause d'une infiltration plus faible. Les résultats se résument ainsi:

- végétation naturelle: cycle interne vaste par rapport aux intrants et aux extrants équilibre entre intrants et extrants
- culture annuelle: cycle interne peu étendu par rapport aux intrants et aux extrants extrants dépassant largement les intrants et causant une perte nette pour le sol.

Dans les combinaisons de cultures telles que *cacaoyer-Cordia alliodora* et *cacaoyer-Erythrina poeppigiana* au Costa Rica, on a mesuré des taux d'entraînement très bas: 5 kg N/ha/an, 0,4 kg P/ha/an, 1,8 à 1,5 kg K/ha/an et 5 à 21 kg Ca/ha/an. Ces taux sont étonnamment bas pour une pluviosité de 2 000 mm et une percolation de 800 à 900 mm, représentant moins de 5% de l'absorption par la plante (Imbach et al., 1989).

De nombreuses études ont montré des bilans nutritifs fortement négatifs à moins d'être compensés par des engrains, dans des systèmes de cultures annuelles permanentes et semi-permanentes. Les bilans nutritifs obtenus pour diverses zones climatiques d'Afrique de l'Ouest, résumés par Pien (1983, 1985) et par Roose (1979, 1980) en sont des exemples. Des études approfondies doivent être menées sur tous les composants du cycle nutritif des systèmes agroforestiers, en s'appuyant sur des comparaisons de parcelles agricoles. Le seul exemple connu pour l'agroforesterie est donné par Alpizar et al. (1986, 1988).

Jusqu'à ce jour, on s'est principalement intéressé au potentiel des lignieux fixateurs d'azote, vu leur capacité clairement démontrée d'augmenter l'apport d'azote dans le cycle plante-sol. Ceci a eu pour conséquence de trop attirer l'attention sur ce seul aspect, et il faut maintenant effectuer des recherches approfondies sur les effets des systèmes ligneux/cultures sur d'autres éléments nutritifs, notamment sur le phosphore.

Il est impossible de répondre aux nombreuses questions sur le cycle des éléments nutritifs tant que nous ne disposons pas de données sur divers systèmes agroforestiers, dans des environnements différents. Les besoins portent sur des estimations quantitatives sur les points d'équilibres, couvrant les réserves dans les végétaux et dans le sol, les intrants, les extrants les transferts au sein du système, dans la lignée des études détaillées dont on dispose pour la végétation naturelle (par exemple, Bernhard-Reversat, 1977, 1982; Jordan, 1982; Rundel et al., 1982), pour les systèmes agricoles (par exemple, Frissel, 1977; Pushparajah, 1981; Pieri, 1985; Idessa et al., 1985; Agamathu et Broughton, 1985), et pour les rares exemples de systèmes agroforestiers cités ci-dessus, notamment Alpizar et al. (1986, 1988).

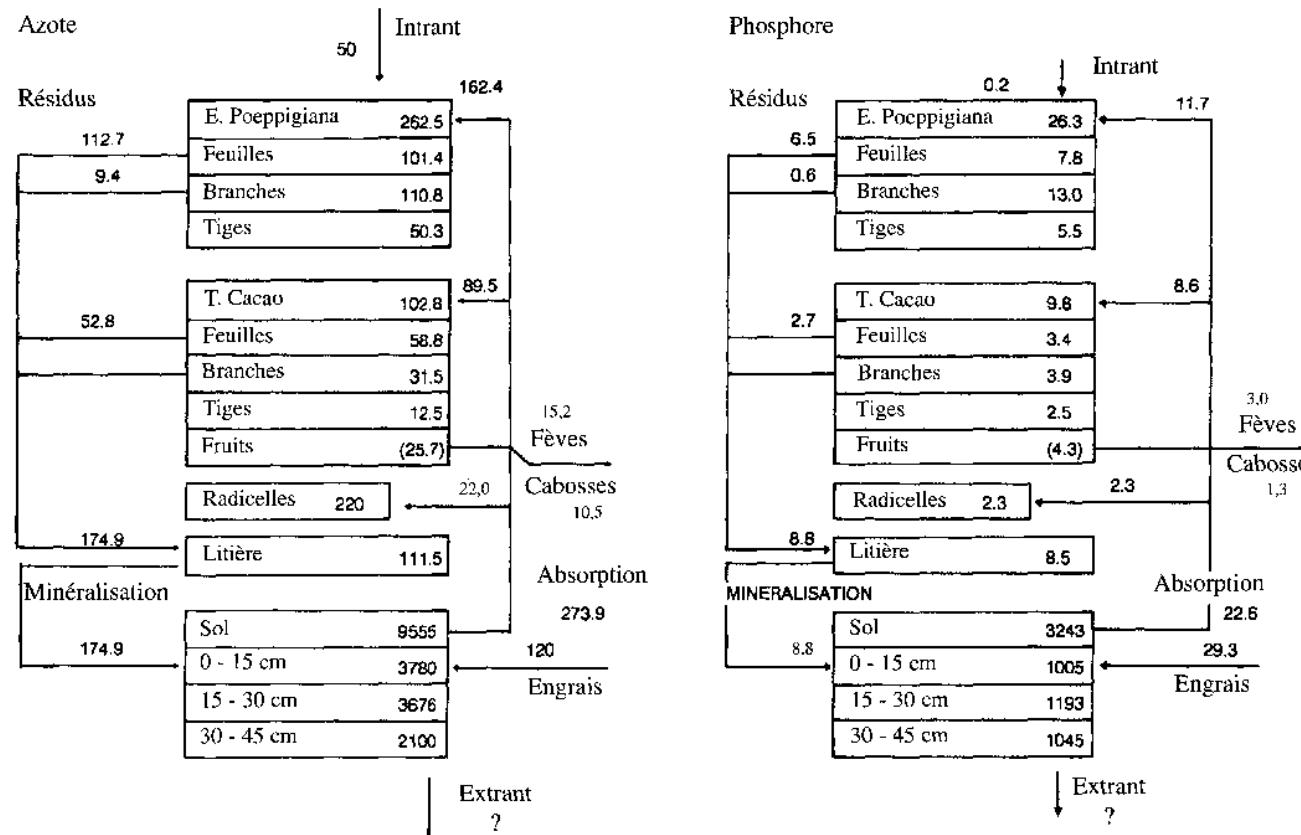


Figure 14 - Cycle de l'azote et du phosphore sous un système à cacoyer - Inga - Erythrina, au Costa Rica (Alpizar et al 1986, 1988).

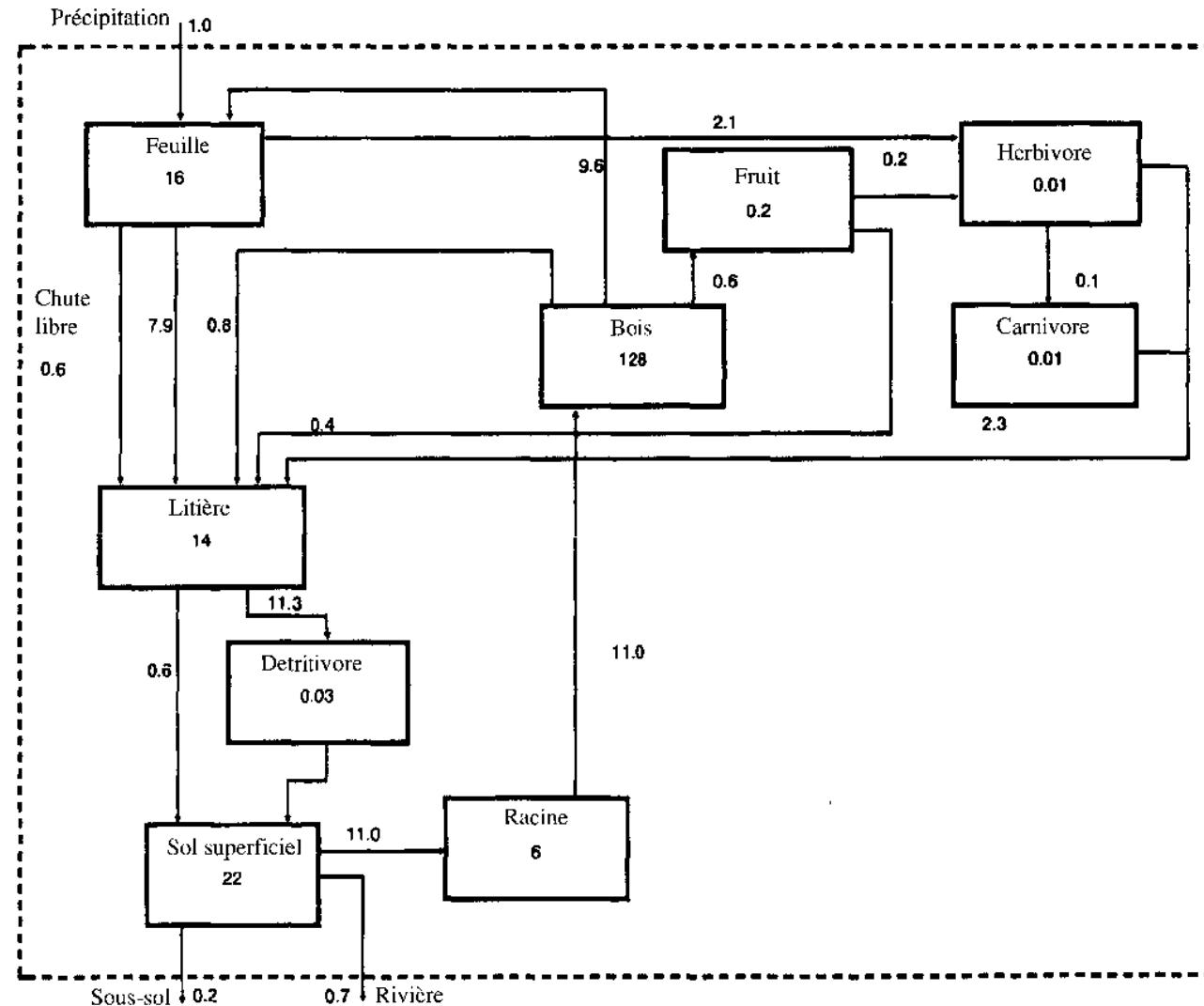


Figure 15 - Le cycle du phosphore sous la forêt dense humide au Panama (d'après Golley et al., 1975).

Chapitre 11: Autres propriétés et processus du sol

Propriétés physiques du sol

Les propriétés physiques du sol forment un complexe unique et interactif qui repose sur le degré d'agrégation des particules et le volume et la distribution des pores de différentes tailles. L'agrégation et l'espace poreux déterminent la structure, la consistance, la densité et la porosité, qui à leur tour sont liées à la capacité de rétention de l'eau, à la perméabilité, au drainage du sol (aération) et à la résistance fournîte l'érosion. Une structure du sol bien développée, outre qu'elle facilite le

labour, fournit des conditions favorables au développement des fines racines nourricières et des mycorhizes, augmentant ainsi l'efficacité de l'absorption des éléments nutritifs. Pour que se développent des propriétés physiques favorables, il est essentiel de promouvoir avant tout la formation d'agrégrats stables entre les particules, et ensuite d'un mélange de pores fins ($< 50 \mu\text{m}$) qui empêchent l'humidité d'être entraînée par gravité, et de pores plus gros pour permettre le drainage de l'excès d'humidité et ainsi l'apport d'oxygène aux racines.

Les facteurs qui déterminent ces propriétés physiques sont la texture du sol, les types de minéraux argileux présents et la qualité de la MO, celle-ci fournissant les gommes naturelles qui relient les particules. La texture et les minéraux argileux sont en grande partie déterminés par les facteurs et les processus naturels de formation du sol. Aussi la possibilité de modifier les propriétés physiques par la gestion repose-t-elle essentiellement sur le maintien de la MO du sol.

Les effets des propriétés physiques du sol sur la croissance des racines, le régime hydrique du sol, la résistance à l'érosion et le rendement cultural sont passés en revue dans Lal et Greenland (1979). Il a souvent été démontré que la dégradation de la structure et de l'espace poreux peut réduire le rendement cultural de façon importante, même si l'on exclut l'effet indirect sur le développement des racines et l'absorption d'éléments nutritifs. Une dégradation sévère des propriétés physiques conduit à la formation de plaques ou croûtes, qui réduisent l'infiltration, abaissent la résistance à l'érosion et empêchent la germination des semences.

De tels effets s'observent sur la plupart des types de sols, mais ils sont particulièrement importants sur les sols très sableux (régosols et arénosols) et sur les argiles lourdes (vertisols et de nombreux gleysols). Ils sont relativement moins importants sur des sols où la présence d'oxydes de fer libres induit une agrégation forte et stable (nitrosols et quelques ferralsols). Si la MO est peu abondante, les sols sableux perdent le peu de cohésion qu'ils avaient et deviennent encore plus sujets à la sécheresse. Les argiles lourdes ont naturellement tendance à former des agrégats durs et de grande taille, qui rendent le labour difficile et entravent le drainage interne, mais ces problèmes sont atténués si la teneur en MO est maintenue.

L'effet favorable des ligneux sur les propriétés physiques du sol est incontestable. Il est déjà démontré par le bon état physique du sol que l'on observe invariablement sous la forêt naturelle et ensuite, par l'observation du déclin des propriétés physiques après défrichement (Lal et al., 1986). Ceci fournit *a priori* une solide indication que les systèmes agroforestiers peuvent avoir une influence favorable sur les propriétés physiques.

Les preuves directes, sous la forme d'observations quantitatives liées à des parcelles de contrôle, sont rares. Une amélioration de la capacité de rétention de l'eau a été enregistrée sous *Faidherbia albida* (Felker, 1978). L'agrégation du sol a été mesurée sur des plantations de 4 ans sur un acrisol débarrassé de la forêt naturelle au Brésil; comparé à celui de la forêt, le degré d'agrégation a augmenté sous *Pinus caribea*, mais il a diminué tant sous palmier à huile que sous hévéa (Silva, cité par Sanchez, 1987: p.2 1 3).

Des essais réalisés à Ibadan, au Nigeria, sur des cultures de maïs en couloirs avec *Gliricidia*, *Flemingia* et *Cassia* plantés sur un luvisol ferrique ont donné des résultats surprenants (Yamoah et al., 1986b). Outre la parcelle avec haies dont les émondages étaient appliquées au sol, les parcelles de contrôle comprenaient l'une, des haies dont les émondages étaient enlevées et l'autre, du maïs uniquement. Sur les parcelles non fertilisées ni recouvertes d'émondages, le maïs a mieux poussé près des haies qu'au milieu des allées; par ailleurs, la croissance du maïs était meilleure sur les parcelles où l'on avait enlevé les émondages que sur les parcelles témoins dépourvues de haies. La croissance des racines de maïs était moindre sans les haies (tableau 25).

Tableau 25 - Impact des haies sur le poids des racines de maïs cultivé entre celles-ci Ibadan, Nigeria (Yamoah et al., 1986b).

Espèce formant la haie	Emondages	Poids des racines de maïs(g/plante)	
		à 3 semaines	à 8 semaines
<i>Gliricidia sepium</i>	Enlevées	0,29	0,83
<i>Flemingia congesta</i>	Enlevées	0,25	1,24
<i>Cassia siamea</i>	Enlevées	0,14	0,81
<i>Gliricidia sepium</i>	Maintenues	0,36	1,24
<i>Flemingia congesta</i>	Maintenues	0,30	1,80
<i>Cassia siamea</i>	Maintenues	0,19	0,89
Contrôle, pas de haie		0,11	0,58
Plus petite différence significative (PPDS) ($P = 0,05$)		0,11	0,51

On peut citer la conclusion de cette dernière étude et supposer qu'elle s'applique aussi à d'autres pratiques agroforestières:

Il faudrait considérer l'importance d'un système de cultures intercalaires en haies à la lumière des améliorations qu'il apporte à la fois aux propriétés physiques et aux propriétés chimiques du sol. L'amélioration des propriétés physiques du sol... peut s'avérer plus importante dans bien des cas que l'apport d'éléments nutritifs, car les éléments nutritifs libérés par les émondages deviennent inutiles si les propriétés physiques du sol ne favorisent pas un développement approprié des racines pour puiser ces éléments. On recommande vivement une étude sur les effets de la plantation d'arbustes sur les propriétés physiques du sol (Yamoah et al. 1986b).

Acidité

Un sol fortement acide a un pH inférieur à 5. En dessous de cette valeur, les ions Al^{+++} remplacent progressivement les ions H^+ et ils deviennent prédominants autour du pH 4. C'est pour cette raison qu'une forte acidité est aussi appelée toxicité en aluminium (Sanchez, 1976, ch. 7). Les problèmes liés à l'acidité du sol sont de deux ordres: rendre productifs des sols qui sont naturellement fort acides et contrôler l'acidification causée par la fertilisation et l'exploitation agricole.

Dans les tropiques humides, les sols naturellement acides, ferralsols et acrisols, sont pour la plupart exploités avec des cultures tolérant une forte acidité, comme le théier ou l'hévéa. Le problème principal se pose lorsqu'on trouve des sols très

acides dans la zone subhumide mouilleuse, sous des conditions convenant climatiquement au maïs et à d'autres cultures qui ne tolèrent pas l'acidité; par exemple, les *cerrados* du Mato Grosso, au Brésil, ou les sols sableux acides de la Province du Nord en Zambie.

Un certain degré d'acidification apparaît régulièrement suite à l'exploitation agricole, mais elle peut s'aggraver par l'apport répété de certains engrains, en particulier du sulfate d'ammonium. C'est un risque lié à l'utilisation agricole des sols d'acidité moyenne à forte.

Aussi y a-t-il deux problèmes différents:

- les systèmes agroforestiers peuvent-ils augmenter le pH de sols déjà acides?
- les systèmes agroforestiers peuvent-ils aider à freiner l'acidification?

Nous pouvons supposer que les ligneux sont capables de réduire l'acidité en raison de la teneur de leurs feuilles en calcium et en d'autres bases, prélevées dans les couches profondes du sol et recyclées en surface.

En réalité, les ligneux ne contrôlent pas forcément l'acidité; des sols sous forêts humides naturelles ont fréquemment un pH de 4,0 à 4,5. Le déboisement de sols acides entraîne souvent une réduction de l'acidité par l'apport de bases dans la litière brûlée ou en décomposition. Il s'ensuit normalement un accroissement de l'acidité pendant la période de culture, à mesure que les bases apportées sont entraînées par lessivage. Si un sol est naturellement acide, on peut le contrôler temporairement par un chaulage, mais les processus poussant à la restauration des conditions naturelles sont puissants et persistants.

Il est un système agroforestier traditionnel qui réussit à réduire l'acidité. C'est le système *chitemene* de cultures itinérantes qu'on trouve dans la zone subhumide de Zambie et de quelques pays voisins. Les arbres et les baïsons de la savane naturelle sont abattus, empilés en un endroit du site d'origine et brûlés. On a ainsi enregistré des élévations de 2 points du pH (Stromgaard, 1984, 1985). Mais ceci est le résultat de la libération de bases qui proviennent d'une surface plus grande que le terrain cultivé, et qui se sont accumulées pendant près de 20 ans de croissance des ligneux.

Il existe diverses règles approximatives pour déterminer les "besoins en chaux" d'un sol acide. Sanchez (1976) a suggéré que pour chaque milli-équivalent (meq) d'aluminium échangeable présent dans le sol, on devait apporter 1,5 meq de calcium, ou 1,65 t/ha d'équivalent CaCO₃. La quantité de chaux nécessaire pour éléver de 1 point le pH de la couche superficielle du sol est typiquement de 5 t/ha et cet apport doit être renouvelé environ tous les cinq ans.

On peut comparer ceci avec la production de biomasse ligneuse 10000 kg MS/ha/an, caractéristique de la zone des savanes humides et une teneur moyenne des tissus en calcium de 1% (plus élevée pour les feuilles, plus faible pour d'autres parties). Ceci donnerait, sous couverture arborée complète, une accumulation de 100 kg Ca/ha/an, équivalente à 250 kg de CaCO₃ ou un peu plus en engrain calcique. Ce n'est qu'un vingtième d'un besoin typique en calcaire. Dans bien des systèmes agroforestiers, et spécialement les cultures intercalaires en haies, la couverture ligneuse est bien inférieure à 100%. Qui plus est, les bases contenues dans la litière ont nécessairement été extraites du sol.

Ainsi, l'influence des ligneux sur l'acidité des sols est favorable, mais elle est bien loin d'avoir un impact suffisant pour être appréciable. Il est donc peu probable que la litière des ligneux puisse constituer un moyen significatif d'augmenter le pH de sols naturellement acides.

La situation est différente en ce qui concerne le contrôle de l'acidification. Tout d'abord, si l'on utilise la composante ligneuse comme un moyen de maintenir la fertilité, il ne devrait pas apparaître de tendance à l'acidification. Deuxièmement, lorsque les engrains entraînent l'acidification, celle-ci est de l'ordre de 0,1 point du pH par an. Le recyclage des bases dans la litière ligneuse devrait très probablement suffire à contrebalancer un effet de cet ordre de grandeur.

Beaucoup de ligneux utilisés communément en agroforesterie ont un niveau moyen de Ca dans leurs tissus. Il semble que *Gmelina arborea* ait un potentiel particulier. Dans deux plantations du Brésil, on a restitué au sol respectivement 117 et 161 kg Ca/ha/an (Chijoke, 1980) par la litière. Sur un acrisol à Para, au Brésil, on a mesuré le pH et le calcium du sol superficiel sous forêt, après défrichage et après 8 années de culture de *Gmelina arborea* avec les résultats suivants (Sanchez et Russell, 1978).

	pH	Ca, kg/ha
sous forêt	3,9	50
après défrichage	4,8	480
après 8 ans de	5,1	800
<i>Gmelina arborea</i>		

Défrichage et brûlage

La mise à disposition de nouvelles terres, que ce soit pour la culture itinérante, pour l'agriculture ou pour l'agroforesterie, suppose la suppression de la végétation. Il est évident que, du point de vue des propriétés (physiques et chimiques) du sol, les méthodes manuelles (coupe et brûlage) sont préférables au bouteur; si la suppression mécanique s'impose pour des raisons économiques, la coupe des arbres au ras du sol au moyen d'une lame affûtée est aussi bonne, voire meilleure que la coupe manuelle. Si une partie importante de la végétation est recueillie, la réserve d'éléments nutritifs sera forcément réduite (Seubert *et al.* 1977; Mueller-Harvey *et al.* 1985; Lal *et al.* 1986; Kang et Juo, 1986).

Le brûlage entraîne des pertes sous forme gazeuse d'une grande partie du carbone, de l'azote et du soufre contenus dans la biomasse végétale, alors que le phosphore, le potassium et le calcium sont retenus dans les cendres. Autrefois, on pensait que les éléments nutritifs ainsi retenus étaient entièrement libérés dans le sol. Or, dans un feu vif, il peut y avoir des pertes ultérieures substantielles sous forme de particules, les cendres étant soulevées par la chaleur et emportées par le vent; des pertes importantes de K, de Ca et surtout de P, peuvent ainsi se produire (Khanna, comm. pers.). Un brûlage léger ou incomplet accélère la minéralisation des éléments nutritifs, par comparaison avec la décomposition de la litière, et peut induire

de petites augmentations de C et de N. D'un autre côté, un feu extrêmement chaud peut oxyder une partie de la MO du sol. Dans le système *chitemene* de la zone subhumide, les avantages du brûlage ne sont pas dus seulement à la fertilisation par les cendres; brûler sur des tôles ondulées et en tirer les cendres peut améliorer les récoltes! Il semble qu'il y ait une mobilisation des éléments nutritifs par la chaleur, et peut-être une meilleure rétention de l'azote-nitrate en raison de la disparition de l'activité microbiologique (Andriesse *et al.* 1984, 1987; Stromgaard, 1984, 1985; Andriesse, 1987; Chidumayo, 1987).

On a suggéré récemment de laisser la biomasse forestière se décomposer sous une couverture de légumineuses. L'avantage potentiel serait grand pour le sol, car on évite ainsi les pertes élevées de carbone et d'azote qui ont lieu lors de la combustion (von Uexkull, 1986). Les effets de la suppression de la végétation sur les sols ont été le sujet d'un symposium patronné par l'IBSRAM (International Bureau for Soil Research and Management) (Lal, 1987).

Le brûlage de la végétation défrichée permet de faire pousser des cultures dans trois environnements difficiles: les sols acides, les sols fortement lessivés de la zone de la forêt dense humide et les sols sableux fortement altérés des plateaux de *sandveld* dans la zone des savanes. Toutefois, à cause de la perte de MO et de certains éléments nutritifs, et quelquefois du recyclage inefficace d'autres éléments, le brûlage n'aura probablement pas sa place dans la plupart des systèmes agroforestiers modernes.

En agroforesterie, il serait possible, lors du défrichement, de laisser des rideaux abris de végétation naturelle. Cette méthode n'est pas sans avantages pour la conservation des sols, mais son caractère pratique reste encore à démontrer.

Lutte contre l'érosion et fertilité du sol

On a discuté plus haut du potentiel de l'agroforesterie dans la lutte contre l'érosion du sol. Dans le présent contexte, les conclusions principales sont:

- sauf dans les cas extrêmes, le principal dommage causé par l'érosion est la diminution des rendements par perte de MO et d'éléments nutritifs dans les sédiments et les eaux de ruissellement. Pour un taux donné de perte de terre, les effets sur la fertilité sont plus importants sur les sols tropicaux que sur les sols tempérés, et ils sont extrêmes sur les sols tropicaux fortement altérés;
- l'emploi de méthodes agroforestières offre un potentiel important dans la lutte contre l'érosion.

L'ampleur des pertes nutritives est telle que laisser l'érosion se poursuivre équivaut à une fertilisation inversée: cela revient à *enlever* chaque année à la terre plusieurs sacs d'engrais! Le coût financier, que ce soit en engrais supplémentaires ou en perte de rendement, est clair. C'est pourquoi la possibilité de contrôler l'érosion est l'un des moyens les plus importants qu'offre l'agroforesterie pour *maintenir la fertilité du sol*.

Chapitre 12: Le rôle des racines

Biomasse racinaire, renouvellement et teneur en éléments nutritifs

Ces dernières années, la botanique a tendance à de plus en plus reconnaître le rôle des racines dans la production primaire. Ce n'est pas sans importance pour la fertilité du sol, tant en général que spécifiquement pour les systèmes agroforestiers.

Le système racinaire des ligneux est formé: (1) de racines structurales, d'un diamètre moyen à grand, et relativement permanentes; (2) de racines fines, ou nourricières, de 1 à 2 mm de diamètre; (3) de racines capillaires, très fines et (4) de mycorhizes. Trois aspects des systèmes racinaires sont importants: la biomasse, le renouvellement et la teneur en éléments nutritifs.

La biomasse racinaire des ligneux est typiquement de l'ordre de 20 à 30% de la biomasse végétale totale (par rapport à 25 à 43% de la biomasse épigée, soit un rapport pousses/racines entre 4:1 et 2,33:1). Elle peut dans certaines forêts humides descendre à 15%; dans des savanes humides, on a mesuré des taux de 35 à 40%, et dans la végétation semi-aride, elle peut s'élever bien au-dessus de 50%. Les données fondées sur des carottages peuvent grandement sous-estimer les racines, par comparaison avec une excavation complète. Les végétaux réduisent la croissance des pousses par rapport à celle des racines dans les endroits pauvres en éléments nutritifs et accroissent ainsi la proportion de racines (Hutzel, 1975; Klinge *et al.*, 1975; Lamotte, 1975; Jordan et Escalante, 1980; Reichle, 1981; Koopmans et Andriesse, 1982; Jordan *et al.*, 1982; Atkinson *et al.*, 1983; Mellilo et Gosz, 1983; Bowen, 1985; Cannell, 1985; McMutrie, 1985; Szott *et al.*, 1987c).

A Morogoro, Tanzanie (climat subhumide), on a comparé la biomasse de radicelles (diamètre 2 mm) d'arbres de deux ans avec celle d'une culture de maïs et de *Leucaena* de six ans (Jonsson, 1988), avec les résultats suivants (kg/ha):

Maïs	302
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	646
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	531
<i>Leucaena leucocephala</i> (si te 2)	744
<i>Prosopis chilensis</i>	554
<i>Cassia siamea</i>	780
<i>Leucaena leucocephala</i> (site 1)	616
<i>Leucaena</i> de 6 ans	1276

Cependant, ces données se rapportent à la biomasse racinaire observée à un moment précis. La production primaire annuelle nette des racines est sensiblement plus grande que la biomasse en place à un moment donné. C'est dû en partie à l'exsudation, mais surtout à l'élimination des radicelles, en particulier pendant les périodes défavorables à la croissance. Certaines racines nourricières commencent à se décomposer après quelques jours de croissance. Ce renouvellement explique que la proportion de carbone photosynthétisé qui passe dans le système racinaire est substantiellement plus grande que le taux dans la biomasse permanente. Par exemple, dans la forêt humide vénézuélienne, on a estimé que les racines

constituaient 15% de la biomasse permanente mais 25% de l'accroissement de biomasse. Dans les forêts naturelles et aménagées, les racines peuvent représenter de 30 à 70% de la production totale de biomasse (Coleman, 1976; Hermann, 1977; Sauerbeck et Johnen, 1977; Sauerbeck *et al.*, 1982; Bowen, 1984, 1985; Clarkson, 1985; Fogel, 1985; Huck, 1983).

Il est difficile de distinguer les exsudats, *stricto sensu*, du matériel en solution résultant de la décomposition des cellules des parois racinaires. Des estimations du pourcentage de la production totale de matière sèche végétale perdue par exsudation et par décomposition s'étaisent entre 2 et 20% (Nye et Tinker, 1977; Curl et Truelove, 1986). Dans une plantation de caféier et d'arbres d'ombrage du Venezuela, la production racinaire dans les premiers 7,5 cm du sol a été mesurée à 6 600 kg/ha/an, avec une forte variation saisonnière de la biomasse vivante des racines, ce qui prouve le renouvellement (Cuenca *et al.*, 1983).

Il y a donc un élément dans les systèmes racinaires qui ressemble en partie à la chute de la litière de feuilles. Chez les ligneux, les racines structurales sont comparables au tronc et aux branches, qui ont une croissance constante et un renouvellement faible, tandis que les racines nourricières sont comparables aux feuilles, aux fruits et aux fleurs, qui tombent et repoussent.

Le troisième aspect important est que le système racinaire contient une appréciable proportion des éléments nutritifs emmagasinés. En forêt dense humide, sur ferralsol, 10% de l'azote végétal se trouvent dans les racines, et dans une forêt sur podzol pauvre en éléments nutritifs, il représente 40% (Jordan *et al.*, 1982). Les éléments nutritifs des systèmes racinaires sur deux sites dans des forêts de succession étaient répartis comme suit (Koopmans et Andriesse, 1982):

Pourcentage des éléments nutritifs de la biomasse végétale contenue dans les racines				
	N	P	K	Ca
Sri Lanka	16	9	13	17
Sarawak	13	28	18	12

Si l'on fait la moyenne des deux sites, la teneur en % d'éléments nutritifs et la biomasse nutritive dans les racines étaient les suivantes: azote 0,67%, soit 76 kg/ha, phosphore 0,04%, soit 3,5 kg/ha; potassium 0,57%, soit 53 kg/ha; calcium 0,90%, soit 122 kg/ha (Andriesse *et al.*, 1984, 1987).

Un autre processus possible est le transfert d'assimilats des racines d'une plante à celles d'une autre, probablement par des liaisons mycorhiziques. Un tel transfert, s'il a lieu, serait capable de court-circuiter l'exsudation dans la solution du sol et l'absorption normale par les racines d'une autre plante (Fitter, 1985).

Mycorhizes

Les mycorhizes sont des associations symbiotiques entre les racines de plantes et les champignons du sol. Les ectomycorhizes restent extérieures aux racines de leur hôte, tandis que les endomycorhizes y pénètrent. Parmi ces dernières, les mycorhizes arbusculaires vésiculaires (VAM) sont les plus répandues et ont l'impact potentiel le plus grand sur la nutrition des plantes.

Les mycorhizes absorbent les hydrates de carbone de la plante hôte. En retour, elles étendent efficacement le système racinaire de la plante, en contribuant à l'extraction d'éléments nutritifs du sol. Les ions des éléments nutritifs ne migrent que sur de courtes distances dans le sol, aussi cette extension du système racinaire permet-elle de capter une plus grande quantité d'éléments, et ainsi d'augmenter l'absorption par rapport au lessivage. Les mycorhizes sont particulièrement précieux pour l'assimilation du phosphore, étant donné la très courte distance de transmission des ions phosphate dans le sol. C'est également valable pour le phosphate ajouté sous la forme d'engrais (CIPEA., 1986).

Les communautés naturelles de plantes et de sols contiennent des mycorhizes adaptées à l'environnement local. Pour les ligneux plantés, l'inoculation peut être nécessaire; en l'absence des lignées adéquates, les effets de l'inoculation de mycorhizes sur la croissance peuvent être spectaculaires. Dans les plantations de conifères, l'inoculation est une pratique courante, mais elle peut être nécessaire aussi en agroforesterie. Ainsi, pour obtenir des taux de croissance et de fixation d'azote élevés sur un ferralsol, l'inoculation de *Rhizobium* appropriés et la colonisation mycorhizienne se sont révélées indispensables (Purcino *et al.*, 1986). La décomposition des hyphes mycorhiziens est aussi une voie de retour des éléments nutritifs au sol (Fogel, 1980).

Compétition des racines pour les éléments nutritifs

Dans les systèmes agroforestiers de tous types, il peut se poser le problème de la compétition pour les éléments nutritifs entre les systèmes racinaires des ligneux et ceux des plantes herbacées adjacentes. Bien que cet effet soit vraisemblable et souvent signalé, les conditions dans lesquelles il se produit et son importance n'ont pas encore été clairement établies. A ce jour, la plupart des travaux expérimentaux n'ont pas réussi à distinguer la compétition pour les éléments nutritifs au niveau de l'interface arbiculture des effets de l'ombrage, de la compétition pour l'humidité et du recyclage des éléments nutritifs par la litière.

On peut modéliser la compétition pour les éléments nutritifs entre les systèmes racinaires (Gillespie, 1989). Les éléments nutritifs se déplacent dans le sol par diffusion et flux de masse. Le phosphore a la vitesse de déplacement la plus petite, le potassium une vitesse moyenne et l'azote et les nitrates la vitesse la plus grande. Ceci entraîne de fortes concentrations en phosphore autour des racines, alors que l'azote a des taux inférieurs et montre aussi les déficiences les plus étendues. Une teneur plus élevée en eau augmente la vitesse de diffusion et par conséquent, la compétition entre les racines. Les grosses racines épuisent les réserves nutritives environnantes, tandis que les radicelles (et les hyphes mycorhiziens) entraînent une concentration plus élevée dans le sol immédiatement alentour.

La compétition pour les éléments nutritifs se produit lorsque les zones de déficience s'étendent à plus de la moitié de la distance entre les racines. Elle est donc de moins en moins probable respectivement pour l'azote, pour le potassium et pour le phosphore. La demi-distance moyenne entre les racines est donnée approximativement par:

$$r = 1/(\pi \cdot Lv)^{0.5}$$

où Lv est la densité d'enracinement (cm/cm³). La densité d'enracinement des arbres est typiquement moindre que celle des céréales et des légumineuses herbacées, par exemple 0,5 cm/cm³ pour *Robinia pseudoucacia*, comparé à 5 cm/cm³ pour

des céréales (et 50 cm/cm³ ou davantage pour certaines graminées). La combinaison de ligneux avec des cultures augmenterait la densité racinaire de 5 à 10 cm/cm³ et la demi-distance moyenne entre racines serait de l'ordre de 0,25 à 0,18 cm. Dans ces conditions, la compétition entre les plantes risque d'apparaître pour l'azote, peut-être aussi pour le potassium, mais pas pour le phosphore (Gillespie, 1989).

La densité d'enracinement et la distribution des racines pour une plante donnée varient selon le type de sol, le régime d'humidité, et suivant que le sol est relativement fertile ou dégradé. Dès que l'on disposera d'informations sur la densité d'enracinement de ligneux et de cultures donnés, il sera possible de modéliser la concurrence pour les éléments nutritifs et d'utiliser ces informations dans la conception de systèmes agroforestiers.

Racines et fertilité du sol sous agroforesterie

En ce qui concerne la fertilité du sol, les racines ont pour fonction de contribuer au maintien de la matière organique et des conditions physiques, et de prélever les éléments nutritifs et l'eau. Pour les ligneux, la fonction nutritionnelle comprend le prélèvement des éléments nutritifs des couches profondes du sol, leur restitution par la litière à la surface du sol et l'accroissement du rapport entre le prélèvement et les pertes par lessivage. Ils ont en outre une fonction indirecte de stabilisation du sol, réduisant ainsi la perte d'éléments nutritifs par érosion.

La restitution des résidus racinaires constitue un apport de matière organique au sol même lorsque tous les résidus de surface ont été enlevés. Ceci explique que les systèmes agricoles à faible taux d'intrants ne cessent jamais complètement de fonctionner. Même lorsque les résidus de culture sont enlevés, une partie de la matière organique acquise par photosynthèse et transmise aux racines est transférée au sol. Le système d'utilisation des terres le plus dommageable pour le sol que l'auteur ait observé était une plantation d'*Eucalyptus* au Viêtnam, où la litière était ramassée, et où, au moment de la récolte, on enlevait non seulement les tiges, les branches et l'écorce, mais aussi les racines, qui devaient servir de combustible.

Les effets du taux de croissance et de renouvellement des racines sur la matière organique du sol sont illustrés par la modélisation sur ordinateur d'une communauté boisée tempérée (hêtraie, au Danemark); il a fallu trois siècles théoriques pour atteindre des conditions d'équilibre. L'incertitude relative aux intrants racinaires a été gérée par un test de sensibilité. En diminuant de moitié l'intrant des racines fines, on réduisait la valeur d'équilibre de l'humus de 29%, en doublant le premier, on l'augmentait de 60% (Petersen *et al.*, 1985).

Dans les systèmes de culture itinérante, on constate fréquemment une courbe de la matière organique du sol en dents de scie: chute brutale pendant la période de culture, compensée par une reconstitution constante pendant la période de jachère. La modélisation informatique à l'aide du modèle SCUAF (chapitre 15), donne une image différente. L'élévation de la matière organique du sol pendant la jachère forestière est lente, étant donné qu'une grande part de la croissance végétale est destinée à la biomasse permanente. La remise à neuf principale se produit à l'abattage: même si la plupart du matériel épigé se perd dans la combustion, la masse racinaire résiduelle meurt et est transformée en matière organique dans le sol. Au lieu de l'image conventionnelle en dents de scie, on a plutôt des pics intermittents, avec une succession d'apports par la décomposition des racines et de pertes pendant la période de culture.

Le tableau 26 montre des données comparant les biomasses des racines et des feuilles (mais pas la biomasse épigée totale) dans une série de systèmes d'utilisation des terres au Costa Rica et au Mexique. Dans cinq des neuf systèmes présentés, dont trois des quatre systèmes agroforestiers, la biomasse racinaire dépasse la biomasse foliaire. La biomasse absolue des racines en agroforesterie est plus du double de celle de tous les systèmes agricoles mentionnés et, sachant qu'il existe un renouvellement des racines, cette constatation est importante pour évaluer la quantité de MO et d'éléments nutritifs pénétrant dans le sol.

En culture intercalaire en baies, on a observé une amélioration de la croissance des racines de maïs à proximité des haies sur des parcelles où les émondages des arbustes étaient enlevés, et dans l'ensemble, sur de telles parcelles plutôt que sur des parcelles de contrôle sans haies (Yamoah *et al.*, 1986b; voir tableau 25 p. 108). On ne sait pas si cela est dû aux effets microclimatiques ou aux effets des racines des haies.

On affirme souvent que les schémas d'enracinement des ligneux et des cultures devraient de préférence être différents, pour diminuer la compétition pour l'eau et pour les éléments nutritifs. Par exemple, en Tanzanie, à Morogoro (climat subhumide), la distribution des racines fines en fonction de la profondeur du sol dans des plantations de deux ans de *Leucaena*, *Cassia siamea*, *Prosopis chilensis* et chez deux espèces d'*Eucalyptus* s'est trouvée semblable à celle du maïs. Les autres ont conclu que "les espèces ligneuses étudiées sont susceptibles d'entrer en compétition avec le maïs... pour l'eau et pour les éléments nutritifs" (Jonsson *et al.*, 1988). Ceci n'est en aucun cas évident; des effets bénéfiques mutuels entre racines pourraient en effet contrebalancer la compétition, et des recherches sont nécessaires.

Dans les systèmes sylvopastoraux, l'existence de racines pivots profondes permet aux arbres et aux arbustes de rester verts pendant toute la saison sèche, procurant des aliments à un moment où tout le tapis herbacé est déjà consommé ou est inconsommable. A ces périodes, le contraste entre la condition physique des caprins (qui brouent le feuillage) et celle des bovins (qui souvent ne le font pas) est frappant.

On trouve dans le désert de Sonoran, en Californie (Etats-Unis), une remarquable adaptation à un environnement désertique. Grâce à l'eau souterraine présente en profondeur, le mesquite (*Prosopis glandulosa*) développe des nodules fixateurs d'azote et des champignons VAM à 4 ou 5 m de profondeur (Virginia *et al.*, 1986).

Dans les systèmes agroforestiers où le feuillage des ligneux est enlevé, situation inévitable dans les zones en déficit fourrager, l'intrant de matière organique et le recyclage des éléments nutritifs par les racines rapportent quelque peu au sol. Cependant, la modélisation donne à penser que ces apports sont normalement insuffisants pour maintenir la fertilité du sol.

Pour faire le meilleur usage des systèmes racinaires en agroforesterie, il faut maximiser leurs effets positifs tout en réduisant la compétition entre ligneux et cultures pour l'eau et pour les éléments nutritifs. Le point de départ que l'on donne habituellement est de combiner des cultures à enracinement superficiel avec des ligneux à enracinement profond. La compétition pour les éléments nutritifs est minimisée si l'extension latérale des racines est réduite, mais cela réduit aussi la capacité des racines des ligneux à recueillir les éléments nutritifs. Buck (1986) discute plus largement de cet aspect du partage des ressources.

Les observations sur les racines sont coûteuses en temps et en efforts, mais on ne peut s'en passer pour comprendre le fonctionnement des systèmes dans leur ensemble. L'approche fondamentale est celle des coupes transversales dans l'interface entre ligneux et cultures, à l'aide du carottage, de tranchées, de sacs à croissance ou de rhizotrons (tranchées permanentes munies d'une plaque de verre le long d'un des côtés). Un résumé des techniques se trouve dans Anderson et Ingram (1989). Pour la recherche spécialisée, un marquage au carbone 14 permet de mesurer le renouvellement des racines (Helal et Sauerbeck, 1983).

Il est clair qu'on a besoin de plus amples informations sur ce sujet. Les besoins essentiels comprennent: (1) le rassemblement systématique des connaissances sur la biomasse racinaire et sur les schémas d'enracinement des espèces ligneuses; (2) l'enregistrement du développement des racines à l'interface entre ligneux et cultures dans une grande diversité de conditions environnementales. Il est souvent difficile de discerner les effets des racines des variations microclimatiques, mais on peut isoler les premiers par l'utilisation de plaques verticales et on peut réduire les secondes par un émondage fréquent. Des expériences comparant des cultures intercalaires avec un paillage équivalent obtenu par transport manuel à partir de plantations ligneuses peuvent aider à identifier les effets spécifiques des racines sur le sol.

La recherche sur les racines doit être menée dans des stations disposant d'équipements spéciaux, mais ne doit pas s'y limiter. Dans toute recherche agroforestière, il faudrait faire au moins des observations d'échantillons de la masse et de la distribution des racines. La méthode la plus simple consiste à creuser une tranchée en travers de l'interface à la fin d'un essai. Dans ce cas-ci, peu d'observations valent mieux qu'aucune.

Tableau 26 - Biomasse des feuilles et des racines (kg/ha) dans neuf systèmes d'utilisation des terres (Ewel, 1982).

	Systèmes agricoles			Systèmes forestiers			Systèmes agroforestiers		
	jeune maïs	maïs mûr	patate douce	plantation de <i>Gmelina</i>	forêt secondaire	cafétier/ <i>Erythrina</i>	cacaoyer/ <i>Cordia</i>	jardin arboré	jachère plantée
Biomasse foliaire	330	1000	1070	3120	3 070	2720	2040	2450	2480
Biomasse racinaire 390(jusqu'à 25 cm)	1150	410	1280	2 170	2350	2720	3 070	4220	
Rapport racines - feuilles	1,18	1,15	0,38	0,41	0,71	0,86	1,33	1,25	1,70

Chapitre 13: Arbres et arbustes pour l'amélioration du sol

Quelles propriétés un ligneux doit-il avoir pour améliorer le sol?

La question de savoir quelles propriétés d'un arbre ou d'un arbuste en font un élément favorable à la fertilité du sol n'a pas encore été élucidée. Les propriétés déjà reconnues sont la fixation d'azote et, pour la foresterie de réhabilitation, une production élevée de biomasse et un potentiel anti-érosion. Il serait très intéressant d'avoir à cet égard des fils conducteurs qui permettraient d'identifier les espèces naturelles potentiellement utilisables en agroforesterie.

La liste qui suit n'énumère pas les propriétés souhaitables en agroforesterie en général, mais seulement celles qui se rapportent spécifiquement à la fertilité du sol. Les propriétés qui sont susceptibles de rendre un ligneux pérenne propre au maintien ou à l'amélioration de la fertilité du sol sont:

- une production élevée de biomasse épigée;
- un taux élevé de fixation d'azote;
- un réseau dense de fines racines ayant soit des racines nourricières abondantes, soit une capacité d'association avec des mycorhizes;
- l'existence de quelques racines profondes;
- une teneur en éléments nutritifs modérée à forte, mais équilibrée dans le feuillage;
- une teneur appréciable en éléments nutritifs dans le système racinaire;
- soit une décomposition rapide de la litière là où la libération d'éléments nutritifs est nécessaire, soit une vitesse modérée de décomposition de la litière, là où l'on recherche une couverture du sol comme protection contre l'érosion;
- l'absence de substances toxiques dans le feuillage ou les exsudats racinaires;
- la capacité de croître sur des sols pauvres, pour la réhabilitation ou la restauration du sol.

Il serait souhaitable d'établir des normes définissant les termes 'élevé', 'dense', etc. pour les principales zones climatiques. Les tableaux 20, 22, 23 et 24 présentent quelques données comparatives.

La principale interaction avec la gestion porte sur les parties de l'arbre qui sont récoltées, ce qui conduit à faire des réserves sur la question de savoir s'il est souhaitable d'avoir une teneur élevée en éléments nutritifs dans la biomasse épigée. En effet, quelles que soient les parties qui sont restituées au sol, comme litière, résidus d'émondage, restitution partielle de la récolte (copeaux de bois et écorce), ou sous la forme de fumier, une teneur élevée en éléments nutritifs est souhaitable. Mais pour les parties qui sont entièrement et définitivement coupées, plus la teneur en éléments nutritifs est faible, moins l'effet de la coupe est défavorable à la fertilité du sol. Ceci vaut notamment pour les espèces fixatrices d'azote, qui peuvent même avoir un effet net négatif sur l'azote du sol si les réserves d'azote fixé dans les tissus de la plante sont prélevées lors de la coupe.

Ceci est particulièrement important pour les ligneux riches en éléments spécifiques. Si, par exemple, un ligneux se révèle accumulateur de calcium, ce calcium a nécessairement été prélevé du sol. Le fait que toute la litière atteint le sol pourrait être avantageux, une partie du calcium étant pompée des horizons profonds et recyclée vers la surface; mais si toutes les parties aériennes sont coupées, le sol s'appauvrit en calcium.

Nous avons déjà parlé de la vitesse de décomposition de la litière. Si la plus grande partie de la litière tombe, ou si l'élagage est pratiqué pendant la saison sèche, et si des plantes annuelles sont associées en cultures intercalaires, la décomposition rapide de la litière assure la libération d'éléments nutritifs au moment important du début de la croissance. Il existe un lien causal dans la mesure où une litière à teneur élevée en azote est plus susceptible de se décomposer rapidement. Pour la protection contre l'érosion, la couverture du sol est importante et une vitesse plus lente de décomposition des feuilles est donc désirable.

Propriétés des ligneux qui favorisent l'amélioration du sol

- production élevée de biomasse;
- fixation d'azote;
- système racinaire bien développé;
- biomasse, (y compris les racines), à haute teneur en éléments nutritifs;
- décomposition rapide ou modérée de la litière;
- absence de substances toxiques dans le feuillage ou les exsudats des racines.

Notes sur les arbres et les arbustes

Le tableau 27 donne une liste des genres et des espèces de ligneux reconnus comme favorables au maintien ou à l'amélioration de la fertilité du sol. La colonne "Noté par" cite les ligneux notés comme avantageux pour les sols dans des revues antérieures, notamment par Nair (1984), Huxley (1985), Sanchez *et al.* (1985), Sanchez (1987) et von Maydell (1986). La mention "essais de cultures en couloirs" concerne les espèces que l'on sait avoir été incluses dans des essais de cultures en couloirs entre des haies, pour lesquelles on suppose que la fertilité figure parmi les avantages potentiels; la liste est en voie d'extension rapide. "NFTA" indique les espèces choisies prioritairement pour l'amendement par la Nitrogen-Fixing Tree Association (Lyman et Brewbaker, 1982). D'autres espèces ont été ajoutées, au départ de publications, d'opinions émises par des collègues et de mon expérience personnelle.

Si l'on exclut les bambous, le tableau 27 mentionne 32 genres et 55 espèces. Les espèces manifestement les plus répandues sont une espèce reconnue à l'origine par les agriculteurs, *Faidherbia albida*, et une autre sélectionnée et améliorée initialement par des scientifiques, *Leucaena leucocephala*. A la lumière des essais et de l'avis général, les espèces au potentiel particulièrement élevé sont:

- *Acacia albida*;
- *Acacia tortilis*;
- *Calliandra calothyrsus*;
- *Casuarina equisetifolia*;
- *Erythrina poeppigiana*;
- *Gliricidia sepium*;
- *Inga jinicuil*;
- *Leucaena leucocephala*;
- *Prosopis cineraria*;
- *Sesbania sesban*.

A côté des 55 espèces de la liste, il en existe certainement beaucoup d'autres d'une grande valeur pour l'amélioration du sol.

Les notes qui suivent se réfèrent seulement aux aspects concernant la fertilité du sol et ne visent pas à constituer un guide pour la sélection d'espèces. Les informations sur l'adaptation à l'environnement, la phénologie et la diversité des utilisations figurent dans l'inventaire de l'ICRAF sur les arbres et arbustes à usages multiples (von Carlowitz, 1986a, tableaux 3 et 4) et dans les rapports de la Nitrogen Fixing Tree Association (Lyman et Brewbaker, 1982; MacDicken et Browbaker, 1984); des références spéciales sur la zone semi-aride sont données par Baumer (1983) et von Maydell (1986).

Acacia

Faidherbia albida (synonyme: *Acacia albida*) est l'une des deux espèces les mieux connues en tant que ligneux améliorateur du sol. Elle est estimée par les agriculteurs dans la zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest et dans la zone subhumide, par exemple au Sénégal, au Malawi et en Ethiopie. On a signalé des augmentations de 50 à 100% de la matière organique et de l'azote sous les arbres, par comparaison avec les sols périphériques, de même qu'une augmentation de la capacité de rétention de l'eau. Les récoltes de mil et d'arachide non fertilisés peuvent être de 100% plus élevées sous les arbres. La différence est moins grande avec l'utilisation d'engrais et semble être due principalement à la fixation d'azote. Les récoltes de maïs et de sorgho étaient en Ethiopie supérieures de 50% sous les arbres, les différences étant significatives à des niveaux de probabilité inférieurs à 5%. En plus de la préservation des arbres naturels, *F. albida* a été planté dans le cadre de projets de développement (Radwanski et Wickens, 1967; Dancette et Poulain, 1969; Felker, 1978; Kirmseet Norton, 1984; Poschen, 1986; Miehe, 1986; CTFT, 1988).

Acacia senegal (gomme arabique) est utilisé dans un système de culture intercalaire par rotation au Soudan; après quatre ans de culture intercalaire avec des cultures vivrières, les arbres sont laissés en jachère pour la restauration du sol pendant près de 16 ans avant d'être abattus et replantés (Ballal, communication personnelle).

Les acacias profitent à la croissance des pâturages et aux sols sous leur couvert, notamment *A. tortilis* (*inclus* dans les dix meilleurs cités ci-dessus comme étant représentatif des ligneux sylvopastoraux). On ignore dans quelle mesure le potentiel d'amélioration des sols et des pâturages est un effet direct de l'arbre lui-même ou est dû aux animaux et aux oiseaux qu'il abrite.

Beaucoup d'autres acacias profitent au sol, principalement, pense-t-on, grâce à la fixation d'azote. *Racosperma auriculiforme* (= *Acacia auriculiformis*) et *Acacia mearnsii* ont été reconnus comme espèces à utiliser en priorité pour l'amendement du sol par la Nitrogen-Fixing Tree Association (Lyman et Brewbaker, 1982). *Racosperma mangium* (= *Acacia mangium*), dont la litière se décompose plus lentement, libère donc les éléments nutritifs plus lentement que la plupart des acacias.

Alnus

C'est l'un des rares genres n'appartenant pas aux légumineuses qui comprennent des espèces fixatrices d'azote. Il est adapté aux zones subtropicales à tempérées et est apprécié sur les hautes terres tropicales, par exemple au Népal et au Costa Rica. Les *Alnus* sont utilisés pour la réhabilitation des terres laissées à l'abandon.

Azadirachta

Azadirachta indica (neem) est un arbre qui se prête à une grande variété d'utilisations, entre autres à l'amélioration du sol. Bien qu'il ne fixe pas l'azote, on a pu observer des améliorations de l'azote du sol sous les neems, de même qu'une teneur plus élevée du sol en carbone et en bases, avec un pH plus faible (Radwanski, 1969; Radwanski et Wickens, 1981).

Tableau 27 - Arbres et arbustes pour l'amélioration du sol.

Espèces	Notée par	Fixation d'azote	Essais de cultures en couloirs	NFTA
<i>Acacia albida</i>	NHSM	X		XX
<i>Acacia auriculiformis</i>		X		XX
<i>Acacia mangium</i>		X		X
<i>Acacia mearnsii</i>	N	X		XX
<i>Acacia senegal</i>	NM	X		X
<i>Acacia tortilis</i>	NM	X		X
<i>Acioa barteri</i>	N		X	
<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	H	X		
<i>Alchornea cordifolia</i>			X	
<i>Albizia lebbeck</i>	NHM	X	X	X
<i>Albizia falcataria</i>				X
<i>Alnus</i> sp.pl., notamment		X		X
<i>nepalensis, acuminata</i>				
<i>Anacardium occidentale</i>	M			
<i>Azadirachta indica</i>	NM			
Bambous				
<i>Cajanus cajan</i>	N	X	X	
<i>Calliandra calothyrsus</i>	NH	X	X	X
<i>Cassia siamea</i>	NM		X	
<i>Cassuarina</i> sp.pl.,	M	X		X
principalement <i>equisetifolia</i>				
<i>Cordia alliodora</i>	NS			
<i>Erythrina</i> sp.pl. notamment	NHS	X	X	X
<i>poeppigiana, fusca</i>	NS	X		XX
<i>Faidherbia albida</i>				
<i>Flemingia congesta</i>		X	X	
<i>Gliricidia sepium</i>	NH	X	X	X
<i>Gmelina arborea</i>	NS		X	
<i>Grevillea robusta</i>	NH			
<i>Inga</i> sp. pl., notamment <i>edulis jinicuil dulce, vera</i>	NHS	X		X
<i>Lespedeza</i> sp. pl., notamment <i>bicolor; thunbergii</i>	N	X		
<i>Leucaena leucocephala</i>	NHSM	X	X	XX
<i>Leucaena diversifolia</i>		X		X
<i>Melia</i> sp.pl., notamment <i>azedarach, volkens</i>				

<i>Parkia</i> sp.pl., notamment <i>africana</i> , <i>biglobosa</i> , <i>clappertonia roxburghii</i>	NM	X		X
<i>Parkinsonia aculeata</i>	M			X
<i>Paulownia</i> sp.pl.				
<i>Pithecellobium dulce</i>	N	X		X
<i>Prosopis</i> spp., notamment	NHS	X		X
<i>cineraria</i> ,			X	X
<i>glandulosa</i> ,		X		X
<i>juliflora</i>	M	X		X
<i>Robinia pseudoacacia</i>				
<i>Samanea saman</i>				X
<i>Sesbania</i> sp.pl., notamment	H			
<i>bispinosa</i> ,	N	X		
<i>glandiflora</i> ,	N	X		X
<i>rostrata</i>		X	X	
<i>sesban</i>		X		
<i>Terminalia</i> sp.pl.	H			
<i>Ziziphus</i> sp.pl., notamment <i>mauritana</i> , <i>nummularia</i>	NM			

Noté pal N = Nair (1984). H = Huxley (1985 : p. 19) 5 = Sanchez (1987) Sanchez et al. (1985). M = von Maydell (1986) NFTA = prioritaire pour la Nitrogen-Fixing Tree Association (Lyman et Brewbaker: 1982) xx = première priorité, x = seconde priorité

Bambous

L'agroforesterie définit les bambous comme appartenant aux ligneux pérennes. Ils apparaissent couramment dans les jardins de case, où la litière abondante est susceptible de contribuer à la fertilité du sol. Sous des bambous *Dendrocalamus* au nord du Viêt-nam, les conditions physiques du sol sont exceptionnellement bonnes (observation personnelle). Le même genre a été signalé comme accumulateur de potassium (Toky et Ramakrishnan, 1982). Dans les systèmes d'agriculture itinérante au nord-est de l'Inde, les bambous jouent un rôle important dans l'accumulation des éléments nutritifs (Ramakrishnan, 1989). Etant donné leur aptitude aux fonctions de barrage et de couverture pour le contrôle de l'érosion, il importe de faire des recherches sur la capacité potentielle des bambous pour améliorer la fertilité.

Cajanus

Cajanus cajan (pois cajan) est parfois considéré comme un ligneux en agroforesterie et a été utilisé dans des essais de cultures en couloirs avec haies. Planté en courbes de niveau, il peut lutter contre l'érosion. A Ibadan, une culture par rotation de maïs et de *Cajanus* a amélioré, comme on s'y attendait, les propriétés physiques du sol, ainsi que les teneurs en carbone organique et en bases, par comparaison avec le maïs cultivé en continu (Hulugalle et Lal, 1986).

Calliandra

Calliandra calothyrsus est un ligneux à usages multiples particulièrement apprécié à Java, mais dont la culture est très répandue par ailleurs. Il peut s'établir sur des sols dégradés et les améliorer, et il a été utilisé sur jachères améliorées. Les raisons avancées sont la fixation d'azote, une litière abondante à dé composition rapide et un enracinement profond pour assimiler les éléments nutritifs (National Research Council, 1983).

Cassia

Cassia siamea a la capacité de croître sur des sols pauvres et est fréquemment utilisé dans des essais de cultures intercalaires avec haies, bien que l'on ignore dans quelle mesure il peut améliorer le sol. On ne sait avec certitude si ce ligneux est fixateur d'azote ou non, mais de l'avis général, il ne l'est pas. La litière est abondante, et il ne semble pas y avoir d'effets défavorables importants sur les cultures adjacentes. Etant donné la facilité d'établissement de cette espèce, son taux de survie, sa tolérance à la sécheresse et aux sols pauvres, son potentiel pour le contrôle de l'érosion et la variété de ses utilisations, il serait souhaitable que des recherches soient entreprises concernant ses effets sur le sol.

Casuarina

Casuarina equisetifolia est largement utilisé, avec succès, comme stabilisateur de dunes et comme brise-vent, et *C. glauca* pour le contrôle de l'érosion. Outre qu'il fixe l'azote, ce ligneux est intéressant par l'enchevêtrement dense de ses racines, qui stabilisent la surface du sol et, par leur décomposition, contribuent à l'accumulation de matière organique. Il existe une série d'espèces adaptées aux différents climats (National Research Council, 1984).

Cordia

Cordia alliodora est d'un usage répandu en Amérique centrale, seul ou en combinaison avec *Erythrina* et *Inga*, comme "arbre d'ombrage" dans les plantations de caféier et de cacaoyer. Cette appellation sous-estime ses fonctions. Même sans être associé à un arbre fixateur d'azote, il permet un recyclage considérable des éléments nutritifs par sa litière (Alpizar *et al.* 1986, 1988).

Erythrina

Erythrina poeppigiana est la principale espèce fixatrice d'azote utilisée en combinaison avec le caféier et le cacaoyer en Amérique latine. Il est élagué et les émondons sont utilisés comme paillis, avec des effets fertilisants bien connus des agriculteurs. En plus de la fixation d'azote, il assure un recyclage considérable des éléments nutritifs, notamment ceux apportés par les engrains, donnant encore plus d'efficacité à son utilisation (p. 125).

Eucalyptus

"L'*Eucalyptus* un arbre très utilisé par les agriculteurs, mais qui n'a pas la faveur des spécialistes en agroforesterie". Cette adaptation de la définition de l'avoine par le Dr Johnson justifie qu'il soit inclus dans les notes concernant les ligneux et la fertilité du sol, car les eucalyptus les plus courant, (par exemple, *E. camaldulensis* *E. globulus*, *E. grandis* *E. saligna* *E. tereticornis*) ont la réputation d'être une cause d'érosion et de dégradation du sol. Leurs effets sur le cycle de l'eau ont également suscité assez de passions pour en faire une question politique dans certaines sphères. Cependant, les agriculteurs continueront à planter des eucalyptus comme source de bon bois de feu à croissance rapide, facile à établir, résistante et tolérant des récélages répétés.

Poore et Fries (1985) ont fait le point sur les effets des monocultures *d'Eucalyptus* constatés sur les sols. Les conclusions de ce bilan, qui fait référence comme source de faits et de discussion, sont les suivantes:

"Les eucalyptus ne sont pas des arbres satisfaisants pour le contrôle de l'érosion. Dans des conditions climatiques sèches la végétation basse est supprimée à cause de la compétition des racines. L'enlèvement ou le brûlage de la litière accentue cet effet."

"Une forêt naturelle d'eucalyptus semble contrôler le lessivage et le ruissellement aussi bien et peut-être même un peu mieux que d'autres forêts naturelles.... La où les eucalyptus sont plantés sur sol nu, il y a accumulation et incorporation de matière organiques. Aucune podzolisation ni détérioration irréversible du sol n'a pu être établie... [Cependant], la culture d'eucalyptus en rotation de courte durée en particulier si la totalité de la biomasse est enlevée conduit à l'épuisement rapide de la réserve d'éléments nutritifs dans le sol. C'est là une conséquence directe de la croissance rapide: la même chose se produirait avec n'importe quelle autre culture très productive.... Les effets de l'eucalyptus sur la végétation basse dépendent beaucoup du climat.... La végétation au sol est moins affectée dans des conditions climatiques humides que dans des conditions sèches où elle peut être fortement réduite On a observé que diverses espèces d'eucalyptus produisent des toxines qui inhibent la croissance de certaines herbacées annuelles "

L'ouvrage ci-dessus ne s'occupe pas des effets sur les cultures agricoles, pour lesquelles il n'y a jusqu'ici que peu d'observations systématiques. La lente décomposition de la litière de feuilles ne réduit pas en elle-même le rythme de restitution des éléments nutritifs, et la plupart des effets défavorables sur les cultures intercalaires peuvent bien être dus à l'ombrage ou aux toxines, plutôt qu'à la fertilité du sol proprement dite. Selon des données de George (1982) et de Turner et Lambert (1983), l'ordre de grandeur de l'enlèvement des éléments nutritifs lors de la coupe d'arbres entiers d'eucalyptus âgés de 10 ans avec une biomasse de 90 000 kg MS/ha correspond à 100 à 400 kg/ha d'azote, 10 à 100 kg/ha de phosphore, 100 à 250 kg/ha de potassium et 250 à 1000 kg/ha de calcium. La litière des feuilles est peu abondante les premières années et augmente à maturité. Environ deux tiers de la quantité brute d'éléments nutritifs assimilés annuellement retournent au sol dans la litière.

Ainsi, beaucoup des effets défavorables sur les cultures associées ne sont pas dus en premier lieu à la dégradation de la fertilité du sol. Cependant, il n'y a aucune raison de mettre en doute l'idée répandue selon laquelle des eucalyptus ne devraient pas être plantés en mélange intime avec des cultures. Des expériences sont en cours au Malawi et en Inde, avec *E. tereticornis* planté en carrés, à des espacements variés, avec diverses cultures intercalaires; les résultats seront intéressants, car ils montreront dans quelle mesure les récoltes sont réduites et, si des échantillons de sol sont prélevés, l'importance des changements pédologiques.

Gliricidia

Gliricidia sepium est l'une des rares espèces identifiées jusqu'ici qui puisse voir un potentiel égal à celui de *Leucaena* comme arbuste à élaguer en culture intercalaire avec haies (NFTA, 1988). S'il est élagué latéralement, il est moins compétitif, du moins au-dessus de la surface du sol. Des effets favorables sur les propriétés du sol ont été observés à Ibadan, au Nigeria (Yamoah *et al.*, 1986c). Dans un autre essai à Ibadan, des proportions diverses d'émondons de *Gliricidia* ont été enlevées, le rendement du maïs s'est alors montré clairement lié à la quantité de résidus laissés comme paillis. Dans la restauration d'un sol dégradé, les parcelles de maïs avec *Gliricidia* avaient un rendement supérieur à celui obtenu sur les parcelles témoins dès la troisième année (Atta-Krah et Sumberg, 1988). A Maha Illuppallama, au Sri Lanka (climat subhumide mouilleux *Gliricidia Sepium* utilisé en culture intercalaire avec le maïs a permis d'obtenir des rendements considérablement plus élevés que celui des parcelles témoins sans ligneux (Weerakoon, communication personnelle).

Gmelina

Gmelina arborea est une source appréciée de perches et de bois d'œuvre, mais a un effet dépressif sur les rendements des cultures adjacentes, peut-être en raison de la densité de l'ombrage. Une étude de terrain a été faite sur son impact sur le sol, mais les conclusions en sont malheureusement présentées d'une manière telle qu'il est difficile de mesurer leur ampleur (Chijoke, 1980). Par comparaison avec la forêt naturelle existante auparavant, la réaction du sol a légèrement augmenté pendant les six premières années de plantation de *Gmelina*. Des quantités importantes d'azote, de calcium et particulièrement de potassium, sont assimilées par l'arbre en croissance, mais il y a également une restitution considérable de ces éléments dans la litière. A Para, au Brésil (p. 109), des augmentations du pH et du calcium ont été observées sous une plantation de *Gmelina* et des recherches sont en cours à Yurimaguas, au Pérou (Perez *et al.*, 1987). Là où une amélioration de l'acidité du sol est souhaitable et la main d'œuvre abondante, il serait utile d'effectuer des recherches sur le potentiel de *Gmelina* planté en peuplements compacts avec transfert manuel de la litière de feuilles aux cultures.

Grevillea

Grevillea robusta est souvent cultivé comme arbre d'ombrage et planté sur les structures de conservation du sol. La décomposition de sa litière est modérément lente. Aucun effet sur la fertilité du sol n'a été prouvé, mais il semble tout au moins ne pas avoir d'effets nuisibles (Neumann, 1983).

Inga

Plusieurs espèces d'*Inga*, notamment *I. jinicuil*, sont appréciées pour la fixation d'azote et le recyclage des éléments nutritifs dans la litière. Ces espèces sont utilisées en combinaison avec le cafier et le cacaoyer (p. 125). Elles sont également utilisées en cultures intercalaires avec haies.

Leucaena

Leucaena leucocephala, le ligneux le plus largement utilisé dans l'agroforesterie moderne, scientifique, en particulier (mais en aucune façon exclusivement) dans les haies de cultures intercalaires, est spécialement apprécié pour ses effets sur la fertilité du sol. Il était utilisé pour créer de l'ombre et pour améliorer le sol dans les plantations d'arbres et cafiers à Java dès 1900 (Dijkman, 1950). Autrefois considéré comme un arbre spécialement adapté aux tropiques humides, on a découvert récemment qu'il égalait, voire dépassait les performances de la plupart des autres espèces dans les climats subhumides mouilleux et secs et même en marge de la zone semi-aride. Dans quelques régions, on encourage son utilisation comme substitut aux engrains; toutefois, utilisé en combinaison avec des taux modérés d'engrais, il améliore la réponse des cultures (céréales, légumineuses, riz). Il est actuellement gravement attaqué par la psylle *Heteropsylla cubana* dans certaines régions. Un effet résiduel est possible sur la culture suivante (Pound et Cairo, 1983; Chagas et al., 1983; Nair, 1984: p.50; BOSTID, 1984; Kang et al., 1985; Read et al., 1985; Weerakoon et Gunasekera, 1985; Brewbaker, 1987).

Etant donné ce succès, il est utile de noter les propriétés que possède *Leucaena* en relation avec la fertilité du sol:

- une forte production de biomasse: 10 000 à 25 000 kg MS/ha/an;
- une fixation d'azote élevée: 100 à 500 kg N/ha/an;
- un niveau élevé d'azote dans les feuilles (2,5 à 4%) et donc un taux élevé de restitution dans la litière ou les émondons;
- une teneur appréciable en autres éléments nutritifs dans les feuilles (voir tableau 23);
- une biomasse élevée dans le système racinaire, qui pourrait entraîner un important renouvellement annuel de la matière organique et des éléments nutritifs (non prouvé) et avoir un effet favorable sur les propriétés physiques du sol.

La principale par rapport au sol est une réduction de la croissance sur les sols acides, notable au-dessous du pH 5,5 et grave au-dessous du pH 5. D'autres espèces sont plus tolérantes à l'acidité, dont *L. diversifolia* et *L. Shannoni* (Board of Science and Technology for International Development (BOSTID), 1984; Fox et al., 1985; Brewbaker, 1987). Les *Leucaena Research Reports* contiennent de plus amples informations.

Comme avec toutes les espèces, l'amplitude des effets sur la fertilité du sol dépend étroitement du degré de restitution au sol des émondons. Des essais pratiqués à Ibadan sous un climat bimodal subhumide mouilleux ont montré que des haies de *Leucaena* d'une largeur et d'un écartement de 4 m sont capables de maintenir la fertilité du sol et les rendements des cultures intercalaires, à condition que les résidus d'émondage soient restitués, mais que les propriétés du sol et les rendements des cultures déclinent si les émondons sont enlevés (Kang et al., 1985).

Parkia

En Afrique de l'Ouest, on signale des rendements plus élevés des cultures sous le couvert de plusieurs espèces de *Parkia*. Ces espèces comprennent *P. clappertonia* au Ghana (Asare, communication personnelle) et certaines espèces au Nigeria (observation personnelle).

Paulownia

Paulownia elongata a été décrit comme "L'arbre miracle de la Chine". Il est cultivé dans les zones de climat tempéré subhumide (latitude de 30 à 40°N). Avec des arbres espacés de 5 x 10 m, les rendements du blé en culture intercalaire sont aussi élevés que sur un terrain dépourvu d'arbres; avec un espacement de 5x20 à 40 m, ils sont de 7 à 10% plus élevés. Le système racinaire est profond, en général, de plus de 40 cm (Chin Saik Yoon et Toomey, 1986; Zhao Hua Zhu, 1986 a et b).

Prosopis

Prosopis cineraria est un arbre des zones semi-arides à subhumides sèches apprécié en Inde pour diverses utilisations, dont l'effet qu'il exerce sur la fertilité du sol. Il peut se prévaloir d'être le sujet des premières publications sur l'agroforesterie, car "le, écritures indiennes abondent d'un grand nombre de références sur le khejri". Ses effets réputés sur la fertilité s'étendent au-delà des sols, au bétail et aux humains!

On observe une croissance des pâturages et des cultures égale ou meilleure sous *Prosopis* que sur les terres voisines. De ce point de vue, *Prosopis* est plus performant que les autres espèces dans la même région. La teneur du sol en éléments nutritifs est plus élevée sous ces arbres que sur les terres voisines à découvert (tableau 13). Il y a également une amélioration de la matière organique, des conditions physiques du sol et de la capacité de rétention d'eau (Aggarwal, 1980; Mann et Saxena, 1980).

Prosopis juliflora ne semble pas égaler *P. cineraria* dans l'amélioration du sol, mais a une forte production de litière et il a été utilisé avec succès pour la restauration de terres érodées. Il se pourrait cependant qu'il entre en compétition avec les cultures adjacentes.

Certaines espèces de *Prosopis* ont une capacité remarquable de production de biomasse et de fixation d'azote sous une chaleur extrême et en situation de sécheresse. Dans le désert de Sonora en Californie (Etats-Unis), une teneur du sol de 10 200 kg d'azote par hectare sous le couvert de l'arbre a été signalée, par comparaison avec 1 600 kg à découvert (Rundel et al., 1982; Felker et al., 1983).

Robinia

Robinia pseudoacacia (robinier noir) est un excellent fixateur d'azote pour la restauration des terres érodées et pour la stabilisation du sol sur des pentes abruptes.

Sesbania

Au moins quatre espèces de *Sesbania* sont utilisées en agroforesterie tant traditionnelle que moderne. Dans l'ouest du Kenya, *S. sesban* est planté parmi les cultures et on a observé des rendements qualitativement égaux ou supérieurs sous les ligneux. *S. rostrata*, en plus de la nodulation racinaire, est unique du fait de l'abondante nodulation de la tige: 4 000 à 5 000 nODULES SUR UNE TIGE DE 3 M (International Institute of Tropical Agriculture (IITA), 1983), ce qui en fait une espèce prometteuse pour des cultures intercalaires avec haies.

S. rostrata et *S. bispinosa* tolèrent tous deux l'engorgement et peuvent donc être utilisés en association avec la riziculture inondée, soit plantés le long de diguettes, soit comme culture de jachère de courte durée (Tran Van Nao, 1983; Bhardwaj et Dev, 1985).

Zizyphus

Comme le *Prosopis*, cet arbuste de la zone semi-aride est mentionné dans les écritures indiennes 11 est particulièrement apprécié comme fourrage. Une monographie de Mann et Saxena (1981) sur *Z. nummularia* ne mentionne pas spécifiquement la fertilité du sol. Cependant, les analyses du feuillage montrent une teneur très élevée et équilibrée en éléments nutritifs qui, en plus de l'enracinement profond, pourrait en faire une espèce utile du point de vue de la fertilité du sol si elle n'est pas utilisée comme fourrage.

Chapitre 14: Pratiques agroforestières pour la fertilité du sol

L'approche analytique de la fertilité du sol sous agroforesterie suivie dans les chapitres 8 à 13 n'est pas une fin en soi. Ce qui importe, c'est de connaître les effets des systèmes agroforestiers dans leur ensemble sur les propriétés du sol, et par là la durabilité de ces systèmes.

Il faut préciser d'emblée que très peu d'études sont disponibles à ce jour sur le cycle des éléments nutritifs et/ou le suivi du sol sous des systèmes agroforestiers par rapport à des parcelles de contrôle sous agriculture. Les principales études réalisées à ce jour portent sur la culture en couloirs, au centre expérimental de l'IITA à Ibadan, au Nigeria, et sur les cycles nutritifs, selon diverses combinaisons de plantations au Costa Rica et dans d'autres pays d'Amérique centrale. En dehors de ceux-ci, les résultats sont clairsemés. Les rares essais pour lesquels des données sont disponibles en sont pour la plupart à un stade précoce et, étant donné la microvariabilité du sol, les résultats n'ont en général aucune valeur statistique.

Dans les prochaines années, cette situation pourrait évoluer profondément. On a entrepris (ou prévu) un grand nombre d'essais de systèmes agroforestiers qui, espérons-le, inclueront des études sur le cycle des éléments nutritifs et sur le sol.

Aussi les notes qui vont suivre contiennent-elles forcément de nombreuses affirmations qui sont des hypothèses qualitatives ou plausibles. Quelquesunes sont suffisamment bien étayées pour que les pratiques concernées soient adoptées par les agriculteurs, mais bien peu ont été prouvées selon les normes scientifiques habituelles.

Fertilité du sol et systèmes agroforestiers indigènes

Commençons par considérer le rôle de la fertilité du sol dans les systèmes agroforestiers indigènes. L'Inventaire des systèmes agroforestiers de l'ICRAF a enregistré quelque 200 systèmes, dont 26 ont déjà fait l'objet d'une description complète publiée (Nair, 1984-1988, 1987b, 1989).

Le tableau 28 énumère ces descriptions, ainsi que les pratiques auxquelles elles font appel, classées conformément au tableau 4. Elles ne sont pas le résultat d'une procédure d'échantillonnage, mais l'équilibre des pratiques y est néanmoins intéressant.

Sur les 42 exemples de pratiques, 30 ont un arrangement spatial mixte de la composante ligneuse, soit plus de 70% du total, et 6, soit 15%, ont une disposition zonale. Les pratiques les plus largement représentées sont les jardins ligneux (9), les ligneux sur terres de culture (7) et les combinaisons de plantations et de cultures (6), suivies par deux pratiques sylvopastorales, les ligneux sur pâturage (5) et les plantations avec pâturage (3). Le système zonal dominant est la plantation de lisière (3). Il semble qu'à l'inverse des scientifiques, les agriculteurs préfèrent espacer les arbres de manière aléatoire.

La dernière colonne indique le degré d'emphase sur les aspects pédologiques, où E,e = contrôle de l'érosion; F,f = fertilité du sol; R,r = réhabilitation ou utilisation des sols pauvres. Les lettres minuscules signifient une mention brève, tandis que les majuscules indiquent que cet aspect est décrit comme important.

Dix-sept descriptions font allusion à des effets favorables sur le sol, dont 10 les considèrent comme un aspect important; rien que pour la fertilité, leur nombre est respectivement de 16 et 9. Une seule description mentionne des effets négatifs sur le sol: la compétition entre ligneux et cultures pour les ressources du sol contribuerait à la baisse du rendement des cultures sous régime de taungya en Thaïlande.

On peut en conclure que, malgré le manque de "preuves scientifiques", le maintien de la fertilité du sol est une caractéristique identifiée d'un pourcentage important de systèmes agroforestiers indigènes.

Du point de vue de la productivité du sol, Nair (1984) a passé huit pratiques en revue: la culture itinérante, la jachère ligneuse plantée, la pratique taungya, les ligneux sur terres de culture, les combinaisons de plantations, la culture intercalaire, les ligneux pour la conservation du sol et les brise-vent, auxquelles s'ajoutent des notes brèves sur quelques autres pratiques. On trouvera dans Hecht (1982) un bilan des systèmes agroforestiers d'Amérique du Sud, avec des commentaires sur la fertilité du sol.

Tableau 28 - Aspects pédologiques des systèmes agroforestiers indigènes. Basé sur l'Inventaire des systèmes agroforestiers de l'ICRAF Nair, 1989). En ce qui concerne les aspects du sol les lettres minuscules indiquent une mention brève. Pour les références voir les Descriptions de systèmes agroforestiers (A.F.S.D.) 1 à 26 dans la liste des publications de l'ICRAF.

Numéro AFSD	Pays	Pratiques agroforestières	Composants	Arrangement	Aspects du sol
1,3	Tanzanie	Jardins de case	AS	SM	F
2	Thaïlande	Taungya	AS	R	a
4	Népal	Ligneux pour conservation du sol en terrasses;	AS	SZ	E
		plantation sur lisières	AS	SZ	F,R
5	Paraguay	Ligneux sur terres cultivées	AS	SM	
6	Papouasie Nouvelle-Guinée	Combinations de plantations et cultures	AS	SM	
7	Sri Lanka	Combinaisons de plantations et cultures	AS	SM	e
8	Brésil	Plantations cultivées avec pâturage	SP	SM	
9	Papouasie Nouvelle-Guinée	Jachère améliorée;	AS	AS	f
		combinaisons de plantations et cultures	AS	SM	
10	Venezuela	Combinaisons de plantations et cultures;	AS	SM	
		ligneux sur pâturages	SP	SM	
11	Brésil	Ligneux sur terres cultivées;	AS	SM	e,f
		ligneux sur pâturages	AS	SM	
12	Iles Pacifique Sud	Combinaisons de plantations et cultures;	AS	SM	
		jachère améliorée;	AS		
		plantations avec pâturages;	SP	SM	
		jardins de case	AS	SM	
13	Brésil	Combinaisons de plantations et cultures	AS	SM	
14	Malaisie	Plantations avec pâturages	SP	SM	f
15	Inde (Tamil Nadu)	Ligneux sur terres cultivées;	SM	AS	F,R
		plantations de lisières;	AS	SZ	
		brise-vent	AS	SZ	
16	Soudan	Ligneux sur terres cultivées;	SM	SM	f
		ligneux sur pâturages	SP	SM	
17	Ethiopie	Ligneux sur terres cultivées	AS	SM	F
18	Inde (Kerala)	Jardins de case	ASP	SM	f
19	Rwanda	Ligneux sur terres cultivées;	AS	SM	E,F
		plantations de lisières;	AS	SZ	
		jardins de case;	AS	SM	
		bois à usages multiples;	T		
		(plus jachère améliorée,			
		essai de cultures en couloirs)			
20	Kenya	Taungya	AS	R	
21	Indonésie (Sumatra)	Jardins ligneux multiétagés	AS	SM	E,F
22	Inde (nord-ouest)	Ligneux sur terres cultivées;	AS	SM	E,F,R
		ligneux sur pâturages;	SP	SM	
		brise-vent;	AS	SZ	
		réhabilitation	T		
23	Sri Lanka	Jardins de case	AS	SM	e

24	Nigéria	Jardins de case	ASP	SM	F
25	Bangladesh	Jardins de case	AS	SM	
26	Espagne	Ligneux et pâturages	ASP	SM	F

Note:

Composants:

AS = agrosylvicultural, SP = sylvopastoral, ASP = agrosylvopastoral T = ligneux prédominants;

Arrangements:

R = en rotation SM = spatial mixte SZ = zonal;

Aspects du sol:

E. e = contrôle de l'érosion F. f = fertilité R. r = réhabilitation ou utilisation des sols pauvres A, a = effets contraires.

Systèmes agroforestiers indigènes

La majorité des systèmes indigènes d'agroforesterie sont soit en rotation, comme dans la culture itinérante, soit de type spatial mixte. Ceci contraste avec les arrangements zonaux qui sont souvent préférés dans les travaux expérimentaux en station. Il y a là matière à réflexion.

Le maintien de la fertilité du sol est une caractéristique de la plupart des systèmes agroforestiers indigènes et est reconnue comme telle par les agriculteurs.

Fertilité du sol et pratiques agroforestières spécifiques

Pratiques de rotation

Culture Itinérante C'est la pratique agroforestière la plus ancienne et encore la plus répandue. La restauration de la fertilité du sol par des jachères naturelles a fait l'objet de nombreuses études de cas et analyses, dont certaines sont devenues des classiques, telles les études sur la forêt au Zaïre (Bartholemew *et al.*, 1953) et celles sur les zones de forêt et de savane d'Afrique de l'Ouest (Greenland et Nye, 1959; Nye et Greenland 1960). Un symposium de la FAO (1974) est aussi d'un grand intérêt. Pour des données sur les changements du sol, nous noterons les études suivantes:

- Nord-Est de l'Inde
Ramakrishnan et Toky (1981)
Mishra et Ramakrishnan (1983)
Toky et Ramakrishnan (1983)
- Cycles de l'azote, 4 sites
Gliessman *et al.* (1982)
- Trois sites en Asie
Andriesse (1987)
Andriesse *et al.* (1984, 1987)
- Thaïlande
Kyuma *et al.* (1985)
- Zambie,
chitemene dans la zone de savane
Stromgaard (1984, 1985)
- Pérou
Szott *et al.* (1987c)

Les résultats fondamentaux sont bien connus. La culture itinérante est un système durable à condition que la période de jachère soit assez longue pour que les conditions du sol redeviennent identiques à celles des cycles antérieurs de jachère et de culture. Les longueurs relatives de la période de culture et de jachère sont exprimées pour le facteur R. et pour toute combinaison donnée de climat et de sol, il existe un seuil critique du rapport de la culture à la jachère: le besoin de repos du sol (tableau 12, p. 69). Si la valeur R réelle excède le besoin de repos, la dégradation du sol s'installe et s'aggrave progressivement au cours des cycles successifs. Les estimations de la durée du repos nécessaire sous des systèmes agricoles à faibles

intrants sont élevées, de sorte que poursuivre la culture itinérante par des méthodes traditionnelles n'est pas envisageable avec les densités actuelles de population. La végétation de savane est moins efficace que la forêt pour restaurer la fertilité du sol.

On a pensé autrefois que le cycle des changements pédologiques correspondait à la constitution progressive de matière organique du sol et d'éléments nutritifs pendant la période de jachère et à l'accroissement de la biomasse forestière. C'est le cas pour le carbone et l'azote, mais en ce qui concerne les autres éléments nutritifs, l'accroissement se produit en grande partie dans la végétation et n'est libéré dans le sol que par l'abattage et le brûlage. Une étude a mis en évidence que l'azote ne diminuait pas pendant la période de culture, ce qui est attribué à la libération de l'azote par la décomposition des restes de troncs d'arbres (Jordan et al., 1983).

En Thaïlande, on a observé que le carbone, l'azote et le phosphore du sol atteignaient leur plus bas niveau trois ou quatre ans après le début de la période de jachère (Nakano et Syahbuddin, 1989). En appliquant les mêmes méthodes à trois sites d'Asie du Sud-Est avec une pluviosité annuelle respectivement de 900 à 1 200 mm, de 1 560 mm, et de 4 000 mm, on a constaté des différences considérables dans les mécanismes de recyclage des éléments nutritifs (Andriesse et al., 1984, 1987; Andriesse, 1987). Nous sommes loin de pouvoir répondre à toutes les questions que pose la culture itinérante traditionnelle.

Nous avons vu (p. 108) les effets des méthodes de défrichage et de brûlage de la végétation sur les propriétés du sol. Les points à retenir sont que le brûlage permet, en cas de besoin, de produire une libération rapide d'éléments nutritifs, mais qu'il n'est pas efficace si l'on considère la perte d'azote et de carbone végétal.

Une première tentative pour améliorer la culture itinérante a fait appel au système en corridors, où la jachère était encore une régénération naturelle de la forêt, mais la zone défrichée pour la culture était une bande le long d'une courbe de niveau, remontant la pente au cours des années successives pour produire une succession de ceintures forestières alignées sur les courbes de niveau, à différents stades de régénération (Jurion et Henry, 1969). Bien qu'il contrôle l'érosion, le système ne change pas le besoin de repos en soi, ni le rapport durable population/terrain. Des tentatives plus radicales pour améliorer la culture itinérante classent celle-ci dans les jachères ligneuses améliorées.

Jachère ligneuse améliorée. Le recours à une rotation des cultures avec des ligneux plantés, au lieu de permettre la colonisation par la végétation naturelle, peut se justifier par le désir de récolter la production des ligneux, ou d'augmenter le taux d'amélioration du sol, voire les deux. Dans la mesure où on récolte des parties de l'arbre comme fourrage ou bois de feu, on réduit le potentiel d'amélioration du sol. C'est Ahn (1979) qui a le premier discuté de la longueur des périodes de jachère à prévoir.

De longues rotations de ce type sont peu courantes. La plupart des exemples ne sont pas une simple alternative de la combinaison de ligneux et de cultures, mais impliquent un élément de culture mélangée spatialement. Dans un système agrosylvopastoral en Equateur, deux années de cultures vivrières sont suivies de huit ans de jachère formée d'*Inga edulis* associé à des bananiers et une légumineuse fourragère, cette dernière étant consommée sur place par les cochons. La litière provenant d'*Inga* est supposée améliorer la fertilité du sol (Bishop, 1982). Les premiers résultats au Pérou indiquent que la production de biomasse d'*Inga* dépasse celle d'une jachère herbacée et est égale ou supérieure à celle d'une forêt naturelle (Szott et al., 1987b).

Dans le système à *Acacia senegal* du Soudan, des ligneux sont plantés au milieu de cultures vivrières et la production vivrière se poursuit pendant quatre ans. Les 16 années suivantes, les ligneux sont gemmés pour prélever la gomme arabique et la fertilité du sol peut se reconstituer (Ballal, communication personnelle).

Des jachères ligneuses de moins d'un an sont également possibles. Ce type de jachère était une pratique traditionnelle dans les rizières du nord du Viêt-nam (Tran Van Nao, 1983). Dans le nord-ouest de l'Inde, *Sesbania cannabina* planté sous irrigation pendant 65 jours entre des cultures de blé et de riz ajoutait au sol 7 300 kg MS/ha et 165 kg N/ha (Bhardwaj et Dev, 1985).

Pour la conception de systèmes agroforestiers, il est fondamental de connaître l'efficacité relative d'amélioration du sol d'une jachère ligneuse de rotation et d'un arrangement spatial concurrent de ligneux. La plupart des jachères ligneuses de rotation qui ont été observées occupent bien plus de 50% du temps dans le cycle cultures/ligneux, un rapport qui serait économiquement inacceptable pour ce qui est de l'espace utilisé. Le succès apparent des cultures intercalaires, dans lesquelles la couverture ligneuse est généralement inférieure à 35%, donne à penser que l'efficacité est meilleure avec des systèmes spatiaux. On soupçonne des mécanismes qui accroissent l'efficacité du cycle des éléments nutritifs dans les systèmes spatiaux d'en être la cause, mais ces mécanismes ne sont pas connus; la réponse pourrait résider dans la permanence du réseau racinaire des ligneux.

Nous ne disposons d'aucune information directe sur cette question fondamentale. Les stations de recherche devraient mettre en oeuvre des essais contrôlés, où les effets sur le sol d'une espèce ligneuse, d'une gestion et d'un rapport ligneux-cultures identiques seraient comparés. Le plus simple est de planter une jachère en rotation à côté des essais de cultures intercalaires.

Plutôt que la simple alternance de ligneux et de cultures, les systèmes les plus rentables sont probablement ceux qui associent la culture intercalaire et la rotation. Des possibilités de ce genre sont discutées dans Prinz (1986).

Taungya. La méthode taungya repose sur la plantation de cultures vivrières avec des arbres à bois d'œuvre, soit en rotation, soit en association pendant les quelques premières années d'établissement des arbres. Personne ne prétend que ce soit particulièrement avantageux pour la fertilité du sol. Beaucoup d'arbres exploités en foresterie laissent le sol en mauvais état après l'abattage et les récoltes de cultures alimentaires sont très faibles. Qui plus est, on soupçonne

les cultures annuelles d'être en compétition pour les éléments nutritifs avec les arbres nouvellement plantés. Au Kenya, dans la séquence forêt de montagne, cultures vivrières et plantations forestières (*Vitex*, *Cupressus*, *Pinus patula*, *Grevillea*), les taux de carbone et de phosphore du sol étaient nettement plus faibles sous plantation que sous la forêt; on a supposé que la chute de fertilité se produisait pendant la période de récolte, mais aucun échantillon n'a été prélevé à cette période pour le prouver (Robinson, 1967). Des études sur les changements du sol sous plantations forestières sont nécessaires (Lundgren, 1978; Adlard et Johnson, 1983).

La pratique taungya semble avoir un effet nul ou défavorable sur le sol et ne devient sérieusement indésirable que si l'on laisse une érosion substantielle se produire.

Pratiques spatiales mixtes

Ligneux sur terres de culture. De nombreuses espèces ligneuses sont plantées sur des terres de culture dans un but productif, qui n'ont pas d'effet adverse net sur les cultures voisines. Un petit nombre d'espèces sont plantées ou, le plus souvent, conservées en partie en raison de leur effet bénéfique sur le sol et sur les rendements culturaux, connu des agriculteurs et dans quelques cas prouvé par les scientifiques. On a donné ci-dessus des exemples et des preuves pour *Faidherbia albida*, *Acacia senegal*, *Paulownia* sp.pl. et *Prosopis cineraria*. Les systèmes obtenus sont des systèmes spatialement ouverts (par comparaison avec les systèmes spatialement denses tels que les jardins de case). Là où de tels effets se produisent, il paraît logique de les accentuer en augmentant la densité des ligneux jusqu'à un point approchant le couvert complet, ou jusqu'à ce que la diminution de l'éclairage agisse à l'encontre de l'amélioration de la croissance des cultures.

Jardins ligneux multiétagés. Les jardins de case incarnent toutes les qualités demandées aux systèmes agroforestiers. Ils sont fortement productifs, tout à fait durables et très faciles à réaliser. Ils sont caractéristiques surtout des tropiques humides et subhumides mouilleux (Fernandes et Nair, 1986).

Le maintien de la fertilité du sol est obtenu par une combinaison d'intrants, notamment les déchets domestiques, et par un haut niveau de recyclage de la matière organique et des éléments nutritifs. Les nombreuses espèces présentes entraînent une forte chute de litière ayant des propriétés très variées. Il est courant de constater une forte production de biomasse par les bambous. Le système racinaire à plusieurs niveaux peut contribuer à l'efficacité du recyclage des éléments nutritifs.

Ces caractéristiques sont tellement évidentes que personne ne les a mesurées. Il serait intéressant de réaliser une étude du recyclage des éléments nutritifs dans un jardin de case pour montrer les ordres de grandeur des flux nutritifs et le degré de recyclage. On pourrait plus aisément faire une comparaison des propriétés du sol dans les jardins de case et sur les terres cultivées avoisinantes. Les jardins de case peuvent-ils atteindre le degré de fermeture du cycle nutritif et les conditions physiques et chimiques du sol enregistrés sous la végétation naturelle?

Il existe également des jardins ligneux multiétagés qui couvrent une surface plus grande que les jardins de case. En raison d'intrants moins intensifs, leur impact sur les sols sera moins nettement favorable que dans les jardins de case, et comparable à celui des combinaisons de plantations.

Combinaisons de plantations et de cultures. Des combinaisons de caféier ou de cacaoyer avec *Erythrina*, *Inga* et *Cordia* constituent un système agroforestier très répandu en Amérique centrale. C'est aussi l'une des deux seules pratiques agroforestières pour lesquelles on dispose d'une quantité appréciable de résultats de recherches pédologiques. On trouvera la liste de ces études dans le tableau 29.

Les principaux arbres associés sont *Erythrina poeppigiana* et d'autres espèces d'érithrine, *Inga jinicuil* et *I. leptoloba*, quelquefois avec des bananiers ou des fruitiers, ainsi que *Cordia alliodora*. Certaines plantations sont fertilisées. En règle générale, *Erythrina* est émondé régulièrement. On laisse *Cordia* pousser jusqu'à maturité avant de le couper pour le bois d'œuvre. On appelle d'ordinaire ces arbres "arbres d'ombrage", mais il est évident que l'amélioration du sol fait partie de leurs fonctions (Beer, 1987); ce rôle est reconnu par les agriculteurs. Les résultats saillants de ces études sont indiqués plus loin (cf. tableau p. 126).

Les quantités d'éléments nutritifs restituées sont quelquefois aussi importantes que les taux d'engrais appliqués.

Les études centraméricaines ne comprennent pas le suivi dans le temps des changements du sol. Il est toutefois implicite qu'on maintient le sol en bonne condition de stabilité et de fertilité. Aranguren *et al.* (1982) donnent pour des profondeurs respectives de 0 à 20 cm et de 20 à 30 cm, des valeurs de 5,3 et 4,1% de carbone, ce qui correspond à celles de sols sous végétation naturelle dans ces climats.

Pour six sites de la Côte d'Ivoire, Loué (s.d.) a comparé les teneurs en éléments nutritifs des feuilles de caféier et des sols pour des plantations avec et sans *Albizia gummifera* comme arbre d'ombrage. Pour les feuilles de caféier, l'enrichissement moyen pour les sites ombragés était de 23% d'azote et de 16% de phosphore, tandis que le potassium montrait de grandes variations. En ce qui concerne les sols, les plantations ombragées avaient un taux d'azote et de phosphore légèrement plus élevé (mais toujours insignifiant), mais étaient de 46% moins riches en potassium, ce qui laisse penser qu'*Albizia* puise le potassium dans le sol.

Tableau 29 - Etudes pédologiques sur des combinaisons de plantations et de cultures.

Référence	Pays	Système	Aspects pédologiques
Jimenez & Martinez (1979)	Mexique	Caféier + <i>Inga</i> , arbre fruitier	Biomasse
Aranguren <i>et al.</i> (1982)	Venezuela	Caféier+Erythrina, <i>Inga</i>	Cycle de N
		Cacaoyer + <i>Erythrina, Inga</i>	Cycle de N
Bornemisza (1982)	Colombie	Caféier + <i>Inga</i>	Biomasse, cycle de N
Roskoski (1982)	Mexique	Caféier + <i>Inga</i>	Fixation de N
Roskoski & van Kessel (1982)	Mexique	Caféier + <i>Inga</i>	Fixation de N
Glover & Beer (1986)	Costa Rica	Caféier+Erythrina	Biomasse, cycles nutritifs
		Caféier+ <i>Erthrina, Cordia</i>	Biomasse, cycles nutritifs
Russo & Budowski (1986)	Costa Rica	Caféier+ <i>Erthrina</i>	Biomasse, cycles nutritifs
Alpizar <i>et al.</i> (1986, 1988)	Costa Rica	Cacaoyer + Erythrina	Biomasse, cycles nutritifs matière organique,
		Cacaoyer+Cordia	
Loué (s.d.)	Côte d'Ivoire	Caféier+ <i>Albizia gummifera</i>	Differences nutritives entre feuilles et sol
Beer (1987)	Amérique latine	Divers	Effets des arbres résumés

Dans des combinaisons de plantations et de cultures en Amérique centrale, les effets suivants ont été attribués aux arbres d'"ombrage" (Beer, 1987):

- amélioration du drainage et de l'aération par les racines;

- apport de paillis;
- enrichissement de la matière organique du sol;
- réduction de l'érosion;
- réduction du taux de décomposition de la matière organique du sol;
- recyclage des éléments nutritifs qui ne sont pas accessibles aux cultures;
- fixation d'azote;
- moindre utilisation des herbicides chimiques, qui inhibent les organismes bénéfiques du sol.

Pratiques zonales

Cultures intercalaires avec haies (cultures en allées, cultures en couloirs, haies de barrages). Dans la culture intercalaire, des rangées d'arbres ou d'arbustes (haies) sont plantées en association le long de cultures herbacées (allées). Elles sont communément appelées cultures en allées, bien que ce nom soit moins approprié, en ce qu'il ne fait référence qu'à l'une des deux composantes. Etablies sur des pentes dans le but principal de lutter contre l'érosion, on peut les appeler barrières de haies, mais il n'existe pas de différence nette entre ces dernières et les cultures en couloirs avec haies établies sur des pentes. La culture intercalaire suscite parmi les scientifiques plus d'intérêt aujourd'hui qu'aucun autre système agroforestier. Nettement plus de la moitié des études de D & D (diagnosis and design) l'ont recommandée pour aider à résoudre les problèmes d'utilisation des terres. Parmi les raisons invoquées, son aptitude à conserver la fertilité du sol revient fréquemment.

1. De grandes quantités de biomasse retournent au sol, sous forme de litière ou d'émondades, tant venant du cafier et du cacaoyer que des arbres. Les valeurs, en kg/MS/ha/an sont les suivantes:

Mexique	Cafier seul	6 000	Jimenez & Martinez (1979)
	Cafier, <i>Inga</i>	8400 à 9 500	
	Cafier, <i>Inga, Musa</i>	10 200	
Colombie	Arbres d'ombrage	4 600 à 13 100	Bornemisza (1982)
Costa Rica	Cafier et ligneux,	16 000 à 17 000	Glover & Beer (1986)
	ligneux fournissant la moitié		
Costa Rica	<i>Erythrina</i>		Russo & Budowskj (1986)
	2 étages par an	11 800	
	I étage par an	18 500	
	litière incluse	22 700	
Costa Rica	Cacaoyer	7 000	Alpizar <i>et al.</i> (1986 1988)
	<i>Cordia</i>	10 400	
	Cacaoyer, <i>Cordia</i>	17 400	
Costa Rica	Cacaoyer	7 000	Alpizar <i>et al.</i> (1986, 1988)
	<i>Erthyrina</i>	9 400	
	Cacaoyer, <i>Erythrina</i>	16 400	

2. Il y a une importante fixation d'azote par *Erythrina* et *Inga jinicuil*, donnant les valeurs suivantes en kg N/ha/an:

Colombie	<i>Inga jinicuil</i>	40	Bornemisza (1982)
Mexique	<i>Inga jinicuil</i>	47	Roskoski (1982)
Mexique	<i>Inga jinicuil</i>	35	Roskoski et van Kessel (1985)

3. Il y a un important retour d'éléments nutritifs au sol sous forme de litière et d'émondades, spécialement mais pas uniquement d'azote, avec des valeurs en kg/ha/an de:

		N	P	K	Ca	
Venezuela	Feuilles de cafier	28				Aranguren <i>et al.</i> (1982)
	Feuilles de ligneux	78				
	Rameaux, fleurs et fruits	66				
	Cafier et ligneux	172				
Costa Rica (fertilisé)	Cafier	148	8	88	87	Glover & Beer (1986)
	Ligneux	183	14	74	241	
	Cafier et ligneux	331	22	162	328	
Costa Rica	<i>Erythrina poeppigiana</i>	330	32	156	319	Russo et Budowski (1986)
Costa Rica (fertilisé)	Cacaoyer	43	8	30		Alpizar <i>et al.</i> (1986, 1988)
	Cordia	71	6	35		
Costa Rica	Cacaoyer, <i>Cordia</i>	115	14	65	125	Alpizar <i>et al.</i> (1986, 1988)
	Cacaoyer	53	3	27		
	<i>Erythrina</i>	122	7	27		
	Cacaoyer + Erythrina	175	9	54	163	

		N	P	K	
Nigeria	<i>Leucaena leucocephala</i>	105	4		Agboola (1982)
	<i>Gliricidia sepium</i>	84	4		
	<i>Tephrosia candida</i>	118	7		
	<i>Cajanus cajan</i>	151	9		
Nigeria	<i>Leucaena leucocephala</i>	200			Kang et Bahiru Duguma (1985)
	<i>Gliricidia sepium</i>	140			
	<i>Acacia barteri</i>	29			
	<i>Alchornea cardifolia</i>	84			
Nigeria	<i>Gliricidia sepium</i>	238	14	152	Yamoah <i>et al.</i> (1986a)
	<i>Flemingia congesta</i>	78	8	57	
	<i>Cassia siamea</i>	186	20	100	
Sri Lanka	<i>Leucaena leucocephala</i>	105	5	37	Weerakoon et Gunasekera (1985)
Kenya	<i>Leucaena leucocephala</i>	196			Bashir Jama <i>et al.</i> (1986)

C'est aussi l'une des deux pratiques agroforestières sur lesquelles d'importantes recherches pédologiques ont été faites. Le tableau 30 cite quelques études publiées. Un grand nombre d'autres résultats doivent s'y ajouter suite aux essais mis en place ou prévus récemment. Les résultats marquants de ces études sont les suivants:

- les rangées de haies peuvent produire une biomasse importante, typiquement de l'ordre de 2 000 à 5 000 kg MS/ha/an dans les climats subhumides frais, et jusqu'à 10 000 kg dans les climats humides. Il s'agit de valeurs par hectare de surface totale du système;
- de grandes quantités d'azote peuvent être fixées par les rangées de haies, par exemple 75 à 120 kg N/ha en 6 mois avec *Leucaena* (Mulongoy, 1986);
- des quantités appréciables d'éléments nutritifs sont contenues dans les émondons des haies et peuvent donc être ajoutées au sol, si elles ne sont pas récoltées, donnant les valeurs en kg/ha/an mentionnées dans le tableau ci-dessus.

Il faut remarquer que les espèces non fixatrices d'azote *Acacia* et *Alchornea* n'en contiennent pas moins des quantités appréciables d'azote, tout comme cette autre espèce qui n'est probablement pas fixatrice, *Cassia siamea*. Jusqu'à 30% de l'azote des émondages atteint les cultures, le reste étant perdu par entraînement et par pertes gazeuses (Mulongoy, 1986). Ainsi la contribution probable à l'absorption d'azote par la culture est d'environ 30 à 80 kg N/ha/an; si l'on multiplie par le coefficient approximatif de 10 à 15 utilisé classiquement, ce facteur à lui seul pourrait augmenter la production des céréales de 300 à 1 200 kg/ha:

- les résidus d'émondage de la plupart des espèces utilisées se décomposent rapidement, avec une libération correspondante d'éléments nutritifs. L'évolution de l'azote minéral est par conséquent rapide. *Leucaena* a une décomposition particulièrement rapide et libère 50% des éléments nutritifs dans les 25 premiers jours;

- dans de nombreuses études, tant à Ibadan qu'ailleurs, il y a au moins une combinaison d'espèces de haies et d'espacements dans laquelle le rendement des cultures est plus élevé que sur les parcelles de contrôle sans haies. Les essais à Ibadan l'ont montré à plusieurs reprises et c'est également apparu pour au moins une combinaison sur la plupart des sites d'un réseau de sept dans des environnements différents au Kenya (EDI, 1987; Amare Getahun, communication personnelle). Ceci, en dépit du fait que les rangées cultivées à proximité des haies montrent habituellement (mais pas toujours) une chute progressive de rendement.

Par contre, beaucoup d'essais montrent une réduction du rendement des cultures par unité de surface totale. Ceci est quelquefois compensé par la valeur (pour l'agriculteur ou sur le marché) de la production de fourrage et/ou de bois de feu.

Toute variation, tant positive que négative, du rendement des cultures causée par les haies peut être due à des facteurs divers, microclimatiques ou pédologiques, et aucune étude n'a encore tenté d'isoler ceux-ci. Ce problème est très complexe, Huxley (1986b) en donne une discussion récente, qui combine les sols avec d'autres aspects.

Tableau 30 . Etudes pédologiques des cultures en allées

A. IITA, Ibadan, Nigeria.		
Référence	Espèces de haies	Aspects pédologiques
Kang <i>et al.</i> (1981, 1985)	<i>Leucaena leucocephala</i>	Changements du sol, rendement des cultures
Agboola (1982).	<i>Leucaena leucocephala</i> , <i>Tephrosia candida</i> , <i>Cajanus cajan</i> <i>Gliricidia sepium</i> ,	Biomasse, N et P dans émondages
Kang & Bahiru Duguma (1985)	<i>Leucaena leucocephala</i> , <i>Gliricidia sepium</i> , <i>Acacia barteri</i> , <i>Alchornea cordifolia</i>	N dans émondages
Kang <i>et al.</i> (1985)	<i>Leucaena leucocephala</i>	Changements du sol, rendement des cultures
Mulongoy (1986)	<i>Leucaena leucocephala</i>	Fixation de l'azote, N dans émondages, décomposition de la litière
Sumberg (1986)	<i>Gliricidia sepium</i>	Biomasse
Wilson <i>et al.</i> (1986)	<i>Leucaena leucocephala</i> , <i>Gliricidia sepium</i> , <i>Acacia barteri</i> , <i>Alchornea cordifolia</i>	Eléments nutritifs dans émondages, rendement des cultures, décomposition de la litière
Yamoah <i>et al.</i> (1986a)	<i>Gliricidia sepium</i> , <i>Cassia siamea</i> , <i>Flemingia congesta</i>	Décomposition de la litière
Yamoah <i>et al.</i> (1986b)	<i>Gliricidia sepium</i> , <i>Cassia siamea</i> <i>Flemingia congesta</i>	Biomasse, N, P, K dans émondages, rendement des cultures, racines
Yamoah <i>et al.</i> (1986c)	<i>Gliricidia sepium</i> , <i>Cassia siamea</i> , <i>Flemingia congesta</i>	Changements du sol
Bahiru Duguma <i>et al.</i> (1988)	<i>Leucaena leucocephala</i> <i>Gliricidia sepium</i> , <i>Sesbania grandiflora</i>	Effets du régime d'émondage
Sanginga <i>et al.</i> (1987)	<i>Leucaena leucocephala</i>	Fixation de l'azote

B. Sur d'autres sites			
Référence	Pays	Espèces de haies	Aspects pédologiques
de la Rosa (s.d.)	Philippines	<i>Leucaena leucocephala</i>	Rendement des cultures
Weerakoon (1983)	Sri Lanka	<i>Leucaena leucocephala</i>	Biomasse, rendement des cultures
		<i>Gliricidia maculata</i>	
Weerakoon & Gunasekera (1985)	Sri Lanka	<i>Leucaena leucocephala</i>	Biomasse, éléments nutritifs dans émondages, rendement des cultures, (riz)
Handawela (1986)	Sri Lanka	<i>Gliricidia maculata</i>	Propriétés du sol, rendement des cultures
Bashir Jama <i>et al.</i> (1986)	Kenya	<i>Leucaena leucocephala</i>	Biomasse, éléments nutritifs dans émondages, rendement des cultures, changements du sol (stade précoce)
Szott <i>et al.</i> (1987a) Pérou		<i>Inga edulis</i> , <i>Erythrina spp.</i>	Biomasse, propriétés du sol
		<i>Cajanus cajan</i>	(stade précoce)
EDI (1987)	Kenya	Espèces multiples	Biomasse, rendement des cultures

Une étude a montré un effet positif apparent des systèmes racinaires des haies sur le rendement cultural; en effet, le rendement du maïs sur des parcelles où les émondages étaient enlevées était supérieur à celui des parcelles de contrôle sans haies (Yamoah *et al.*, 1986b).

Deux études ont suivi les changements du sol dans le temps, toutes deux à Ibadan, au Nigeria (climat bimodal subhumide frais). La première a consisté à mélanger *Leucaena* avec une rotation maïs-dolique de Chine (une culture de chaque par année) sur un sol sableux sous climat subhumide frais (Kang *et al.*, 1981, 1985). On a comparé le sol des parcelles où les émondages étaient déposées au sol et celles avec haies mais dont les émondages étaient enlevées (mais aucun renseignement n'a été donné sur les changements du sol sous culture pure). Quelques résultats sont donnés au tableau 31A. L'application des émondages a augmenté la matière organique, le potassium, le calcium et le magnésium, et a substantiellement amélioré la capacité de rétention de l'eau. Il n'y avait pas de différence pour le phosphore. La matière organique du sol a été maintenue pendant six ans, alors qu'il y avait un déclin lorsque les émondages étaient enlevées. Ces changements dans la matière organique ont été modélisés. Bien que les données puissent n'être pas complètement comparables, les niveaux de potassium semblent s'être maintenus dans le temps et les niveaux de calcium semblent avoir augmenté.

La seconde étude à Ibadan a été réalisée sur luvisol ferrique, "infertile par suite d'une utilisation constante" (Yamoah *et al.*, 1986c). Des rangées de haies distantes de 4 m ont été établies avec *Gliricidia sepium*, *Flemingia congesta* et *Cassia siamea*, associés à deux cultures de maïs étalées sur deux ans. Toutes les parcelles ont reçu 60 kg/ha de phosphore et de potassium; les traitements à l'azote s'étaient entre 0 et 90 kg/ha. Pour chaque espèce ligneuse de la haie, les changements dans le sol ont été étudiés avec et sans enlèvement des émondages, à côté d'une parcelle de contrôle dépourvue de haies. Le laps de temps est très court pour déceler des changements dans le sol et la valeur statistique est incertaine, mais certains résultats sont surprenants (tableau 31 B). La baisse de la matière organique dans la parcelle de contrôle a été contrebalancée par *Cassia* et *Gliricidia*, même avec enlèvement des émondages! On pense évidemment aux résidus des racines. L'azote a augmenté dans la parcelle de contrôle, mais est passé à près de deux fois le taux sous *Cassia*, une espèce supposée non fixatrice d'azote. Le phosphore s'est amélioré sous *Cassia* et *Flemingia*, mais aucune des haies n'a freiné la baisse de potassium. Les propriétés physiques du sol étaient nettement meilleures sous toutes les espèces par rapport aux parcelles dépourvues de haies. Les auteurs ont plusieurs fois signalé les effets favorables du "paillis abondant et persistant fourni par *Cassia*".

Tableau 31 - Changements pédologiques sous cultures en couloirs, Ibadan, Nigeria.

A. Leucaena/maïs, parcelles non fertilisées, profondeur du sol 0-15 cm (Kang <i>et al.</i>, 1981, 1985).						
Traitement	Organique	Echange de cations (meq/100 g)			P	
	pH	C	K	Ca	Mg	mg/kg
Avant cultures en couloirs	6,2	0,98	0,25	2,63	102	25
Après 3 ans de cultures en couloirs, émondages enlevés	5,7	0,96	0,16	5,07	0,35	19
Après 6 ans de cultures en couloirs, émondages enlevés	6,0	0,65	0,19	2,90	0,35	27
Après 3 ans de cultures en couloirs, émondages maintenues	5,7	1,47	0,16	5,33	0,43	22
Après 6 ans de cultures en couloirs, émondages maintenues	6,0	1,07	0,28	3,45	0,50	26

B. Gliricidia sepium, Flemingia congesta et Cassia siamea avec maïs, profondeur du sol 0-15 cm (Yamoah *et al.* 1986c)

Changements du sol en 2 ans				
Traitement	C (%)	N (%)	P. méthode 1 de Bray (mg/kg)	Echange de K(meq/100 g)
Gliricidia				
sans émondages	+ 0,13	- 0,019	- 33	- 0,12
avec émondages	+ 0,17	+ 0,001	- 39	- 0,11
Flemingia				
sans émondages	- 0,56	- 0,088	+ 3	- 0,29
avec émondages	- 0,23	+ 0,023	+ 22	- 0,13
Cassia				
sans émondages	+ 0,15	+ 0,023	+ 22	- 0,31
avec émondages	+ 0,70	+ 0,137	+ 29	- 0,22
Pas de haies				
ON'	- 0,17	+ 0,039	- 21	- 0,12
90 N'	- 0,14	+ 0,070	- 16	- 0,15
Propriétés physiques du sol après 2 ans				
Espèces	Densité brute (g/cm³)	Diamètre moyen agrégats (mm)	Teneur en eau à saturation (%)	
Gliricidia	1,26	0,77	39	

Flemingia	1,25	0,57	36
Cassia	1,34	0,70	43
Pas de haies	1,53	0,46	35
Déviation standard	0,05	0,07	1,22



Photo 15 - Arbres sur terrain cultivé: *Acacia albida* *Mangoche*, Malawi.



Photo 16 - Cultures intercalaires avec haies: *Leucaena leucocephala* avec des légumineuses cultivées dans les allées. Hyderabad, Inde.

D'autres données sont fragmentaires. Dans la zone subhumide du Sri Lanka, sous un système de cultures associées à des haies de *Gliricidia mandata* à 5 m sur 1 m, la matière organique du sol et l'azote étaient plus abondants que sur une parcelle de contrôle avec du maïs pur, et la structure du sol était meilleure (résistance plus faible à la compression) (Handawela, 1986). A Maha Illuppallama, au Sri Lanka (climat subhumide frais), les parcelles en culture mélangée avec *Gliricidia sepium*, ont maintenu les niveaux d'azote mais présentent apparemment, après quelques années, des déficiences en phosphore (L. Weerakoon, communication personnelle). Sur la côte du Kenya, les premiers résultats semblent indiquer un accroissement du carbone, du phosphore, du potassium et du calcium (Bashir Jama *et al.*, 1986).

Dans la seconde partie, nous discuterons des raisons de supposer que les systèmes de cultures intercalaires avec haies peuvent être mis au point pour contrôler efficacement l'érosion et, de ce fait, la perte d'éléments nutritifs dans les sols érodés.

Ce système présente de nombreux problèmes, dont le moindre n'est pas celui associé à la longue interface entre les cultures et les ligneux, la plus importante de toutes les différentes pratiques agroforestières autres que les pratiques spatiales denses (Young, sous presse, b). Si les haies sont larges de 1 m et les allées cultivées, de 4 m, l'interface est de 4 000 m/ha. Si le sol, les effets microclimatiques et autres effets d'interface sont, à tout prendre, favorables, c'est une bonne chose. S'ils ont un effet net contraire, l'association des cultures et des haies a peu de chances de réussir. Pour les seules interactions relatives au sol, les effets de surface ont toutes les chances d'être favorables aux cultures, en raison des apports nutritifs provenant de la litière. Les effets racinaires peuvent être bénéfiques, par l'apport de matière organique et d'éléments nutritifs dans les résidus racinaires, ou adverses, par la compétition des haies avec les cultures pour les éléments nutritifs. Ces effets sont encore mal connus.

Des effets favorables sur la production des cultures sont plus susceptibles d'apparaître dans des systèmes où les émondages des haies sont appliquées au sol. Si elles sont recueillies, les effets seront nécessairement moindres, bien que les racines puissent avoir une contribution positive.



Photo 17 - Cultures intercalaires avec haies: croissance du maïs après sept années de culture entre des haies de Gliricidia sepium, Maha Illuppallama, Sri Lanka.

A ce jour, la plupart des essais ont été faits sous des climats humides à subhumides frais. Cependant les résultats des essais commencés récemment dans la zone subhumide sèche, comme à l'ICRISAT (Hyderabad, en Inde) et à l'ICRAF (Machakos, au Kenya) sont positifs.

Lorsque les cultures associées à des haies sont établies sur une pente, on peut appeler le système barrière de haies. Dans de tels cas, il y a une intégration étroite de la lutte contre l'érosion et du maintien de la fertilité; la première est assurée en partie par la couverture de litière formée d'émondages, qui contribue aussi à la fertilité.

Les processus par lesquels cet effet est obtenu ne sont pas pleinement compris.

La recherche sur ces processus aidera à mettre au point des systèmes durables pour des conditions diverses de climat, de sol et de pente.

En dépit de la nature fragmentaire des données, l'hypothèse que des systèmes de cultures en couloirs peuvent être mis au point pour maintenir la fertilité du sol aussi bien que pour produire reste tout à fait plausible. Le cas échéant, ces systèmes pourraient constituer une très importante contribution à l'agriculture durable sous les tropiques, tant sur les terres en pente que sur les sols de fertilité basse ou déclinante.

Plantation de lisière En raison de l'interface cultures-ligneux relativement courte, les effets sur les sols seront vraisemblablement faibles et pourraient être positifs, nuls ou négatifs. Cet arrangement spatial convient pour la plantation d'arbres que l'on souhaite productifs, mais qui risquent d'être nocifs pour les conditions du sol.

Ligneaux sur structures anti-érosives. Les arrangements spatiaux et les fonctions des arbres et des arbustes destinés à la lutte contre l'érosion ont été discutés dans la deuxième partie du présent ouvrage. Il existe de nombreuses possibilités pour combiner le contrôle de l'érosion, qui est en soi un moyen de maintenir la fertilité, avec les autres effets bénéfiques des ligneux.

Pour les ligneux plantés sur des bandes enherbées, des diguettes ou des terrasses, la contribution au sol de la litière des ligneux sera vraisemblablement modeste, mais positive. *Grevillea robusta*, *Cassia siamea* et *Leucaena* sont couramment employés de cette manière.

Brise-vent et rideaux abris. Bien qu'au départ, elles soient destinées à contrôler l'érosion éolienne, ces pratiques offrent apparemment la possibilité de mettre à profit les effets des ligneux sur la fertilité du sol, l'étalement de la litière de feuilles sur les cultures étant assuré par le vent! La pratique moderne consiste à créer des brise-vent d'espèces d'arbres et de buissons de formes différentes, ce qui permet d'inclure délibérément quelques-unes des espèces amélioratrices du sol qu'on utilise dans les régions semi-arides, telles que *Faidherbia albida* d'autres espèces d'acacias, *Prosopis cineraria* et *Azadirachta indica*. Il semble possible, par une conception imaginative des brise-vent, d'obtenir le contrôle de l'érosion et l'amélioration du microclimat et de la fertilité du sol, combinaison de haute valeur potentielle pour la zone semi-aride.

Transfert de biomasse. Cette pratique, que l'on trouve par exemple au Népal, consiste à couper le feuillage des ligneux dans la forêt naturelle et à le transporter sur les terres cultivées. Elle améliore incontestablement les rendements, sans quoi les agriculteurs ne feraient pas l'énorme travail que cela implique. Si la pratique est associée à la coupe pour le bois de feu, elle risque fort de dégrader les forêts.

Pratiques sylvopastorales

Ligneaux sur pâturages ou terrains de parcours. Arbres et buissons contribuent aux systèmes sylvopastoraux par un apport direct de feuillage fourrager et par l'amélioration de la croissance de la pâture sous leur couvert. L'effet sur les pâturages peut venir de plusieurs causes, notamment de l'amélioration du microclimat et des effets des animaux (domestiques ou sauvages) et des oiseaux, mais l'amélioration du sol joue certainement un rôle.

Les ligneux qui améliorent la production des cultures, comme *Faidherbia albida* et *Prosopis cineraria*, ont un effet égal, voire plus important sur les pâturages. Les acacias en général semblent améliorer les pâturages au moins en partie par la

fixation d'azote. Ce phénomène a été prouvé par des transects solarbres sous la végétation naturelle. A cet égard, il est intéressant de constater que, dans certaines limites de pluviosité, la productivité des pâturages sahariens n'est pas limitée par l'eau, mais par le manque d'azote et de phosphore (Penning de Vries et Krul, 1980).

Le système *dehesa pratiqué* en Espagne et dans des pays méditerranéens voisins fait apparaître les interactions complexes entre les ligneux, les pâturages, le bétail et le sol. Des chênes (*Quercus rotundifolia* et autres espèces apparentées) poussent sur des terres de parcours qui sont pâturées par des bovins, des ovins, des caprins et des porcins. Il peut y avoir périodiquement une récolte de céréales. Sous le couvert des chênes, tant les conditions du sol que la croissance de l'herbe sont sensiblement améliorées. Ainsi à Séville, en Espagne, la matière organique du sol, l'azote, le phosphore et le potassium se sont révélés environ deux fois plus élevés sous les arbres que dans les pâturages environnants, la minéralisation de l'azote étant plus élevée, et le calcium et le magnésium 1,5 fois plus abondants (Joffre *et al.*, 1988).

De telles améliorations dans les sols et dans la croissance du pâturage ne peuvent être obtenus par la gestion que si l'on peut favoriser la couverture par des espèces ligneuses sélectionnées, soit en les plantant, soit en protégeant les jeunes pousses des semis naturels contre le broutage. Il est peu probable que l'agroforesterie soit fructueuse sur les terres de parcours à moins d'être appliquée conformément aux principes de base de la gestion des pâturages tels que le contrôle du nombre des animaux et la rotation des pâtures. Etant donné les circonstances socio-économiques qui permettent une telle gestion, les possibilités d'améliorer le sol par l'emploi de ligneux sont évidentes.

Autres pratiques sylvopastorales. Des combinaisons de plantations avec des pâturages, comme le pâturage sous cocotier, sont adoptées en premier lieu à des fins autres que l'amélioration du sol, bien qu'une couverture de légumineuses et de graminées puisse contribuer à la croissance des ligneux de la plantation par la fixation de l'azote et par le recyclage. Les pratiques des haies vives et des banques fourragères n'ont pas d'influence directe sur la fertilité du sol.

Cultures en couloirs et fertilité du sol

Les systèmes de culture intercalaires avec des haies semblent pouvoir maintenir la fertilité du sol, avec des intrants bas à modérés, alors que la composante ligneuse n'occupe que 15 à 25% du terrain.

Ceci contraste avec: les systèmes de jachère en rotation, dans lesquels le composant ligneux occupe normalement plus de 50% de la rotation.

Si cette comparaison se confirme, elle donne à penser que le mélange de cultures avec haies est plus efficace dans son utilisation du terrain et offre une alternative aux cultures itinérantes.

On ne connaît pas encore en détail les processus qui engendrent cet effet. Des recherches dans ce domaine devront faciliter la conception de systèmes durables adaptés à diverses conditions de climat, de sol et de pente.



Photo 18 - Haies de *Leucaena leucocephala* émondées alternant avec des rangs de maïs. Zomba, Malawi.



Photo 19 - Jardin ligneux multiétagé: cocotiers cafériers et bananiers sur une pente. Mindanao, Philippines.



Photo 20 - Jardin de case: la combinaison d'une production élevée avec un recyclage intensif assure une complète durabilité. Nord de Hanoï, Viêt-Nam.

Pratiques avec prédominance de la composante ligneuse

Parcelles boisées à usages multiples. Cette pratique se rapporte aux forêts plantées gérées dans un but de production multiple, par exemple pour le pâturage en forêt ou le fourrage ligneux, peut-être aux dépens de la maximisation de la production de bois. Il intervient souvent un élément de conservation dans de tels systèmes, et la plantation de ligneux utiles du point de vue de la fertilité devrait figurer parmi les aspects pris en compte dans leur conception.

Foresterie de restauration conduisant à une utilisation multiple. Comme les brise-vent à usages multiples, ceci est une pratique dont on a peu exploré les possibilités. La foresterie de restauration est un moyen réputé et fructueux de restaurer des zones de sols dégradés, grâce aux effets de la couverture de la litière forestière sur le contrôle de l'érosion et sur la formation de matière organique du sol et l'équilibre des éléments nutritifs.

Il est possible de combiner une telle réhabilitation avec une agroforesterie productive, par une approche en deux temps. Au premier stade, celui de la restauration, on établit une couverture forestière complète, et on la protège. Au deuxième stade, on associe production contrôlée et protection, et la gestion est modifiée de manière à maintenir un niveau suffisant de conservation, tout en permettant une production contrôlée. Cette dernière peut comprendre toute combinaison de bois de feu, de pâturage, de récolte et enlèvement du fourrage herbacé ou ligneux, ou même de quelques cultures. Les mesures de gestion à utiliser peuvent consister soit à éclaircir toute la couverture ligneuse soit à l'éclaircir sélectivement le long de bandes isohypses. On peut mettre au point de tels systèmes pour la restauration de sols érodés ou salins, ou de dunes sableuses. Quelques-uns des ligneux plantés au stade de la restauration peuvent être choisis en vue de leur rôle dans le stade de production, par exemple des espèces fixatrices d'azote qui améliorent la poussée du pâturage. Des exemples ont été donnés plus haut (p. 60).

Pratiques avec composantes spéciales

Dans l'*aquiforesterie* les effets sur les sols sont extrêmement spécifiques. Il est courant que l'on plante des ligneux, par exemple *Sesbania* sp.pl., en bordure des viviers, connaissant leurs bienfaits sur la teneur de l'eau en éléments nutritifs et par conséquent sur l'alimentation des poissons. L'association de palétuviers à

la pisciculture pourrait avoir quelques effets comparables. La pratique de l'*entomoforesterie* (ligneux et insectes, par exemple abeilles, à soie, papillons) n'a pas d'effet direct sur le sol.

Résumé

Le tableau 32 tente de regrouper des pratiques agroforestières en fonction de leurs effets sur la fertilité du sol. Des preuves scientifiques attestent clairement des effets bénéfiques sur les sols de quelques *systèmes de ligneux su/terres cultivées* et de *combinaisons de plantations*. Malgré le manque de preuves, il ne fait aucun doute que les *jardins de case* conservent la fertilité du sol. Le travail accompli par les agriculteurs témoigne de l'efficacité des *transferts de biomasse comme méthode de fertilisation*.

Les quelques résultats disponibles indiquent que, pour une gamme d'environnements, il est possible de concevoir des systèmes de *cultures intercalaires en haies (ou cultures en couloirs)* qui conservent la fertilité du sol. Etant donné qu'il s'agit d'une pratique nouvelle, des études sur le cycle nutritif et un suivi des sols devront apporter des preuves supplémentaires pour confirmer cette affirmation.

En ce qui concerne la pratique des ligneux sur structures anti-érosives, de fortes améliorations de la fertilité du sol sont obtenues par la diminution des pertes de matière organique et d'éléments nutritifs qu'on attribue au contrôle de l'érosion; les ligneux ont un effet supplémentaire par l'apport de litière. La même combinaison d'un effet important sur la fertilité par le contrôle de l'érosion éolienne, et d'une amélioration supplémentaire éventuelle par la litière des ligneux vaut pour les *brisevent* et les *rideaux abris*.

Pour les *ligneux sur pâturages ou terres de parcours*, il est clairement démontré que certains favorisent la croissance du pâturage qu'ils recouvrent, ce qui conduit ou s'associe à l'amélioration de la fertilité du sol. Pour que cela se produise, une bonne gestion du pâturage s'impose.

L'adaptation à l'agroforesterie de *boisements* et de *la foresterie de réhabilitation par une gestion en vue d'utilisations multiples* conserve tous les avantages bien connus de la couverture forestière, sous réserve que les espèces ligneuses soient appropriées et que la gestion soit bonne.

Les jachères ligneuses améliorées pourraient avoir des avantages comparables, voire supérieurs aux jachères naturelles en culture itinérante, mais ceci n'a pas été démontré expérimentalement.

Conception, gestion et intégration

L'agriculteur: Et en moissonnant, nous chantions.

L'interviewer (intéressé): "Que chantiez-vous? L'agriculteur: "Peu importe ce qu'on chante. Ce qui compte, c'est de chante".

(Interview d'un vieil agriculteur anglais par un jeune sociologue enthousiaste sur les conditions de vie autour de 1900).

Comme dans toutes les branches de l'agriculture et de la foresterie, une conception saine et une bonne gestion d'un système agroforestier comptent autant, si pas davantage que la nature de la pratique elle-même. La présence de ligneux ne contrôle pas nécessairement l'érosion ni ne maintient la fertilité; ce qui compte, c'est la façon dont les ligneux sont disposés et gérés.

Ceci est d'autant plus valable pour les nouvelles pratiques. Il est certainement possible d'imaginer un système de cultures mixtes avec haies qui réduit le rendement des cultures, dont les haies ne fournissent aucun produit de compensation et qui ne contrôle pas l'érosion ni ne maintient la fertilité du sol.

Pour toute intervention de l'agroforesterie envisagée dans un système d'utilisation des sols déjà en place, une conception saine est primordiale. Les techniques détaillées établies pour le stade de conception de la méthode agroforestière de D & D (diagnosis and design) ont été prévues à cet effet (Huxley et Wood, 1984; Raintree, 1989). La sélection des végétaux et la conception du système en tenant compte des conditions locales de climat, de sol et de pente sont des aspects importants. Précisément du point de vue de la fertilité du sol, il faut déterminer quelles parties des ligneux et des cultures seront enlevées et lesquelles seront retournées au sol, pour équilibrer production et amélioration du sol. Le second point important est une bonne gestion du système, à la fois du point de vue fondamental de l'entretien que vis-à-vis de sa souplesse d'adaptation si des résultats négatifs traduisent la nécessité de changer.

Tableau 32 - Pratiques agroforestières en relation avec la fertilité du sol.

Pratiques ayant des effets positifs importants sur la fertilité
Jachère ligneuse améliorée
Ligneux sur terres cultivées
Combinaisons de cultures
Jardins de case
Culture en couloirs
Ligneux sur structures anti-érosives
Brise-vent et rideaux abris
Transfert de biomasse
Ligneux sur pâturages et terres de parcours
Parcelles boisées à usages multiples
Foresterie de réhabilitation conduisant à des utilisations multiples
Pratiques ayant des effets positifs moindres ou neutres sur la fertilité
Plantation de lisières
Cultures de plantation avec des pâturages
Pratiques avec des effets positifs ou négatifs sur la fertilité
Culture itinérante
Pratiques avec des effets neutres ou négatifs sur la fertilité
Taungya

L'agroforesterie ne doit pas être traitée isolément, mais comme un élément de la planification globale de l'utilisation des terres (Young, 1987c). Au niveau de l'exploitation, on trouve des exemples d'intégration imaginative dans les approches appelées "agriculture conservatoire" au Sri Lanka et "utilisation intégrée des terres" au Malawi. L'agriculture conservatoire du Sri Lanka comprend des éléments de paillage, de labour minimum, des mesures de lutte antiparasitaire et d'agroforesterie. Au Malawi, les ligneux ont été introduits progressivement dans les systèmes agricoles d'exploitation, en mettant d'abord l'accent sur la plantation des bourrelets de démarcation et autres structures de conservation des sols (Weerakoon, 1983; Wijewardene et Waidyanatha, 1984; Douglas, 1988).

On a signalé plus haut (p. 60) les possibilités d'inclure l'agroforesterie ainsi que d'autres sortes d'utilisation des terres dans la gestion intégrée des bassins versants. Que ce soit pour la conservation du sol ou pour d'autres usages, l'agroforesterie peut au mieux développer ses potentialités lorsqu'elle est prise au même titre que d'autres formes majeures d'utilisation des sols comme un élément de la planification de l'utilisation des terres.

Quatrième partie: agroforesterie pour la conservation des sols

Chapitre 15: Modélisation des changements du sol sous agroforesterie

Objectifs

Il serait certes avantageux de pouvoir prédire l'évolution des propriétés du sol dans des systèmes agroforestiers spécifiques sur un site donné, et de comparer ces changements avec ceux qui interviendront dans d'autres systèmes d'utilisation des terres, existants ou futurs. Ce faisant, nous devrions disposer d'une technique précieuse d'évaluation des systèmes proposés en termes d'impact sur l'environnement, à utiliser de pair avec une évaluation en termes économiques et sociaux.

Il est utile, pour une autre raison, d'estimer l'impact pédologique dans la conception de la recherche agroforestière. Un essai agroforestier aux champs demande cinq ans ou plus pour donner des résultats utilisables. Tout ce qui peut aider à sa conception est dès lors bienvenu. Qui plus est, aucun essai en champ ne peut comprendre toutes les combinaisons possibles de variables; dès que l'on dispose de certaines données réelles, il serait utile de pouvoir les étendre aux évaluations de l'impact sur les sols de conceptions qui n'ont pas été testées, par exemple: "à supposer que nous ayons enlevé les résidus de culture au lieu de les laisser en place, le système serait-il durable?"

Pour prédire, il faut des données, et rien n'est plus exigeant en données quantitatives qu'un modèle informatisé. Il attire l'attention sur tous les éléments critiques nécessaires à la prédiction des changements du sol et indique combien il est important que des données particulières soient obtenues avec précision en termes techniques, c'est la sensibilité du modèle à des variables particulières. La modélisation peut ainsi aider les chercheurs de terrain en leur indiquant les données qui sont nécessaires pour prédire les changements dans la fertilité du sol.

Il faut souligner que les connaissances actuelles des processus plante-sol ne sont pas suffisantes pour pouvoir faire de telles prédictions en toute confiance. Outre davantage d'études expérimentales, il faudrait mieux comprendre quelques-uns des processus pédologiques de base qui sont impliqués. En comparant les résultats du modèle pour diverses données et suppositions, par exemple pour des valeurs différentes du facteur de proportionnalité des ligneux dans l'érosion, ou de la constante de décomposition de l'humus, nous pouvons constater que des progrès dans les connaissances de base sont nécessaires si l'on veut faire des prévisions avec une plus grande fiabilité.

C'est avec ces besoins présents à l'esprit qu'un modèle informatisé a été construit: le SCUAF ou modèle sur les changements du sol sous agroforesterie (Young et Muraya, 1988, 1990). Son but premier est de prévoir les effets sur les sols de systèmes agroforestiers spécifiques dans des conditions environnementales données. Plus précisément, les objectifs de ce modèle sont:

- de faire des prévisions approximatives des effets sur le sol de systèmes agroforestiers spécifiques dans des environnements donnés;
- de montrer quelles sont les données à tirer de travaux agroforestiers expérimentaux pour pouvoir faire de telles prévisions;
- de se servir de ces prévisions comme d'un outil pour la mise au point de systèmes agroforestiers, soit pour sélectionner les systèmes les plus prometteurs pour des essais initiaux, soit pour améliorer des systèmes sur les performances desquels on dispose déjà de quelques données;
- d'indiquer les progrès à faire dans la connaissance des processus plante-sol et des processus pédologiques pour améliorer l'exactitude de telles prévisions.

Objectifs du modèle SCUAF

- Prédire les effets sur les sols de systèmes agroforestiers spécifiques dans des environnements donnés
- Montrer quelles données sont nécessaires pour faire de telles prévisions
- Utiliser les prévisions pour la mise au point de systèmes destinés à la recherche agroforestière
- Indiquer les progrès de la recherche qui sont nécessaires pour améliorer l'exactitude des prévisions.

On ne donnera ici que les grandes lignes du modèle SCUAF, en illustrant quelques résultats. Un compte rendu détaillé des fondements et du fonctionnement du modèle, qui couvre l'érosion, la matière organique du sol et le cycle de l'azote, accompagné d'instructions pour les utilisateurs, est donné dans Young et Muraya (1990). Le modèle est disponible sur disquette.

Fondements du modèle

Des modèles existent pour la prévision de l'érosion du sol et pour le cycle des éléments nutritifs, spécialement l'azote, sous systèmes agricoles. Bon nombre de ces modèles sont très compliqués. Ce dont on a besoin en ce moment, c'est d'un modèle qui, d'abord, soit relativement simple, de façon qu'il puisse être utilisé par d'autres personnes que son inventeur, et qu'ensuite il soit centré sur les situations spécifiques de l'agroforesterie.

On a satisfait à la première exigence en construisant un modèle à intrants-extrants, plutôt qu'un modèle sophistiqué des processus. Pour la seconde, l'essentiel est d'avoir deux composantes végétales, les ligneux et les cultures, qui peuvent être présents soit en rotation, soit dans un système spatial.

Il est évidemment souhaitable d'inclure la prévision de l'érosion du sol, pas seulement de la masse de sol perdu mais aussi de sa teneur en matière organique et en éléments nutritifs. Il est ensuite important de prédire les modifications de la matière organique du sol, en raison de son rôle multiple dans la fertilité du sol, notamment dans les conditions physiques, mais aussi parce que la matière organique est en soi une source d'éléments nutritifs pour les plantes. En troisième lieu, le modèle doit couvrir le cycle des principaux éléments nutritifs, particulièrement de l'azote, en raison du rôle des ligneux fixateurs d'azote, et du phosphore, comme autre élément nutritif qui, très souvent, limite la durabilité.

Un facteur important est omis dans le présent modèle: celui de l'eau du sol. Dans les environnements semi-arides et dans les savanes sèches, c'est fréquemment le facteur limitant de la croissance des plantes, aussi espère-t-on l'inclure dans les développements futurs du modèle SCUAF.

On a choisi une base temporelle d'une année, toujours pour des raisons de simplicité; ceci contraste avec la modélisation sur de courtes périodes, comme dix jours, de certains modèles de simulation des processus. Sur les sites avec deux saisons de croissance par an, soit on additionne la croissance végétale des deux saisons, soit on considère chaque saison comme une année du modèle. Les conditions initiales du sol et la croissance végétale sont les intrants qui permettent de prévoir les changements du sol pour la première année; on estime alors l'effet de ces changements sur la croissance végétale dans la seconde année, ce qui sert alors de base à la prévision de nouveaux changements du sol. Ce cycle itératif peut être poursuivi aussi longtemps qu'on le désire, mais avec un degré de précision progressivement décroissant. Pour prédire la durabilité, une période de 20 ans constitue une bonne base; l'application la plus fiable est de prendre les résultats expérimentaux d'environ trois à cinq années et d'extrapoler pour une période plus longue.

Une série de valeurs par défaut est incluse. En utilisant les résultats publiés comme un moyen de validation du modèle, on a trouvé presque invariablement que certaines données manquaient, le plus souvent celles relatives aux racines. Il a fallu alors faire appel aux meilleures estimations possibles. Si l'on utilise le modèle à des fins de démonstration et de formation, de nombreux jeux de données ne sont pas aisément accessibles. Le modèle contient des valeurs par défaut pour toutes les données, ces valeurs étant fixées en fonction de la zone climatique, de la classe de texture du sol et du type de pente. Si, par exemple, les données rentrées sont un climat humide de basses terres et un sol de texture moyenne, le modèle donne des valeurs, telle que la teneur originale en carbone et les taux de croissance végétale, qui sont caractéristiques de cet environnement. Les estimations des facteurs dans l'équation universelle de perte de sol sont fixées en fonction de la pente, du climat et du sol. Toutes les valeurs par défaut sont affichées sur l'écran de l'ordinateur pour que l'utilisateur puisse au besoin les modifier il devrait autant que possible remplacer ces données par des valeurs observées.

Les processus du sol représentent un cas particulier. La plus grande partie de la recherche agroforestière est menée par des scientifiques qui ne sont ni pédologues ni à même d'évaluer des valeurs telles que les taux de conversion de la décomposition de la litière à l'humus ou les constantes de décomposition de l'humus. Les meilleures estimations de toutes ces constantes de processus ont donc été réunies à partir d'études spécialisées déjà publiées.

Le modèle a été étalonné en se basant sur des études d'écosystèmes naturels sous différents climats, en supposant le sol dans un état stable, ainsi que sur des comptes rendus agricoles et forestiers, et sur un petit nombre d'études de sols de systèmes agroforestiers.

Structure du modèle

On peut considérer que le modèle SCUAF est divisé en deux compartiments, l'un pour les végétaux et l'autre pour les sols. Le premier s'intéresse à ce qui arrive au matériel végétal - ligneux et cultures - avant qu'il n'atteigne le sol. Le modèle est essentiellement le même pour le cycle du carbone et pour celui des éléments nutritifs. Le compartiment des sols modélise ce qui se passe dans le sol, en considérant comme l'un de ses intrants les entrants du compartiment des végétaux. La modélisation de l'érosion constitue un sous-compartiment du compartiment des sols.

Le compartiment des végétaux

Le compartiment des végétaux est inclus dans le modèle du cycle du carbone représenté aux figures 16 (sous une forme simplifiée) et 17. Tout système agroforestier inclut deux éléments végétaux, appelés LIGNEUX et CULTURES (ces dernières pouvant être un pâturage). Les LIGNEUX sont divisés en quatre parties, les FEUILLES (matériel herbacé), les FRUITS (matériel reproducteur), le BOIS et les RACINES. La CULTURE ne comporte généralement que des FEUILLES, des FRUITS et des RACINES, mais il y a la possibilité d'y inclure un élément BOIS afin de couvrir des cas tels que le cafier (CULTURE) sous arbres d'ombragé (LIGNEUX). La source de carbone utilisé pour la croissance végétale est l'atmosphère, par le processus de la photosynthèse. L'utilisateur est prié d'introduire les taux initiaux de production primaire nette de chacune des composantes végétales, répartie entre ses différents éléments.

Pour le cycle du carbone, les valeurs de la matière sèche données comme production primaire nette sont converties en carbone, selon un taux par défaut de 50%. Pour le cycle des éléments nutritifs, des estimations de la teneur en éléments nutritifs de chaque partie de la plante sont nécessaires, à l'état vert dans le cas des émondons et au moment de la chute des feuilles dans le cas de la litière naturelle.

L'utilisateur spécifie ensuite s'il s'agit d'un *système agroforestier* spatial ou de rotation. S'il est spatial, il introduit les pourcentages de terres occupées par les composantes ligneuses et agricoles (dont le total peut dépasser 100%). Si c'est un système de rotation, l'utilisateur doit préciser le nombre d'années de mise en culture et le nombre d'années de plantation de ligneux. Dans certains systèmes agroforestiers, on laisse croître l'élément ligneux pendant plusieurs années, après quoi il est taillé d'une manière ou d'une autre, par exemple recépé, éêté ou abattu; c'est ce que l'on appelle l'année de coupe. Lorsqu'il y a émondage annuel, celui-ci fait office d'année de coupe.

Certaines parties végétales seront enlevées du système par la récolte ou, dans certains systèmes, par le broutage ou le brûlage. Les FRUITS de la CULTURE, la principale production vivrière, seront toujours enlevés, tandis que les résidus végétaux qui sont les FEUILLES de la culture, peuvent ou non être récoltés. Il peut y avoir une récolte supplémentaire pendant l'année de coupe, en particulier du BOIS de LIGNEUX, comme bois d'œuvre ou bois de feu. Dans certains systèmes, il y a des SUPPLÉMENTS ORGANIQUES venant de l'extérieur du système, comme le compost ou le fumier. Une partie de la production peut avoir été donnée au bétail, et le fumier de ferme restitué; cela peut être inclus dans le modèle - mais le transfert doit être fait manuellement!

En dehors de ces neuf composantes végétales (deux végétaux, chacun comportant quatre parties, plus les suppléments organiques), ce qui n'est pas récolté ni autrement perdu devient la LITIERE, qui inclut les émondons et les résidus des racines. La LITIERE sortant du compartiment des végétaux, avec son contenu de carbone et d'éléments nutritifs, devient un intrant pour le compartiment sol.

Erosion

L'érosion du sol est calculée selon l'équation:

$$\text{Erosion (kg/ha/an)} = R \times K \times S \times C \times 1000$$

où:

R = indice climat

K = indice érodibilité du sol

S = indice pente (LS dans l'équation de Wischmeier)
C = indice de couverture.

Dans chaque cas, les facteurs peuvent être obtenus soit par les méthodes simplifiées données dans le système FAO (destinées à évaluer l'érosion moyenne sur de vastes régions) ou, lorsque les données le permettent, par les méthodes plus sophistiquées données dans l'équation de Wischmeier (pour évaluer l'érosion sur les champs des particuliers).

Lorsque ces facteurs ont été introduits, le modèle calcule les valeurs de l'érosion séparément pour la composante ligneuse et pour la composante culturelle, et il les affiche. Pour les systèmes agroforestiers de rotation, ces valeurs sont utilisées dans les années comportant l'élément ligneux ou l'élément culture respectivement. Pour les systèmes spatiaux, l'utilisateur introduit le facteur pourcentage de l'élément ligneux. Le modèle affiche alors le taux calculé d'érosion pour le système global. Les valeurs calculées pour l'élément ligneux et pour l'élément cultural séparément et pour un système combiné spatiallement peuvent être corrigées en introduisant les taux mesurés d'érosion.

Après obtention de l'érosion en kilogrammes de sol par hectare et par an, les pertes de carbone et d'éléments nutritifs sont calculées, ainsi que la réduction de la profondeur du profil. Les proportions de carbone et d'éléments nutritifs dans la couche arable d'origine sont multipliées par des facteurs d'enrichissement des sédiments érodés (p. 41). Par exemple, une érosion de 5 000 kg/ha/an d'une couche arable contenant 0,1% d'azote, avec un facteur d'enrichissement en azote de 4 entraînerait une perte de $5\,000 \times 0,001 \times 4 = 20$ kg N/ha/an. Le changement de profondeur du profil est calculé à partir de la densité apparente.

On obtient ainsi l'érosion du sol et la perte de carbone et d'éléments nutritifs pour l'année initiale. Pour les années suivantes, le climat et la pente resteront identiques, mais les facteurs de sol et de couverture seront modifiés, avec une augmentation ou une diminution de la matière organique et de la croissance des végétaux. Celles-ci sont calculées d'année en année, de manière itérative.

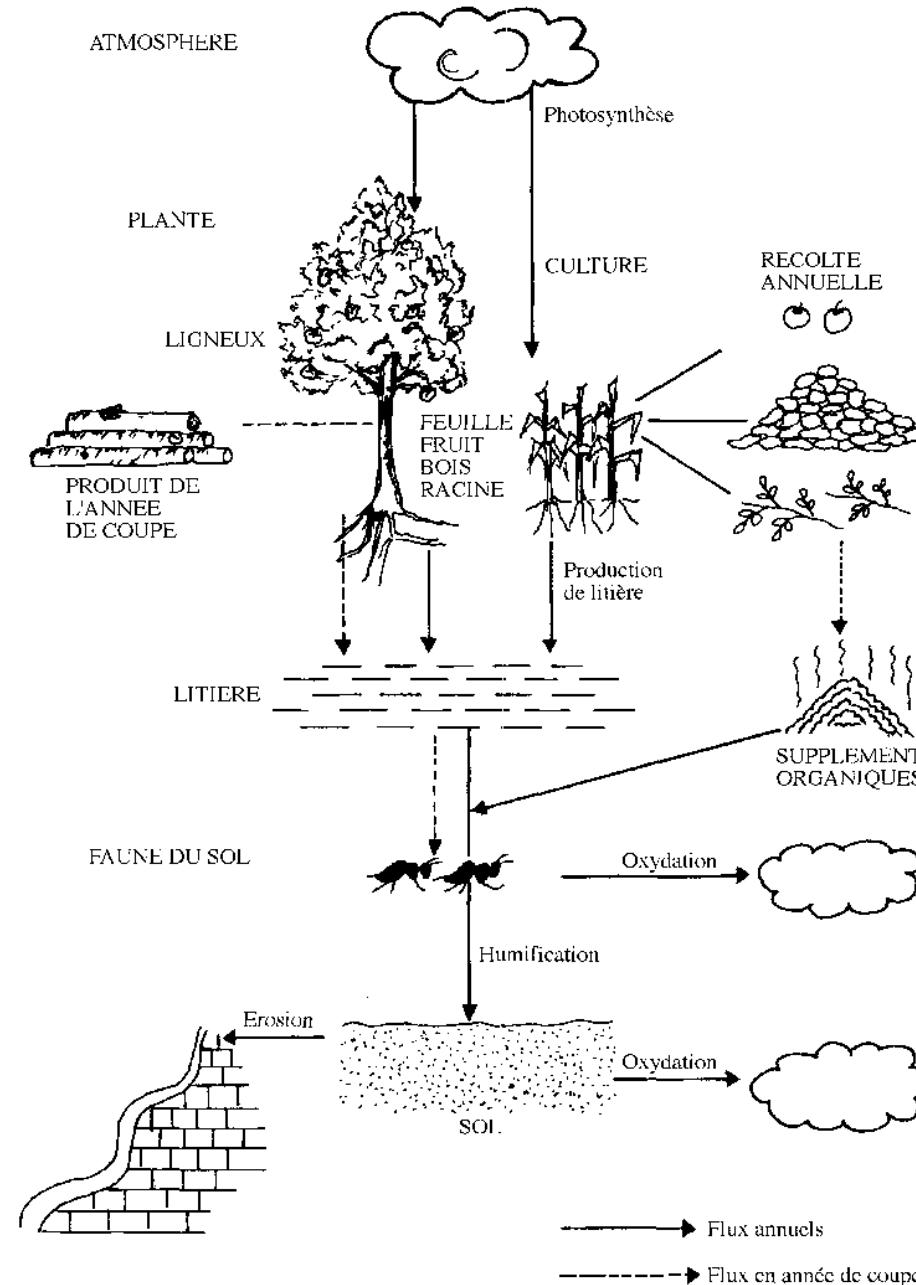


Figure 16 - Schéma simplifié du cycle du carbone selon le modèle SCUAF.

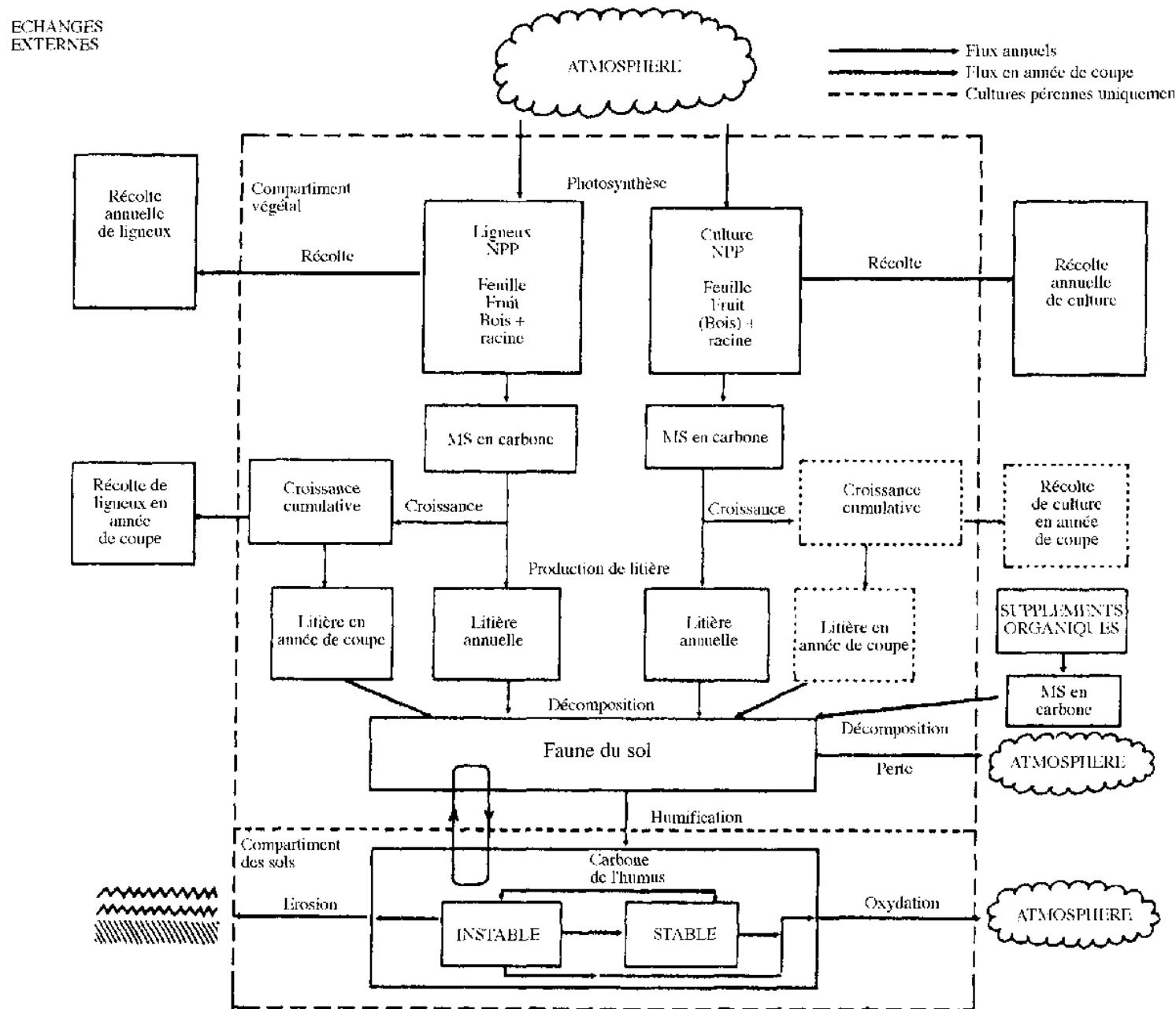


Figure 17 - Structure du modèle SCUAF pour le carbone.

Calcul de l'humus du sol

Le bilan annuel du carbone de l'humus du sol, C, est donné par la formule:

$$\begin{aligned} C_{t+1} = \\ C_t + \text{apports} - \text{oxydation} - \text{érosion} \end{aligned}$$

où t et t+1 sont des années successives, les apports viennent de l'humification de la litière, l'oxydation est la perte de CO₂ par la faune du sol et l'érosion est la perte de carbone dans le sol érodé.

Les apports sont calculés à partir du matériel des diverses parties végétales qui deviennent litière, multiplié par les pertes de conversion de la litière en humus pour les résidus épigés et pour les résidus de racines. Ceci comprend tout le carbone végétal qui est oxydé en moins d'une année et constitue donc une perte importante. Le manque d'information sur son ampleur dans différentes circonstances constitue la plus grande incertitude dans le sous-modèle du carbone.

La perte par oxydation est basée sur la constante de décomposition (p. 83). L'utilisateur peut spécifier une seule ou deux fractions de l'humus; celles-ci sont appelées labile (ou instable) et stable, l'humus stable ayant une vitesse de décomposition beaucoup plus lente. Les équations utilisées pour les pertes par oxydation d'une seule et de deux fractions d'humus sont données p. 83 et 84. L'utilisateur peut choisir la profondeur du profil du sol à inclure dans le cycle du carbone. Pour qui n'est pas un spécialiste du sol, il est recommandé d'utiliser l'hypothèse de travail pour les recherches générales en agroforesterie proposée plus haut; à savoir de choisir la couche arable seulement (15 ou 20 cm) et de supposer que la plus grande partie de l'humus qu'elle contient appartient à la fraction labile, autrement dit de supposer une seule fraction d'humus.

La faune du sol est incluse dans les processus comme un agent responsable de la perte par conversion de la litière et de l'oxydation de l'humus. Comme le carbone contenu dans sa biomasse est relativement peu abondant, il n'est pas déterminé séparément.

Le sous-modèle du cycle du carbone est basé principalement sur l'analyse descriptive faite par Nye et Greenland (1960), adaptée au calcul pour deux fractions d'humus. Ainsi modifié, il est assez semblable (bien que construit indépendamment) à la section sur le carbone du modèle CENTURY de Parton *et al.* (1987), où le carbone végétal, le carbone actif, le carbone lent et le carbone passif du sol correspondent respectivement à la litière, à la faune du sol, à l'humus instable et à l'humus stable du modèle SCUAF.

Cycles des éléments nutritifs

Dans le modèle SCUAF, les cycles des éléments nutritifs consistent en la modélisation avec intrants/entrants illustrée par la figure 12, avec les gains et les pertes de sol tels qu'ils figurent sur la liste de la p. 100. A chaque élément nutritif correspond un intrant du sol, constitué par les éléments nutritifs atteignant les réserves de la litière.

Pour les cycles de l'azote, l'utilisateur établit, quand il spécifie le système agroforestier en cause, quelles sont les proportions des éléments ligneux et culturaux qui sont fixateurs d'azote et quelle quantité d'azote serait fixée symbiotiquement par un peuplement par des éléments fixateurs d'azote (voir tableau 22). La fixation d'azote du système dans son ensemble est ensuite calculée proportionnellement au temps ou à l'espace occupé. La perte d'azote par érosion est calculée comme mentionné plus haut. Les engrains utilisés sont précisés et les gains provenant du dépôt atmosphérique et de la fixation non symbiotique sont estimés.

L'ensemble de l'azote minéral disponible est calculé et réparti entre les pertes gazeuses, la fixation sur les minéraux argileux, le lessivage, l'érosion et l'assimilation par les plantes. L'azote total disponible pour les végétaux est la somme des quantités prélevées dans la réserve minérale du sol, plus celles obtenues directement par fixation symbiotique. Quelques grandes incertitudes vont apparaître (comme dans tous les autres modèles du cycle de l'azote), notamment quant à la perte par lessivage, sur laquelle seules des données lysimétriques sont disponibles. On a inclus des valeurs estimées par défaut pour le climat et la texture du sol, obtenues en parcourant des publications.

Le cycle du phosphore est comparable, sauf que l'apport par altération des minéraux rocheux se substitue à la fixation atmosphérique. Les pertes par fixation sur minéraux argileux sont relativement plus importantes, avec des valeurs par défaut dépendant de l'acidité du sol. La difficulté de mesurer ou d'estimer les apports d'éléments nutritifs par l'altération des roches ajoute un nouvel élément d'incertitude.

D'aucuns prétendent que si un processus ne peut pas être mesuré ou estimé avec une précision suffisante, il ne doit pas être utilisé dans les calculs. S'il en est ainsi, le cycle des éléments nutritifs ne peut pas encore être modélisé. Dans le modèle SCUAF, on a considéré qu'il valait mieux prendre comme valeurs par défaut les meilleures estimations possibles, si certaines soient-elles, plutôt que de négliger complètement certains processus.

Rétroaction des changements du sol sur la croissance des plantes

Les taux de croissance des ligneux et des cultures introduits dans le modèle sont ceux existant dans les conditions initiales du sol. A mesure que les propriétés du sol changent, la croissance des plantes en est affectée. Cette influence est modélisée au moyen de facteurs de rétroaction, qui opèrent tout au long du cycle annuel de modélisation. Il existe des facteurs de rétroaction pour le carbone du sol, pour les éléments nutritifs et pour la profondeur du profil.

Chaque facteur de rétroaction est basé sur le fait qu'un changement dans une propriété du sol, par rapport à ses conditions initiales, produit un certain changement proportionnel dans la croissance végétale. Par exemple, si le facteur de rétroaction du carbone pour les ligneux est fixé à 0,5, une chute relative de 1% du carbone du sol (par exemple de 10 000 à 9900 kg C/ha) entraîne une réduction de 0,5% du taux de croissance des ligneux. Si tous les facteurs de rétroaction sont fixés à 0, les taux de croissance des plantes restent constants. Ainsi:

$$NPP_t = NPP_0 \times (1 + [(C_t - C_0)/C_0] \times CFF)$$

où NPP_0 et NPP_t sont la production nette initiale et à l'année t respectivement, C_0 et C_t sont le carbone du sol initial et le carbone à l'année t et CFF est le facteur de rétroaction carbone.

Les facteurs de rétroaction sont donnés séparément pour les ligneux et les cultures, et pour le carbone, l'azote, le phosphore et la profondeur du sol. Pour les éléments nutritifs, la rétroaction est basée non pas sur les réserves organiques mais sur celles disponibles sous forme minérale. Les valeurs par défaut sont fixées à 1,0 pour les cultures et à 0,5 pour les ligneux, mais c'est à l'utilisateur de les ajuster. Les données provenant d'essais d'engrais peuvent être utilisées (en tenant compte de la proportion d'éléments nutritifs provenant d'engrais qui parvient à la plante). C'est là un autre cas où une estimation très incertaine est préférée à l'absence d'estimation - ce qui reviendrait à supposer que la croissance végétale n'est pas affectée par le sol!

Dans la pratique, la rétroaction pour la perte de profondeur du profil se montre presque toujours négligeable par comparaison avec la rétroaction pour la perte de matière organique et d'éléments nutritifs, ce qui montre que les premiers essais de calcul des effets de l'érosion sur la productivité en termes de profondeur du profil ne sont pas valables.

Le menu du SCUAF

La figure 18 montre le menu du SCUAF tel qu'il apparaît à l'utilisateur. Il y a trois sous-menus: les entrées, les sorties et les services (ou commandes). La première entrée est la sélection des cycles à inclure: carbone, azote ou phosphore, isolément ou en combinaison; dans chaque cas, l'érosion est incluse. La documentation concerne le titre, le nom du fichier et d'autres données d'identification. On détermine les détails concernant les systèmes agroforestiers, spatiaux ou de rotation, de même que les apports (organiques ou fertilisants) et les sorties (récoltes ou autres pertes). Les conditions initiales recouvrent le sol, l'érosion (facteurs ou taux) et la croissance végétale (ligneux et cultures, divisés en plusieurs parties). On introduit ensuite les paramètres des processus du sol et les facteurs de rétroaction plante-sol.

A part l'affichage à l'écran ou l'impression de la documentation et des données, les sorties consistent en changements survenus sur un nombre d'années spécifié dans l'érosion (et ses causes), le carbone de l'humus du sol (une ou deux fractions), l'azote, le phosphore, la production de biomasse végétale affectée par le sol, la biomasse totale du système plante-sol, le carbone et enfin, la récolte. Les changements estimés pour la production de biomasse végétale (croissance) se réfèrent seulement aux effets des changements survenus dans le sol, et non pas aux nombreuses autres influences qui affectent la croissance végétale. La récolte est une sélection des valeurs de la croissance végétale des éléments que l'on considère comme une récolte, par exemple les fruits d'une culture, le feuillage d'une culture (fourrage) et le bois des ligneux (bois de feu).

Les sorties sont initialement présentées sous la forme de tableaux. Une liaison à un ensemble de logiciels commerciaux permet de le traduire automatiquement sous forme graphique. Le menu des services permet de stocker un ensemble de données et de les retrouver par la suite.

Toutes les entrées et les sorties fonctionnent indépendamment. Par conséquent, l'utilisateur peut introduire une série de conditions et obtenir des résultats, puis retourner au menu des entrées, changer une ou plusieurs valeurs et obtenir de nouveaux résultats sans changer aucune des autres valeurs. Ceci permet une comparaison rapide des conditions, par exemple: "Quel serait l'effet obtenu si nous pouvions trouver un ligneux dont la croissance serait de 10% plus rapide, ou si nous réduisions la proportion de terres plantées de ligneux?"

Une comparaison avec des systèmes agricoles d'utilisation des terres peut être obtenue en utilisant des entrées identiques, mais en spécifiant que le "système agroforestier" est constitué de 0% de ligneux et de 100% de cultures. En inversant ces proportions, on peut utiliser le modèle pour la foresterie de restauration.

Exemples

Pour illustrer les résultats obtenus avec le modèle SCUAF, voici cinq exemples pris dans les systèmes agroforestiers de rotation, à arrangement zonal ou à arrangement spatial mixte. D'autres exemples sont fournis par Young *et al.* (1987) et Cheatle *et al.* (1989).

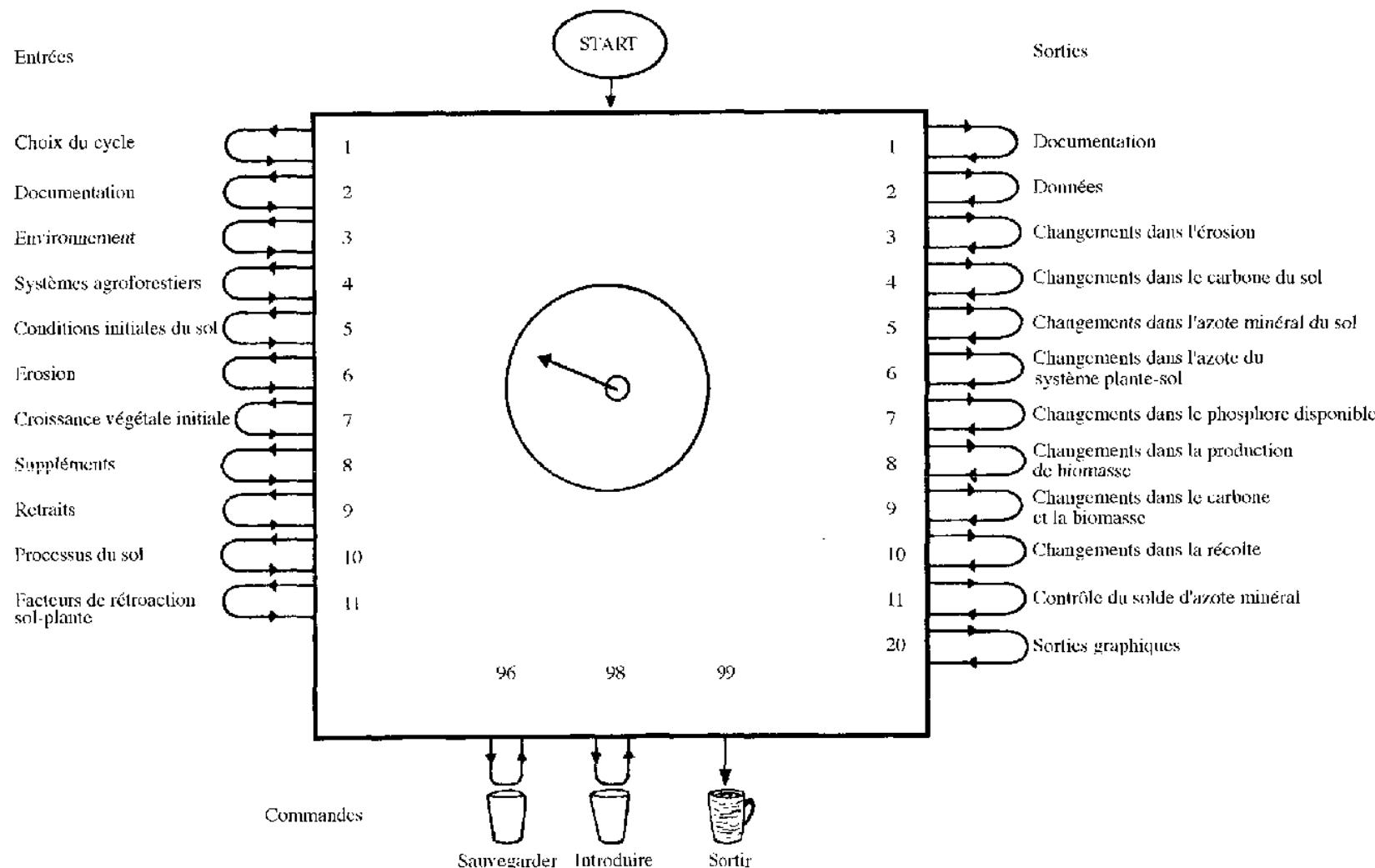


Figure 18 - Le menu du SCUAF tel qu'il apparaît à l'utilisateur.

La culture itinérante est le seul système agroforestier par rotation pour lequel des données soient disponibles (figure 19). Dans une étude faite aux Philippines, il y a quelques années, on observait une mise en culture de trois ans en moyenne, suivie d'une période de jachère de 15 ans (facteur R de 16,6%), système qui était considéré comme durable (Kellman, 1969). Le site se caractérisait par un climat humide de basse terre et par une majorité de terres en pente forte. Les taux d'érosion avaient été mesurés. La modélisation des changements dans le carbone du sol est donnée par la ligne supérieure de la figure 19. Le déclin pendant la période de mise en culture a été compensé par une augmentation pendant la période de jachère forestière avec un "saut" causé par des apports de résidus racinaires après la coupe. La figure montre aussi les effets simulés du raccourcissement de la jachère à 11 ans et à 7 ans, ce qui conduit à une dégradation du sol.

La figure 20 montre les changements en matière d'érosion pour un système d'agriculture itinérante dans lequel la jachère a été réduite à trois ans; il s'agit de simulations. Les changements entre les périodes de culture et de jachère ne sont pas aussi brusques dans la réalité. L'érosion augmente chaque année de mise en culture; elle est également plus forte à chacun des retours successifs au même point dans le cycle culture/jachère, par suite de la dégradation progressive du sol.

La figure 21 est basée sur une étude de culture de maïs associée à des haies de *Leucaena* à Ibadan au Nigeria, dans laquelle les changements du sol ont été mesurés après six ans. Le sol est sableux et le climat bimodal de basse terre subhumide. Les deux lignes supérieures concernent les parcelles où les émondades de *Leucaena* ont été gardées, les lignes inférieures concernent les parcelles où les émondades ont été enlevées, dans les deux cas sans traitement fertilisant. Les cercles représentent les valeurs observées du carbone du sol. Si l'on admet une constante de décomposition de 4%, l'estimation du carbone du sol dans le cas où les émondades sont gardées s'élève à 18 000 kg/ha, ce qui dépasse la valeur observée. On obtient une prédiction correcte en élévant la constante de décomposition à 6%. La perte considérable de carbone lorsque les émondades sont enlevées(mais les résidus de cultures maintenus) ne peut être simulée qu'en admettant une constante de décomposition de 11%. Ces valeurs ne sont cependant pas irréalistes puisque l'on sait que l'oxydation de l'humus est plus rapide sur sols sableux (Parton *et al.*, 1987) et que l'enlèvement des émondades laisse le sol sans protection contre les températures très élevées relevées à la surface du sol sur ces sites.

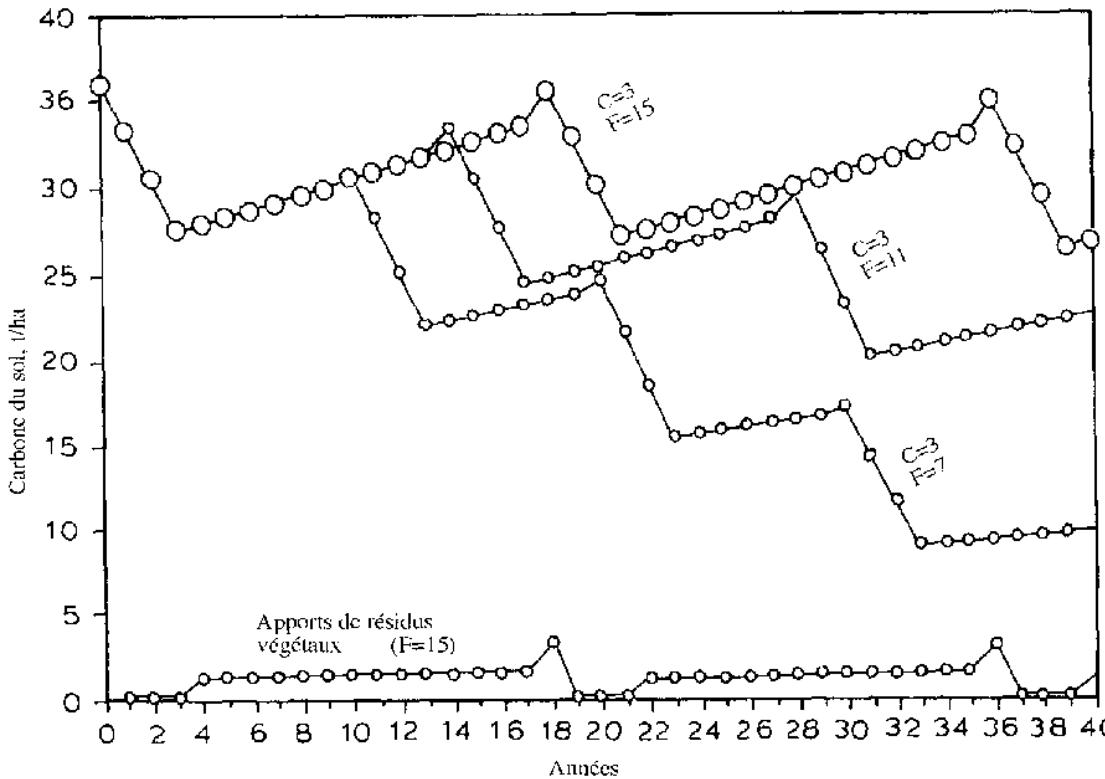


Figure 19 - Culture itinérante aux Philippines. Carbone du sol

Estimations du SCUAF: changements dans le carbone du sol pour un système en rotation de culture itinérante aux Philippines C= durée de la culture en années. F= durée de la jachère en années (données de Kellman 1969).

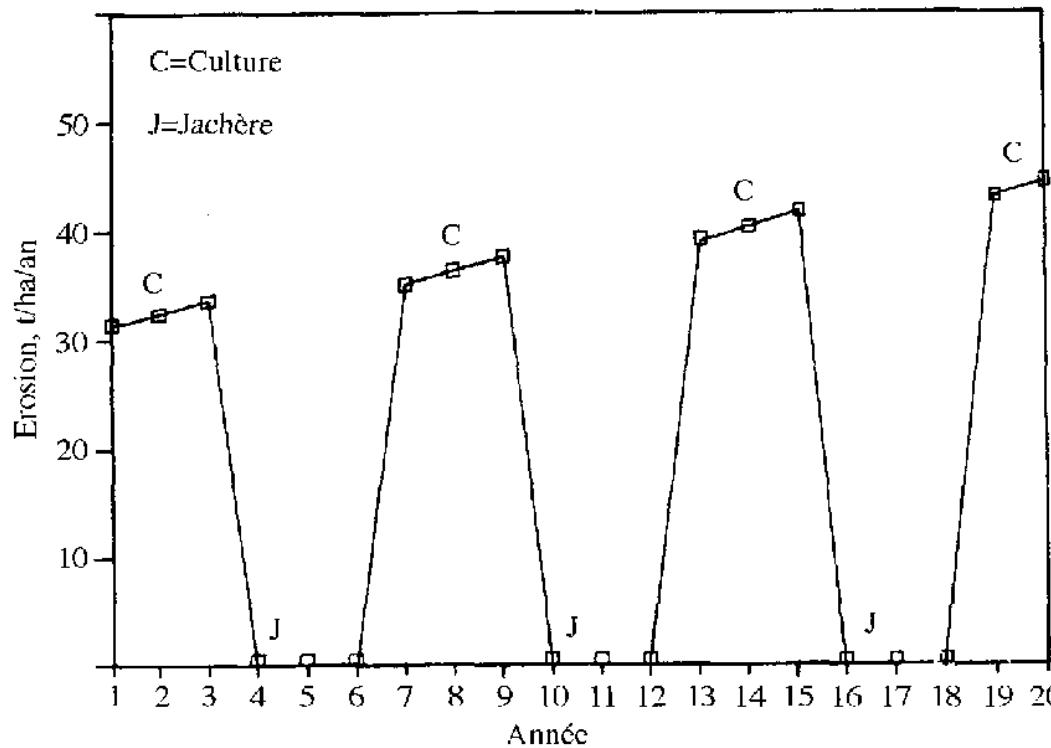


Figure 20 - Culture itinérante. Erosion

Estimations SCUAF: changements dans l'érosion du sol sous culture itinérante avec jachère réduite. Données simulées.

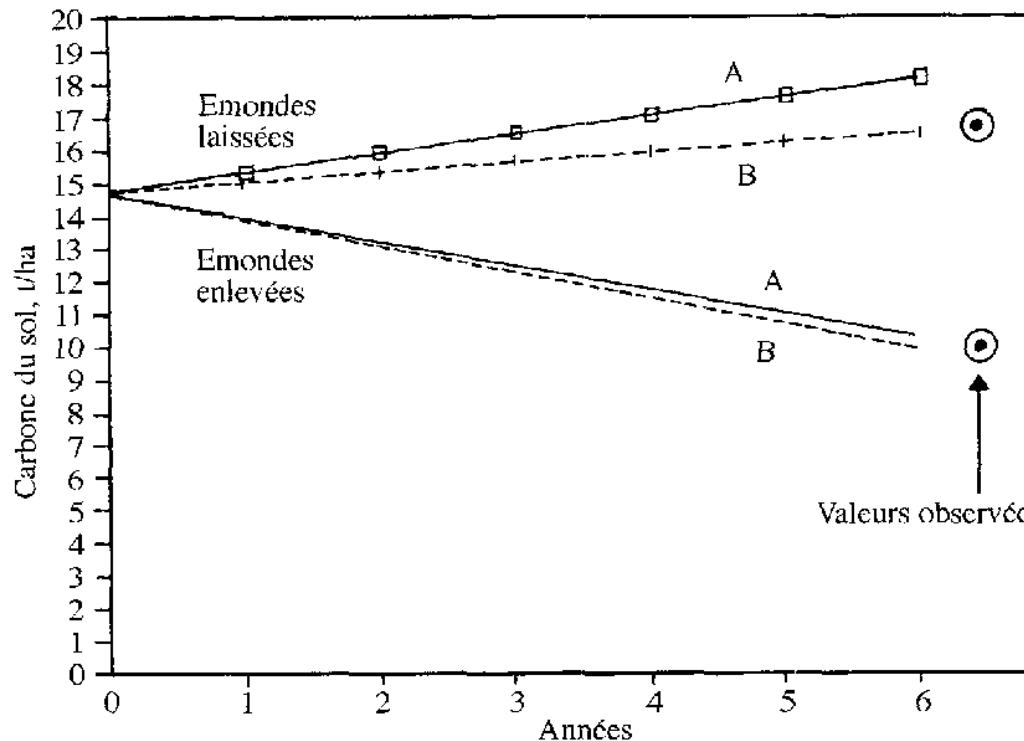


Figure 21 - Culture intercalaire avec haies. Ibadan, Nigeria. Carbone du sol

Estimations SCUAF: changements dans le carbone du sol dans un système zonal, avec cultures intercalaires avec haies, à Ibadan, au Nigeria. Les lignes A montrent les prédictions basées sur des valeurs par défaut dans le modèle. Les lignes B montrent les estimations ajustées selon des données expérimentales (données de Kang et al., 1981, 1985)

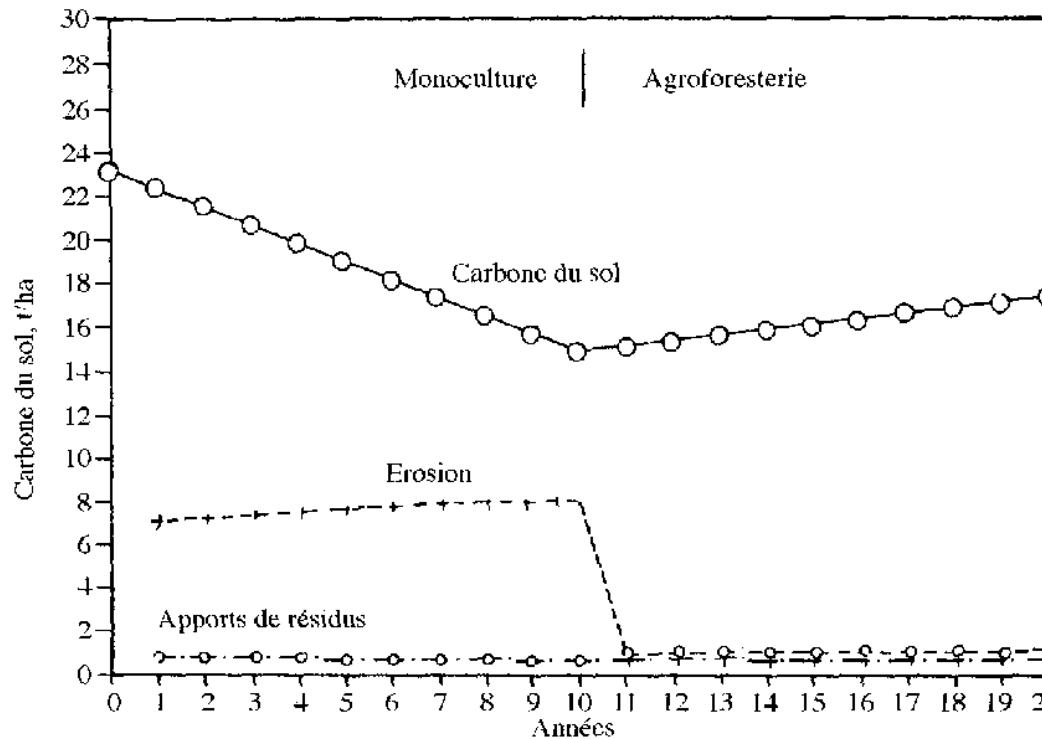


Figure 22 -. Cacaoyer - Cordia, Costa Rica. Carbone du sol, deux fractions

Estimations SCUAF: changements dans le carbone et l'azote du sol avec Un système d'arrangement spatial mixte, plantation de cacaoyer en combinaison avec Cordia alliodora, au Costa Rica (données d'Alpizar et al., 1986, 1988) Le carbone est modélisé à 45 cm de profondeur, en supposant 50% sous une forme stable.

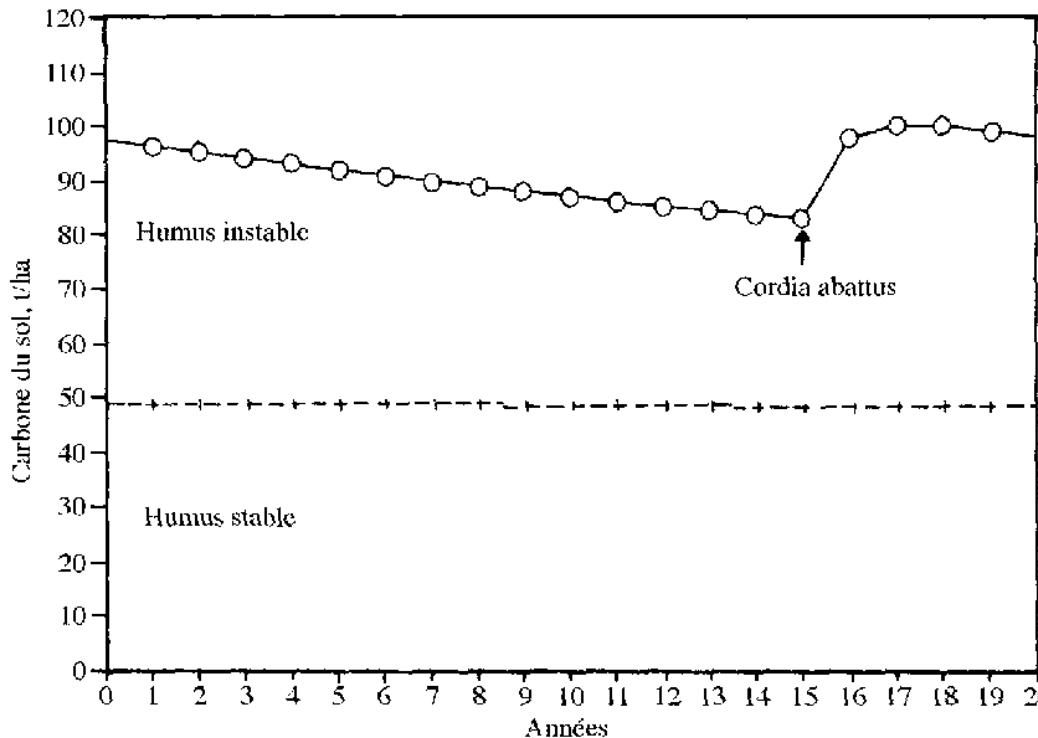


Figure 23 - Remplacement d'une monoculture par l'agroforesterie Carbone du sol et érosion

Estimations SCUAF: changements dans le carbone du sol et l'érosion, mais en monoculture remplacé par l'agroforesterie (hypothèses et données pour la monoculture tirées de Lelong et al., 1984).

La figure 22 illustre un système agroforestier spatial mixte combinant le cacaoyer avec *Cordia alliodora* (Alpizar et al., 1986, 1988). On a ici un climat de plaine humide (600 m d'altitude, pluviosité de 2 600 mm sans mois secs) et un sol fortement acide, avec un taux très élevé de matière organique (carbone de la couche arable = 2,5%). Il y a un apport d'engrais de 120 kg N/ha/an. Les données concernant les changements du sol dans le temps ne sont pas fournies, mais on suppose que ses propriétés sont stables, ce qui est d'ailleurs précisé pour l'azote. Dans la simulation, le cacaoyer est traité comme l'élément culturel. En utilisant des valeurs par défaut pour les processus du sol, la simulation montre un lent déclin du carbone organique, qui est reconstitué si l'on suppose que *Cordia* est abattu après 15 ans et que les résidus des racines sont incorporés au sol; dans la pratique, il peut y avoir une coupe continue et dispersée. Pour le cycle de l'azote, les données indiquent un gain apparent pour le sol (par hectare et par an) de 12 kg d'azote et de 13 kg de phosphore, et une perte de 50 kg de potassium.

Le dernier exemple illustre l'utilisation de SCUAF dans la conception expérimentale. Les données initiales de la figure 23 sont tirées d'une étude d'une monoculture de maïs sur des parcelles érodables en Côte d'Ivoire, extrapolées par simulation sur dix ans. Le système est clairement en voie de dégradation. Après dix ans, on remplace le système par une pratique agroforestière simulée, en ne modifiant que les variables affectées par l'introduction d'une composante ligneuse. L'effet majeur est une forte réduction de l'érosion qui s'étalerait probablement sur deux ou trois ans. Avec une proportion de ligneux caractéristique de la culture intercalaire avec haies, soit 20% ou moins, le système n'est pas encore tout à fait durable. Si les ligneux couvrent 40% du terrain, la matière organique du sol commence à se reconstituer. La question est alors de savoir si on peut concevoir un système agroforestier comportant une telle proportion de ligneux et qui satisfasse les autres critères d'acceptabilité.

Chapitre 16: Recherche

Besoin de recherche

Trois conclusions de la présente analyse, si elles sont considérées conjointement, soulignent la nécessité d'étudier le potentiel de l'agroforesterie pour la conservation du sol, au sens le plus large du maintien ou de l'amélioration de la fertilité du sol.

Tout d'abord, il devient (de plus en plus) important sous les tropiques de conserver le sol. Il est rare qu'une étude de systèmes agricoles en vigueur ne mentionne pas la dégradation du sol ou le déclin de la fertilité parmi les problèmes existants et

souvent comme l'un des plus sérieux. Sur les sols en pente, l'érosion est un des processus qui entraînent une baisse de fertilité; sur les pentes fortes, elle peut en être la cause principale. Plus généralement encore, la pression démographique sur les terres, combinée au manque d'engrais et d'autres intrants, a conduit à une situation qu'on a d'abord qualifiée de surexploitation, et décrit plus tard comme une inaptitude à atteindre la durabilité: pour satisfaire les besoins de la population, on puise dans le sol plus qu'on ne lui restitue, causant ainsi la dégradation de cette ressource de base dont dépend la production.

Ensuite, on a montré que l'agroforesterie semblait pouvoir contrôler l'érosion, maintenir la fertilité du sol et ainsi, conduire à une utilisation durable des terres. Ceci ne s'applique pas qu'à un seul système, mais à toute une gamme de pratiques agroforestières qui peuvent chacune être adaptées dans bien des systèmes différents. Quelques-unes au moins de ces pratiques sont connues pour être acceptées par les agriculteurs, puisqu'on les trouve en tant que systèmes indigènes; d'autres ont atteint un certain niveau d'acceptation dans le cadre de projets de vulgarisation actuellement en cours. Le choix des options de conception montre qu'il est possible d'identifier des systèmes agroforestiers convenant à une grande variété de conditions environnementales et de situations d'exploitation, et qui seront à même de contribuer au maintien de la fertilité du sol et à une utilisation durable des terres.

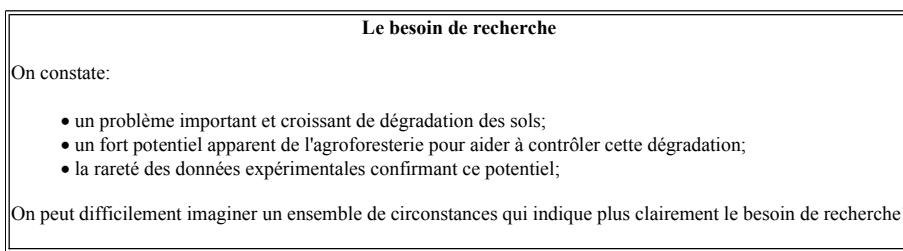
Enfin, on a souligné que beaucoup de preuves de la conclusion précédente sont indirectes. La capacité de contrôler l'érosion du sol est suggérée par l'analyse des causes et des processus de l'érosion en rapport avec les caractéristiques des systèmes agroforestiers. On déduit le potentiel de maintien de la fertilité du sol en partie des effets bénéfiques des ligneux sur les sols. Dans le cas du maintien de la fertilité, de solides indications sont fournies par les systèmes agroforestiers indigènes. Mais les *preuves* scientifiques, au sens strict d'essais contrôlés et répétés, sont très peu nombreuses. Au moment où nous écrivons, seules les cultures intercalaires avec haies et les combinaisons de plantations sont largement documentées par des données expérimentales, seulement pour quelques sites et dans une gamme étroite d'environnements dans les deux cas.

L'importance grandissante de la nécessité de conserver les sols, conjuguée à un grand potentiel apparent de l'agroforesterie et à la rareté des preuves expérimentales, souligne clairement et fortement le besoin de recherche.

Différents niveaux de la recherche agroforestière

On constate en ce moment un débordement d'activité de la recherche agroforestière, résultat d'une meilleure prise de conscience des possibilités de l'agroforesterie. A cause de l'urgence de ces problèmes, causés essentiellement par la croissance démographique et par la pression sur les ressources naturelles, l'agroforesterie tente de faire de grands progrès en peu de temps. Ceci exige une planification structurée de la recherche.

Les systèmes agroforestiers sont extrêmement complexes et impliquent les interactions d'au moins deux composantes végétales entre elles et avec le climat et le sol. Par conséquent, on peut ramener la recherche scientifique en agroforesterie à trois niveaux: *quois? pourquoi? et comment?* (Huxley *et al.*, 1989; Young et Pinney, 1989) (Figure 24).



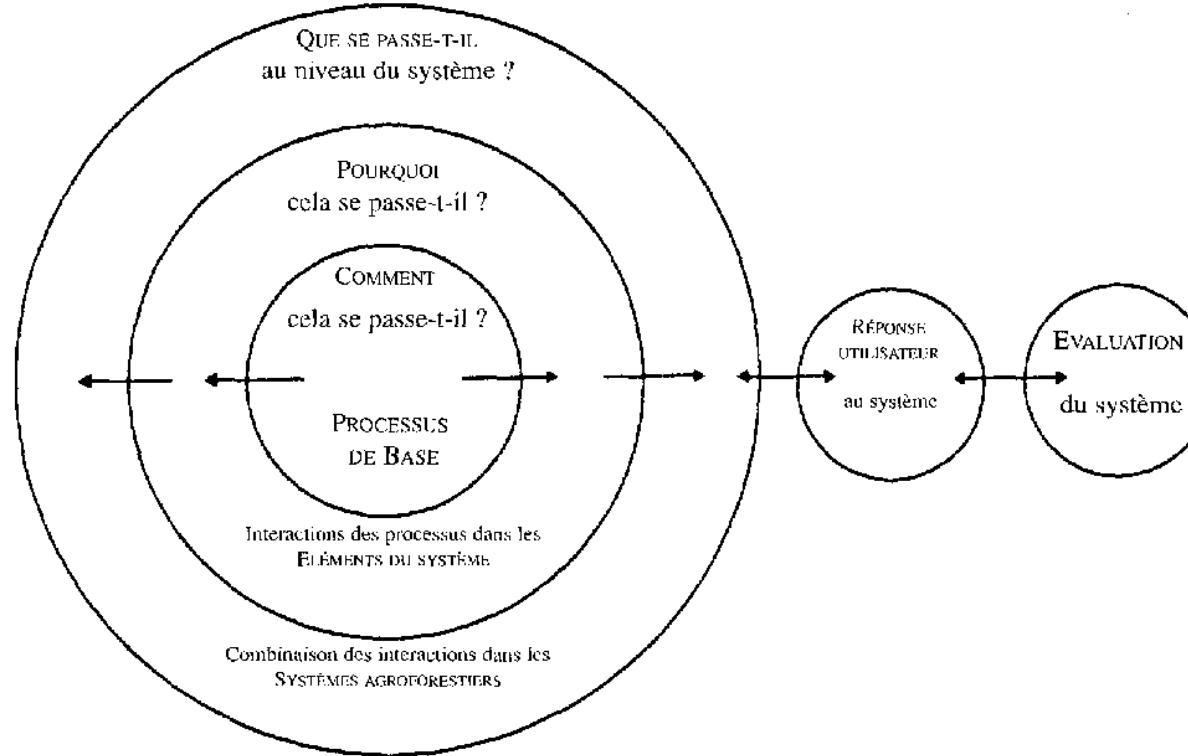


Figure 24 - Niveaux de recherche en agroforesterie (basé sur Young et Pinney, 1989)

La recherche du *QUOI* se rapporte à des questions du genre "qu'est ce qui se passe?". Elle a pour but de répondre aux besoins immédiats de l'agriculteur et des autres utilisateurs de la terre. Les agents de vulgarisation agricole et les agriculteurs ont besoin de conseils concernant les espèces ligneuses qu'il convient de planter, en quel nombre, dans quel arrangement, et avec quelles pratiques de gestion. Des essais locaux de prototypes de systèmes, en milieu réel comme en station, sont le type de recherche qui précède directement de tels conseils.

La recherche du *POURQUOI* tente d'expliquer les raisons pour lesquelles les composantes des systèmes agroforestiers se comportent d'une manière donnée. Pourquoi une culture située en amont d'une haie isohypse pousse-t-elle mieux qu'en aval? Pourquoi une espèce ligneuse est-elle plus compétitive qu'une autre à côté d'une culture de maïs? A ce niveau, la recherche essaye de déterminer les relations de cause à effet qui sont en jeu sur un site spécifique (sol, pente) et sous les conditions climatiques de chaque année. La recherche du *pourquoi* est nécessaire pour concevoir le prototype testé dans la recherche du *quois*.

La recherche du *COMMENT* s'intéresse aux processus fondamentaux qui entrent en jeu dans les systèmes. Comment les taux de minéralisation sont-ils affectés par l'humidité? Comment un assimilat circule-t-il entre les racines des ligneux et celles des cultures? A ce niveau, on examine des processus, t des effets spécifiques, qui opèrent comme des associations d'effets dans la recherche du *pourquoi*. Certaines recherches à ce niveau ne sont pas spécifiques à l'agroforesterie, mais impliquent des processus de base, par exemple, de la microclimatologie, de la physique du sol, de la biologie du sol et de la nutrition végétale.

Au-delà de ces niveaux de recherche scientifique pure se trouvent deux niveaux supplémentaires: la réponse de l'utilisateur et l'évaluation. La réponse de l'utilisateur évalue les réactions des agriculteurs et autres utilisateurs des terres à des systèmes agroforestiers proposés. Dans ce que l'on considérait autrefois comme une procédure à sens unique, qui consistait à concevoir des systèmes sur des bases scientifiques puis à tester leur acceptabilité, il est désormais courant d'inclure la recherche en milieu réel et les opinions et suggestions des agriculteurs à un stade précoce de la planification de la recherche. Offrir une structure à cette démarche est l'une des caractéristiques de la procédure D & D (diagnosis and design).

L'évaluation vise à tester l'intérêt global des systèmes proposés, d'un point de vue environnemental, économique et social. On peut la faire à deux niveaux: *ex ante*, en analysant les avantages et les inconvénients probables d'un système avant de le tester, en se basant pour cela sur l'estimation des performances, et *ex post*, en analysant le système après qu'il a fonctionné pendant quelques années, en vue de l'améliorer pour l'avenir.

Le regain d'intérêt que l'on constate actuellement envers l'agroforesterie vient à un moment où l'on se concentre aussi sur la recherche "utile", visant à résoudre les "besoins pratiques des agriculteurs". Comme résultat, la recherche agroforestière

en cours est fortement centrée sur les essais de systèmes potentiels (recherche du *quoi*), aux dépens des études sur les processus fondamentaux. Il est vrai qu'"il faudrait orienter la recherche vers les besoins pratiques des agriculteurs", mais la logique qui dit qu'"en conséquence, elle doit reposer sur des essais en champ de systèmes pratiques de gestion" est erronée.

On peut aisément comprendre les inconvénients de la recherche du *quoi* ou "par essais et constatations" à l'aide d'un exemple. Considérons une seule pratique, celle des cultures en couloirs. Sur un site donné, il serait certainement possible de tester quatre espèces de haies, trois espacements des plants, quatre écartements des rangs et trois hauteurs de coupe; avec trois répétitions, cela donnerait 432 parcelles - sans tenir compte des essais de cultures! On peut en réduire quelque peu le nombre en faisant une répétition partielle et une confrontation, ou en utilisant des dispositions méthodiques, mais l'effort de recherche nécessaire reste considérable. Alors, ayant trouvé la combinaison optimale, tout ce que l'on saura, c'est qu'elle convient au sol donné et aux conditions climatiques en vigueur pendant les essais. Poursuivre des essais en champ sans comprendre les processus de base revient à faire de la recherche en chimie sans connaître le tableau de Mendeleïev.

Des études au niveau du *pourquoi*, sur le fonctionnement des processus et sur leur interaction avec les éléments du système, peuvent conduire à une plus grande efficacité des efforts de recherche. Si nous comprenions comment les ligneux et les cultures se partagent, ou se disputent les ressources climatiques et pédologiques, nous serions à même de concevoir des prototypes agroforestiers susceptibles de fonctionner de façon satisfaisante dans un ensemble donné de conditions. Il serait exagéré de supposer que notre connaissance des interactions environnementales en agroforesterie puisse jamais atteindre le point où l'on concevrait ainsi un système qui fonctionne avec précision, mais le principe est applicable. Des essais (recherche du *quoi*) pourraient alors être menés avec de faibles marges de variations. De cette manière, la recherche aux niveaux du *quoi* et du *pourquoi* peut conduire à une bien plus grande efficacité dans les essais en champ de prototypes de systèmes.

A chaque niveau de la recherche correspond un type différent d'institutions. La recherche du *comment* demande des connaissances et des équipements spécialisés; elle convient aux universités, aux instituts internationaux et aux organisations spécialisées, nationales ou zonales. La recherche du *pourquoi* peut se faire au niveau international, mais elle devrait aussi constituer une partie de la mission des grandes organisations nationales de recherche agroforestière. Les essais de prototypes en milieu réel sont menés au niveau national, de préférence dans un réseau de sites dont l'environnement diffère.

Objectifs de la recherche

La recherche sur les aspects de l'agroforesterie qui touchent à la fertilité des sols est un sujet d'une grande complexité et pose de nombreux problèmes pratiques. On peut la concevoir en deux parties: des études pédologiques spécialisées et des observations du sol dans la recherche agroforestière en général. Il est important que les études du sol ne soient pas exclusivement réalisées par des institutions spécialisées. Etant donné l'importance du maintien de la fertilité comme un aspect fondamental de la plupart des systèmes agroforestiers, quelques observations de base sur le sol devraient faire partie intégrante de tout essai agroforestier général en champ.

Recherche spécialisée sur les sols

Dans la recherche spécialisée, le premier objectif est la fertilité. Cette recherche est faite par des pédologues dans des institutions disposant des équipements nécessaires. Certaines études peuvent être basées sur des méthodes de mesure relativement peu compliquées, comme l'échantillonnage et l'analyse et ne demandent qu'une bonne conception et une exécution soignée. D'autres font appel à des techniques spécialisées, comme par exemple le marquage isotopique (Young, sous presse, b).

Certains problèmes demandent une attention particulière. Dans la plupart des cas, on a besoin à la fois d'améliorer les connaissances fondamentales sur les processus en cause et d'étudier leur mode d'action sous des ligneux et au sein de réalisations agroforestières. Nous faisons ici allusion à la fois à des arbres et des arbustes isolés et à l'ensemble de la composante ligneuse de divers systèmes agroforestiers:

- érosion du sol: fonctionnement des facteurs et des processus sous des mélanges de cultures et de ligneux; fonctions de barrière et de couverture; processus au sein de barrières de haies partiellement perméables;
- matière organique du sol: formation, décomposition, effets des cycles sur la fertilité; rôle des résidus herbacés, ligneux et racinaires dans sa formation;
- cycle des éléments nutritifs, en particulier efficacité prélèvement d'éléments nutritifs et du recyclage par les ligneux;
- production de biomasse par les ligneux, qualité et décomposition de la litière;
- systèmes racinaires et mycorhiziens des ligneux, et leurs effets;
- effets des ligneux sur les propriétés physiques du sol; fixation de l'azote par les ligneux; effets d'espèces ligneuses données sur les propriétés du sol; qu'est-ce qui fait qu'un arbre est bon pour la fertilité du sol?
- études de fertilité des sols sous systèmes agroforestiers, y compris la matière organique, le cycle des éléments nutritifs, l'érosion et le suivi des changements du sol.

Les principales questions que se pose la recherche sur les sols et l'agroforesterie sont exprimées sous la forme de dix hypothèses spécifiques dans l'encadré ci-contre. Pour un sujet seulement, à savoir la fixation d'azote par les ligneux, l'effort de recherche en cours correspond aux besoins. Une évaluation des preuves détenues actuellement pour et contre chaque hypothèse est donnée par Young (1989a, 1991a).

Observations du sol dans la recherche agroforestière en général

La plupart des essais agroforestiers en champ autres que ceux visant des aspects particuliers devraient intégrer une composante de recherche sur les sols. Il est essentiel d'établir si le projet de réalisation, par ailleurs satisfaisant, conserve le sol dans un état stable et productif; il est en même temps souhaitable d'avoir un aperçu des cycles de la matière organique et des éléments nutritifs.

La quantité et le degré de sophistication des mesures prises varieront en fonction des moyens disponibles et de la nature du système agroforestier étudié. Nous suggérons comme un minimum de base les observations suivantes:

- avant d'établir un essai, prendre des échantillons du sol sur le site et sur les parcelles de contrôle, suivant un schéma statistiquement établi, et les analyser. Après trois ans, prélever de nouveaux échantillons suivant un schéma stratifié basé sur les composantes du système, par exemple, en dessous des ligneux et alentour dans des systèmes mixtes, ou dans les haies et les allées cultivées dans des systèmes de cultures intercalaires. Répéter tous les trois ans, ou quand l'essai se termine. Pour réduire les coûts, n'analyser dans un premier temps qu'une partie des échantillons prélevés, le reste n'étant fait que si les données initiales laissent entrevoir des résultats significatifs;
- mesurer la production de biomasse par tous les éléments du système, ligneux et cultures, et sa répartition entre les feuilles, les fruits et le bois. Si possible, effectuer des analyses de la teneur en éléments nutritifs des feuilles des ligneux et, mieux encore, d'autres parties végétales;
- tenter, aussi modestement que ce soit, d'évaluer la production des racines et leur distribution. La méthode la plus simple consiste à ouvrir une tranchée perpendiculaire à des interfaces choisies entre cultures et ligneux et à déterminer la distribution des racines et leur masse;
- si l'essai se déroule sur une terre en pente, tenter de mesurer le taux d'érosion. Pour des échantillons prélevés sur des sédiments érodés, analyser la teneur en matière organique et en éléments nutritifs.

Dix hypothèses pour la recherche agroforestière et pédologique

- Les systèmes agroforestiers peuvent contrôler l'érosion, réduisant ainsi les pertes du sol en matière organique et en éléments nutritifs.
- Les systèmes agroforestiers peuvent maintenir la matière organique du sol à des niveaux satisfaisants pour la fertilité du sol.
- Les systèmes agroforestiers maintiennent des propriétés physiques du sol plus favorables que l'agriculture, en combinant le maintien de la matière organique et les effets des racines des ligneux.
- Les ligneux fixateurs d'azote peuvent accroître de façon importante les apports d'azote dans les systèmes agroforestiers.
- La composante ligneuse des systèmes agroforestiers peut accroître les apports d'éléments nutritifs provenant de l'atmosphère et des horizons du sol B/C.
- Les systèmes agroforestiers peuvent induire un cycle plus fermé des éléments nutritifs, et par là une utilisation plus efficace de ces éléments.
- Les systèmes agroforestiers permettent de synchroniser la libération des éléments nutritifs provenant de la décomposition des résidus végétaux avec les besoins d'absorption des cultures.
- Le recyclage des bases dans la litière des ligneux peut aider à réduire l'acidité du sol, ou à contrôler l'acidification.
- On peut incorporer l'agroforesterie dans les systèmes de réhabilitation des sols dégradés.
- Dans le maintien de la fertilité du sol sous des systèmes agroforestiers, le rôle des racines est au moins aussi important que celui de la biomasse épigée.

Inclure un tel ensemble d'observations de base sur le sol dans la plupart des essais pourrait largement apporter, en cinq à sept années, les données nécessaires pour confirmer, sur une base scientifique, le potentiel de l'agroforesterie pour le maintien de la fertilité du sol.

Conception de la recherche

Il ne s'agit pas dans le cadre de cet ouvrage de discuter en détail la conception, les techniques et les problèmes de la recherche. On espère faire de la recherche sur les sols en agroforesterie le sujet d'une publication ultérieure. Pour rationaliser les études sur le terrain, on pourrait faire la distinction entre les pratiques de rotation, les pratiques spatiales mixtes et les pratiques zonales (Huxley, 1986a, 1986b) (p. 22). Nous nous contenterons ici d'indiquer, au moyen de deux exemples, le champ ouvert à la conception, et les relations entre les différents niveaux de recherche.

Contrôle de l'érosion sous cultures intercalaires

Nous avons vu ci-dessus le potentiel apparent des cultures intercalaires ou des systèmes de haies isohypsées pour contrôler l'érosion hydrique du sol. Le système à trouver doit réduire à des niveaux acceptables la perte d'éléments nutritifs et de matière organique dans les sols érodés. Le contrôle est obtenu par une combinaison de l'effet de barrière des haies et de celui de couverture des émondades de ces mêmes haies, qui s'ajoutent aux résidus de culture. La conception et la gestion peuvent varier quant au choix des espèces utilisées en haies, aux rangées de haies simples ou doubles, à l'espacement des plants dans les rangées, à l'écartement de celles-ci et au placement des émondades. Quelques-uns de ces choix peuvent s'avérer moins acceptables par les agriculteurs, par exemple si les émondades servent de nourriture au bétail. Il existe très peu de données expérimentales. Ces besoins et ces choix, exprimés dans le cadre des conditions locales de climat de pente et de sol, forment la base de la conception de la recherche (voir Stocking, 1985a).



Photo 21- Recherche: parcelle de démonstration de prototype où des cultures intercalaires avec haies (*Gliricidia Sepium*) sont associées à des bandes enherbées et des arbres fruitiers. Maha Illuppallama, Sri Lanka.



Photo 22 - Recherche: étude d'une interface arbre-culture avec *Leucaena leucocephala* et *sorgho*. Hyderabad, Inde.



Photo 23 - Recherche: séparation de l'interaction des racines et des effets au-dessus du sol au moyen d'une feuille de polyéthylène enterrée. Hyderabad, Inde.

Dans ces cas précis, il peut être utile dès le début quelques essais de systèmes, étant donné, toutes déductions faites, les fortes chances de succès. Le premier pas est de mettre au point un système prototype ("meilleur pari") et le second, de tester les variations de variables sélectionnées. La mise au point du prototype devrait prendre en compte des considérations telles que, pour les espèces des haies, une survie élevée et une croissance vigoureuse (déterminées par la sélection et l'évaluation de base de ligneux à buts multiples, et non dans le cadre d'essais sur l'érosion) et une décomposition de la litière de feuilles modérée à lente, de façon à maintenir la couverture du sol pendant la période des pluies érosives. Dans un

premier temps, on peut choisir un écartement des rangées semblable à celui qui est recommandé pour des structures conventionnelles de conservation, en fonction du climat, du sol et de l'angle de la pente. Sur la base de ces considérations, un prototype peut être installé sur une parcelle d'environ 50 x 10 m (voir ci-dessous), si possible sur au moins deux angles de pente, pour y contrôler le volume de l'écoulement, la perte de sol et les pertes de matière organique et d'éléments nutritifs.

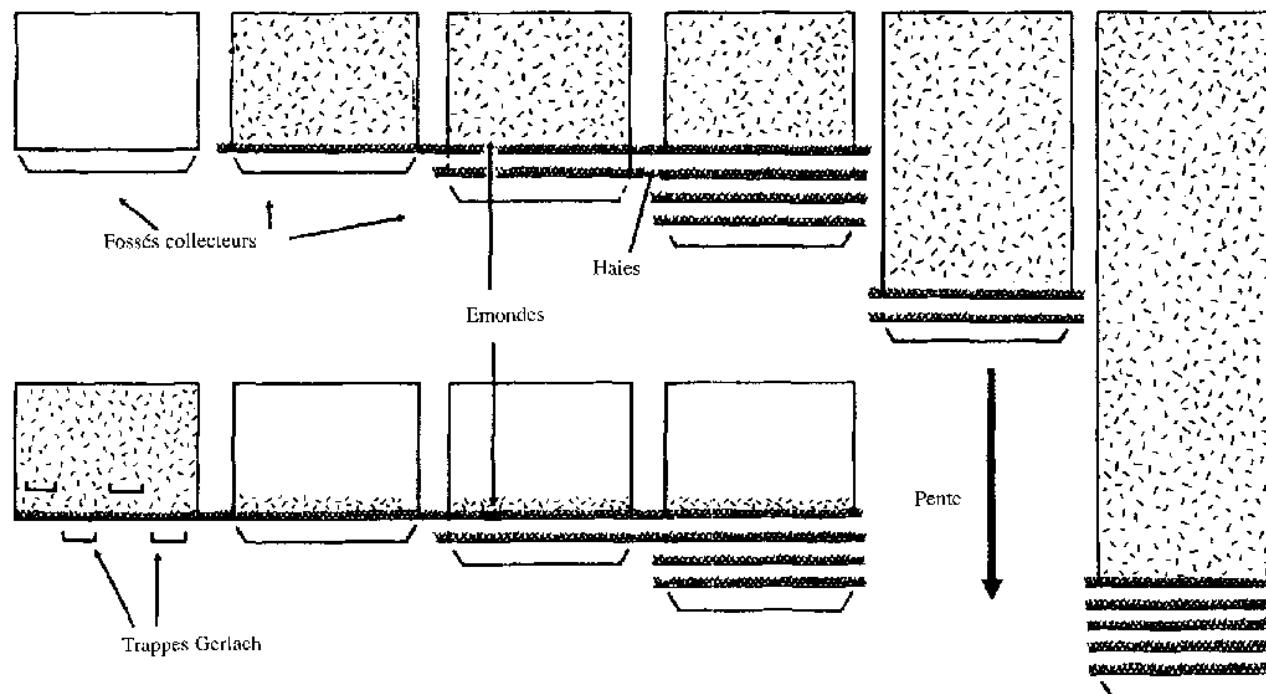


Figure 25 - Traitements pour étudier les effets d'une seule haie sur le ruissellement et l'érosion Les variables sont le nombre de lignes dans chaque haie la répartition des émondages sur toute la surface cultivée ou contre la haie et la largeur de la surface cultivée. La randomisation et les répétitions ne sont pas illustrées.

Toutefois, le temps et le coût qu'impliquent des essais multiples de systèmes complets est considérable. On peut réduire les efforts en incluant quelques recherches au niveau du *pourquoi*, dans des études sur une seule barrière de haies.

La figure 25 suggère un plan possible. On suppose que l'espèce végétale identifiée pour les haies est adéquate; l'objectif est d'étudier l'impact de la largeur de la barrière, de la gestion des émondages et de l'écartement des rangées, dans le but de mettre au point un système qui combine le contrôle de l'érosion avec un effort de plantation ou une perte de terrain minimum. L'essai consiste en des haies simples, à deux rangs ou à quatre rangs, chacune avec deux modes d'émondage, avec dépôt dans l'allée ou entassement contre la barrière, situées en contrebas d'une terre cultivée de largeur standard. D'autres parcelles servent à tester les haies à deux et à quatre rangs avec une largeur de terrain cultivé double ou quadruple, en plus d'une parcelle de contrôle couverte d'une seule culture. Ceci fait neuf parcelles, à répéter dans la limite des moyens disponibles. Si chaque parcelle mesure 5 x 5 m, plus une surface de 5 x 3 m pour prendre les mesures, un jeu de neuf parcelles prend moins de place qu'un seul essai de système comme celui esquissé ci-dessus. Les résultats permettraient de concevoir un prototype avec beaucoup plus de habileté qu'il n'est actuellement possible.

La plupart des stations de recherche s'arrêteraient là. Cependant, certains sites majeurs devraient intégrer une part de recherches sur le *comment*, dans ce cas-ci, en mettant en place une seule haie de façon à suivre le flux hydrique en dessous et au-dessus de la surface du sol, ainsi que le mouvement réel des sédiments par un marquage aux éléments traceurs fluorescents ou isotopiques.

Maintien de la matière organique du sol par les ligneux

L'aptitude des arbres, des arbustes ou des haies à remplacer les pertes de matière organique est essentielle pour le maintien de la fertilité dans tous les types de pratiques agroforestières - par rotation, spatiales mixtes ou zonales. Il est donc fondamental que la conception permette de concrétiser cette aptitude.

Au niveau du *quois*, le suivi de la matière organique devrait être inclus dans l'ensemble standard d'observations dans les essais de systèmes. Les détails varieraient suivant que l'on teste des systèmes de rotation, spatiaux mixtes ou zonaux. Purement du point de vue de la fertilité du sol, un grand nombre de ligneux est souhaitable (par exemple haies ou arbres d'ombragé en plantation serrée), et il faut trouver un compromis avec le nombre réduit qu'imposent des considérations telles que l'ombrage et la surface cultivée.

Cependant, pour pouvoir mettre au point des systèmes pratiques autrement que par devinettes, il est nécessaire de trouver les quantités et les sortes de résidus végétaux qui sont nécessaires pour maintenir les niveaux spécifiés de matière organique du sol sous les conditions locales de climat et de type de sol. Une telle recherche repose sur l'ajout de combinaisons de différentes sortes et de différentes quantités de biomasse végétale et sur le suivi des changements du sol qui en résultent. Etant donné que les fruits des cultures seront invariablement recueillis, le matériel végétal pertinent sera constitué des feuilles (plus éventuellement les fruits), du bois et des racines des ligneux, et des feuilles (résidus) et racines des plantes cultivées.

A la différence des essais systémiques, où l'on étudie la totalité des interactions, dans la recherche sur les sols au niveau du *pourquoi*, il est préférable d'éliminer ou de minimiser les effets microclimatiques. A cet effet, on peut uniformiser au maximum toutes les parcelles ou pratiquer un émondage régulier et court.

La figure 26 illustre quelques traitements possibles. Chaque parcelle est d'une taille suffisante pour obtenir une croissance des plantes raisonnablement uniforme et permettre des échantillonnages répétés du sol; 5 x 5 m est peut-être un minimum; elle doit être entourée par des bordures tampons composées des mêmes plantes et soumises aux mêmes traitements. Il y a des parcelles de contrôle uniquement ligneuses (qui reçoivent des résidus de feuilles, de bois et de racines des ligneux), des parcelles de contrôle uniquement culturales (qui reçoivent des résidus de feuilles et de racines de plantes cultivées) et une surface labourée mais sans ligneux ni plantes cultivées. Celle-ci est appelée parcelle "tue-MOS", son objet étant de suivre le taux de perte de la matière organique du sol (MOS) sans aucun renouvellement.

Pour d'autres traitements, les résidus épigés des ligneux et des cultures peuvent être inclus ou exclus par transfert manuel des émondons et de la litière. Les résidus racinaires des plantes voisines peuvent être écartés par des feuilles de plastique enterrées parallèlement aux haies, ou, ce qui est moins facile, autour de chaque ligneux. Il peut être utile d'inclure des quantités de matériel végétal plus grandes que celles qu'on peut obtenir dans la pratique, pour mettre d'autant mieux en évidence le fonctionnement des processus.

Le bloc inférieur de la figure 26 est destiné à la comparaison avec un système de rotation. La proportion des ligneux par rapport aux plantes cultivées est la même que dans quelques-unes des parcelles spatiales, de l'ordre de 25% de la surface totale. A des intervalles de deux à trois ans, la parcelle de ligneux tourne en rotation sur toute la zone, et le reste est mis en cultures. Une telle comparaison entre les systèmes spatiaux et les systèmes de rotation, avec les mêmes pourcentages de ligneux et de cultures mais substituant des interactions dans le temps à des interactions dans l'espace, est un outil précieux dans bien des recherches agroforestières, en plus des études sur la fertilité du sol. Les parcelles sont échantillonnées chaque année pour suivre les changements dans la matière organique du sol, ainsi que les conditions physiques et chimiques du sol et le rendement des cultures.



Photo 24 - Recherche: lysimètre pour mesurer le lessivage, avec un arbre poussant sur son sol. Dehra Dun, Inde.

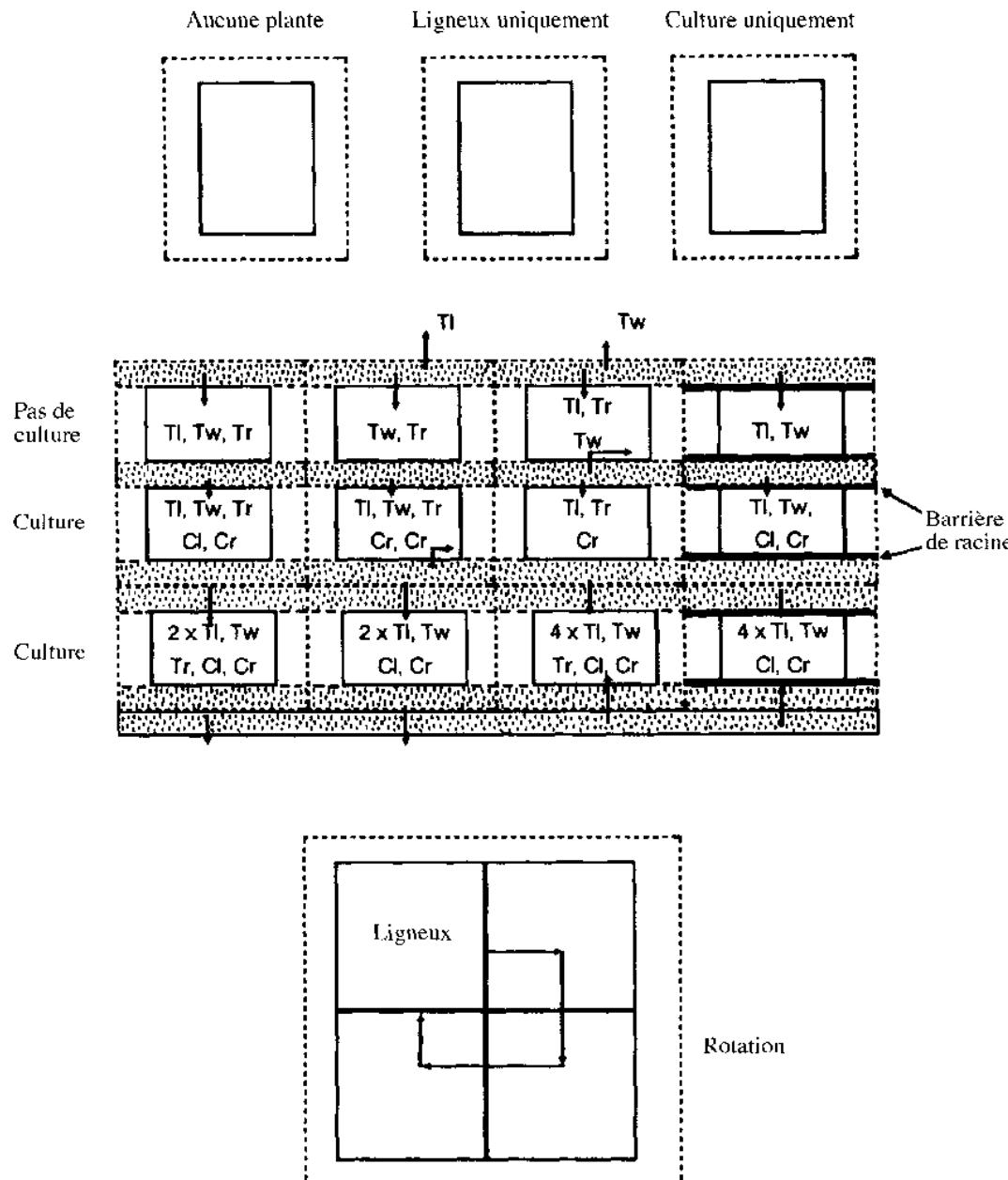


Figure 26 - Traitements pour étudier les effets des résidus de ligneux et de cultures sur la matière organique du sol

Les lettres indiquent quels résidus végétaux sont appliqués au sol: T = ligneux; C = cultures; I = feuillage; w = bois; r = racine; 2x = deux fois la quantité standard; 4x = quatre fois la quantité standard. La randomisation et les répétitions ne sont pas illustrées.

Dans ce cas, la recherche au niveau du *comment* peut s'appuyer sur le marquage isotopique au carbone 14, pour suivre ce qu'il advient de toutes sortes de résidus végétaux ajoutés au sol.

La même approche, combinant des essais systémiques et des études d'éléments critiques du système, peut s'appliquer au cycle des éléments nutritifs et à d'autres aspects de la fertilité du sol.

Techniques et observations

Bien des remarques et des hypothèses faites en agroforesterie sont semblables à celles faites par la recherche agronomique. D'autres demandent à être adaptées aux caractéristiques spéciales des composantes ligneuse et culturelle.

Pour les recherches sur l'érosion du sol, l'ancienne norme parcellaire U.S. de 20 x 20 m (0,01 acre) ne fait plus l'unanimité dans les études agronomiques et pose des problèmes en agroforesterie. Elle est trop petite pour obtenir une couverture suffisamment homogène ou représentative dans les systèmes mixtes ligneux-cultures. Quelques parcelles de cette taille peuvent être incluses pour permettre de faire des comparaisons avec le corpus important de données ainsi obtenues. Des dimensions supérieures sont utilisées à l'heure actuelle pour la plupart des essais de systèmes agroforestiers, par exemple à Dehra Dun, en Inde (90 x 15 m), à Ibadan, au Nigeria (70 x 10 m), à Machakos, au Kenya (40 x 40 m) et à Maha Illuppallama, au Sri Lanka (100 x 40 m).

L'approche parcellaire de la mesure de l'érosion est complétée par des études de bassins de captage de premier ordre qui enregistrent l'écoulement et le contenu sédimentaire d'une buse de sortie. Il est de la plus grande importance que les mesures comprennent une analyse de la matière organique et de la teneur en éléments nutritifs du matériel érodé, en plus de la masse de sol perdue.

Pour les recherches sur la fertilité des sols, les observations sont en grande partie identiques à celles d'essais agricoles. Le manuel du Programme sur la biologie et la fertilité des sols tropicaux (Anderson et Ingram, 1989) donne une série de base pratique des méthodes d'analyse. Nous en soulignerons cinq aspects:

- il est fondamental de mesurer tous les taux de production de biomasse, par les cultures et par les ligneux, en distinguant les feuilles, les fruits, le bois et les racines; de noter tous les ajouts et tous les retraits de matière organique enregistrés sur la parcelle ou dans le système étudié, et lorsque c'est possible, d'analyser des échantillons de ces parties de plantes pour connaître leur teneur en éléments nutritifs;
- plus précisément par rapport à ce qui précède, il faut tenter de mesurer la biomasse en place et la production des systèmes racinaires, pour relativiser leur importance dans l'économie de la matière organique et, probablement, dans celle des éléments nutritifs. Des méthodes sont données par Anderson et Ingram (1989);
- le suivi doit couvrir tant les propriétés pédologiques que la croissance végétale. Mesurer seulement les changements du sol n'est pas suffisant; les propriétés déterminées par l'analyse des sols sont des variables individuelles, dans quelques cas artificielles, et ne peuvent pleinement indiquer la fertilité du sol. Inversement, si l'on prend la croissance des plantes (ou même le rendement des cultures) comme unique critère d'évaluation, la recherche tombe entièrement au niveau du "quoi". On considère alors le sol comme une "boîte noire", sans avoir de preuves sur les causes des effets observés;
- la microvariabilité des propriétés dans l'espace est un grave problème pour tous les types de recherches sur les sols. Ce n'est pas seulement parce que des changements importants peuvent apparaître sur des distances de quelques mètres. Mais des échantillons d'un sol qui semble complètement uniforme peuvent faire apparaître des coefficients de variation dans leurs valeurs analytiques de l'ordre de 25% pour le carbone et l'azote, et de 30% à 70% pour les autres éléments nutritifs (Dent et Young, 1981: pp.92-95). Pour identifier des changements significatifs, il faut un nombre important d'échantillons (Cochran et Cox, 1957: pp.20-21). Le recours à un échantillonnage multiple peut réduire le coût des analyses;
- la plupart des recherches agroforestières sont spécifiques à un environnement (Young, 1986b). On ne peut garantir qu'une pratique ou un système efficace sous une certaine combinaison de climat, de formes de terrain, de sol et de végétation sera aussi efficace sous une autre. Ainsi chaque pratique doit être testée pour les principales zones climatiques, pour les principaux types de sols présents et, au besoin (systèmes sylvopastoraux), pour les types de végétation.

Chapitre 17: Conclusion**Etudes antérieures**

Dans son étude fondamentale sur la productivité du sol sous agroforesterie, Nair (1984: pp.68-69, 72) concluait que:

l'introduction d'espèces compatibles et désirables de ligneux pérennes sur les terres agricoles peut amener une amélioration marquée de la productivité du sol.. L'agroforesterie n'est qu'une méthode potentielle d'utilisation des terres qui si elle est convenablement adoptée peut se révéler supérieure à d'autres méthodes dans certains cas. Géré de manière adéquate le système est susceptible d'utiliser les éléments nutritifs plus efficacement et à un moindre coût et d'augmenter la durabilité de la production de la terre. (Cependant) les concepts doivent être validés par la recherche sur le terrain avant que des pratiques de gestion du sol spécifiques à certains sites puissent être recommandées.

Passant en revue les effets des systèmes agroforestiers tropicaux sur l'érosion hydrique, Wiersum (1984) a mis en évidence que:

on ne peut pas espérer que des arbres individuels exercent le même effet protecteur que des écosystèmes forestiers non perturbés. La clef du contrôle de l'érosion par l'agroforesterie n'est pas dans la présence des ligneux en soi mais plutôt dans de bonnes pratiques de gestion... De telles pratiques ne comportent pas seulement des méthodes de maintien d'une couverture directe du sol mais peuvent également supposer des mesures de construction telles que des terrassements.

Dans une note sur la productivité et la durabilité du sol en système agroforestier, Sanchez (1987: pp.206, 219) a proposé l'hypothèse de base suivante sur les sols et l'agroforesterie:

des systèmes agroforestiers appropriés améliorent les propriétés physiques du sol entretiennent la matière organique et favorisent le cycle des éléments nutritifs. Alors qu'il existe des preuves des effets favorables sur les sols de certaines techniques agroforestières (en particulier sur les sols les plus fertiles), il y a une tendance à généraliser et à extrapoler les avantages en matière de productivité et de durabilité à des sites plus marginaux. Il est temps de faire intervenir la science et de tester systématiquement les effets des systèmes agroforestiers sur différents sols et vice versa.

Chacune de ces conclusions combine, à sa manière, la reconnaissance d'un potentiel avec certaines mises en garde. Pour Nair, qui a écrit avant que la recherche agroforestière n'atteigne un niveau acceptable, les concepts doivent être validés avant d'être recommandés sur le terrain. Wiersum attire l'attention sur le fait que l'agroforesterie ne contrôle pas automatiquement l'érosion, mais seulement si sa conception et sa gestion sont bonnes. Sanchez avertit que les résultats optimistes obtenus de quelques études expérimentales à ce jour ne doivent pas être étendus sans discernement à tous les types de sols et à toutes les pratiques agroforestières.

La présente étude

La conclusion de la présente étude est semblable à celles des revues citées ci-dessus, mais l'accent y est différent. Si l'on inclut le contrôle de l'érosion, l'hypothèse générale sur les sols et l'agroforesterie peut être formulée comme suit:

les systèmes agroforestiers appropriés ont la capacité de contrôler l'érosion, de maintenir la matière organique du sol et ses propriétés physiques et de favoriser un recyclage efficace des éléments nutritifs.

Approprié signifie adapté à l'environnement physique et aux conditions sociales et économiques, correctement conçu et bien géré. Pour donner naissance à de telles conceptions, la recherche doit reposer sur de bonnes bases.

Les preuves disponibles sont de deux types: directes et indirectes. Les preuves directes, basées sur les études des effets des systèmes agroforestiers sur les sols, sont rares pour le moment, mais confirment presque invariablement l'hypothèse de base. A celles-là s'ajoutent de nombreuses preuves indirectes - tirées de l'agriculture, de la foresterie et de la pédologie - des effets bénéfiques des ligneux sur la fertilité du sol et de la possibilité de faire usage de ces propriétés dans les systèmes agroforestiers.

L'accumulation de ces deux types de preuves amène à la conclusion que l'hypothèse générale sur les sols et l'agroforesterie est essentiellement exacte. L'agroforesterie a un potentiel considérable de conservation des sols, par le contrôle de l'érosion, mais aussi par d'autres moyens d'entretien de la fertilité du sol. Ce potentiel existe pour la majorité des pratiques agroforestières et pour un large éventail de zones climatiques et de types de sols. Les pratiques agroforestières ayant un potentiel spécifique pour la conservation des sols figurent au tableau 33.

L'hypothèse générale sur les sols et l'agroforesterie		
Les systèmes agroforestiers appropriés ont la capacité:		
<ul style="list-style-type: none"> • de contrôler l'érosion; • de maintenir la matière organique et les propriétés physiques du sol; • de favoriser le recyclage des éléments nutritifs. 		
En conclusion, cette hypothèse est essentiellement vraie et est applicable à une grande variété de conditions environnementales.		

Tableau 33 - Pratiques agroforestières ayant un potentiel pour la conservation du sol.

Pratiques agroforestières	Contrôle de l'érosion	Maintien et amélioration de la fertilité
Jachère arborée améliorée		+
Ligneux sur terres cultivées		+
Combinaison de plantations et de cultures	++	++
Jardins ligneux multiétages	++	++
Cultures intercalaires avec haies	++	++
Ligneux sur structures de conservation du sol	++	
Brise-vent et rideaux abris	++	+
Ligneux sur pâturage	(+)	++
Foresterie de réhabilitation à usages multiples	++	++



Photo 25 - Paysage agricole arboré. Embu, Kenya.

Une importante réserve doit cependant être formulée: en raison de l'étendue de la présente étude, il n'est pas tenu compte des qualités hydriques du sol. C'est là fréquemment un facteur limitant pour la croissance végétale dans les environnements subhumides secs et semi-arides, et un important effort de recherche est nécessaire sur les processus hydriques en agroforesterie. Ces efforts reposent sur les preuves tirées de la recherche en physique du sol, en agronomie et en foresterie, de même que sur l'étude des interactions entre l'eau et le sol à l'interface ligneux-culture et dans les systèmes agroforestiers. Un symposium récent sur les applications de la météorologie à l'agroforesterie constitue un point de départ (Reifsnyder et Darnhofer, 1989).

Une seconde réserve est à faire quant à la rareté, déjà mentionnée, des preuves expérimentales. Un important effort de recherche est nécessaire pour confirmer le potentiel apparent et pour permettre la conception de systèmes agroforestiers adaptés à des environnements spécifiques.

Si la recherche réussit à confirmer les hypothèses et les conclusions obtenues à partir du nombre restreint de preuves actuellement disponibles, l'agroforesterie pourra apporter une contribution majeure à la conservation du sol et à une utilisation durable des terres.

Résumé

Le lecteur trouvera ci-dessous un résumé des conclusions tirées du présent ouvrage. Des résumés ont également été présentés dans Young (1987b, 1988, 199 lb). Le terme "ligneux" qualifie tous les arbres, arbustes, arbrisseaux et bambous. Les "cultures" font référence tant aux cultures agricoles qu'aux pâturages.

Première partie Conservation du sol et agroforesterie

Conservation du sol et durabilité

La *durabilité* se réfère à la productivité combinée avec la conservation des ressources naturelles dont dépend la production. Le maintien de la fertilité du sol est un élément important de l'utilisation durable des terres.

L'objectif premier de *la conservation du sol* est le maintien de la fertilité. Pour l'atteindre, le contrôle de l'érosion est une condition nécessaire, mais en aucun cas suffisante. L'entretien de conditions physiques, chimiques et biologiques du sol favorables à la croissance des plantes est tout aussi important.

Agroforesterie

Par *agroforesterie*, on entend les systèmes d'utilisation des terres dans lesquels des arbres, des arbustes ou des arbrisseaux sont cultivés en association avec des cultures agricoles ou des pâturages, selon un arrangement spatial ou en rotation dans le temps, et dans lesquels se produisent des interactions écologiques et économiques entre les éléments ligneux et les autres éléments du système.

Une *pratique agroforestière* est un arrangement caractéristique d'éléments (par exemple, les ligneux, les cultures, les pâturages, le bétail) dans l'espace et dans le temps. Un *système agroforestier* est un exemple local spécifique d'une pratique. Il existe des milliers de systèmes agroforestiers, traditionnels ou modernes, mais seulement une vingtaine de pratiques distinctes. Ainsi, l'agroforesterie offre un vaste choix, ce qui permet de concevoir des systèmes adaptés à une variété d'environnements physiques et de conditions sociales et économiques.

Les pratiques et les systèmes agroforestiers peuvent être classés en fonction de leurs composantes et de leur arrangement spatial et temporel. La division en *pratiques de rotation, spatiales mixtes et zonales* se rapporte au type et au degré d'interaction entre les composantes ligneuses et culturelles, et constitue une base pour la recherche (voir tableau 4, p. 22).

Les options de gestion destinées à restaurer ou à maintenir la fertilité du sol peuvent être déterminées par:

- le type de terre: l'option n'est applicable que sur certains types de terres;

- l'étendue de terre: l'option exige une plus grande surface de terre que celle mise en culture;
- des problèmes d'approvisionnement: disponibilité ou coût des intrants.

La plupart des méthodes non agroforestières souffrent de l'une ou de plusieurs de ces contraintes. Les diverses pratiques agroforestières sont applicables à toute une série de conditions environnementales et n'exigent pas d'intrants rares ni coûteux. La perte de la surface utilisée par la composante ligneuse peut être compensée soit par des rendements plus élevés de la culture, soit par la valeur des produits des ligneux. L'agroforesterie est donc largement applicable comme option pratique d'exploitation. L'un de ses atouts est d'aider à résoudre les problèmes d'utilisation des terres dans les régions de terres en pente.

Deuxième partie Agroforesterie et lutte contre l'érosion du sol

Tendances de la recherche et des politiques de conservation du sol

L'ancienne approche de la conservation du sol était axée sur les taux de perte de sol. Les besoins de l'agriculture étaient considérés comme fixes, et les mesures de conservation visaient donc à réduire le ruissellement grâce à des structures en terre. D'après l'estimation des aptitudes de la terre, beaucoup de terres en pente ont été jugées inaptes à l'utilisation agricole. Dans la vulgarisation, la conservation du sol était souvent traitée isolément, et quelquefois imposée sous contrainte quasi juridique.

Les problèmes rencontrés dans l'ancienne méthode d'approche et les recherches récentes ont incité à porter une plus grande attention aux effets de l'érosion sur les propriétés du sol, sur la fertilité et sur les rendements des cultures. Pour la conservation, on insiste plus sur le maintien d'une couverture du sol que sur le contrôle du ruissellement. Lorsque des terres en pente sont déjà mises en culture, on tente de trouver des moyens de rendre le système durable. Les vulgarisateurs admettent aujourd'hui que la conservation n'est susceptible de réussir que là où elle est mise en application avec la coopération volontaire des agriculteurs. Elle doit donc être perçue comme étant dans leurs intérêts, comme une partie intégrante des améliorations conduisant à une production plus élevée,

Les aspects de ces nouvelles tendances qui sont importants pour l'agroforesterie sont les suivants:

- le potentiel de l'agroforesterie en matière de contrôle de l'érosion doit être considéré conjointement avec celui de l'entretien de la fertilité;
- il faut accorder une attention particulière à la capacité de la litière ligneuse de maintenir la couverture du sol;
- il est important d'élaborer des systèmes agroforestiers capables d'assurer une utilisation durable des terres en pente;
- grâce à sa capacité de combiner la production et la conservation, l'agroforesterie offre un moyen d'obtenir la coopération des agriculteurs.

L'érosion du sol est la cause d'une baisse importante des rendements et d'une perte de production. L'effet est en général plus affirmé sur les sols tropicaux que sur les sols tempérés, et il est à son maximum sur les sols tropicaux très altérés. Les principales causes d'une telle réduction du rendement sont la perte de matière organique et d'éléments nutritifs et, dans les régions sèches, la perte des eaux de ruissellement et l'abaissement de la capacité de rétention de l'eau. C'est pourquoi les pratiques agroforestières qui combinent le maintien de la fertilité avec le contrôle de la perte de sol sont particulièrement importantes.

Lorsque l'érosion est traitée comme une simple perte de profondeur du sol, il est souvent difficile de justifier la conservation en termes économiques. Toutefois, la justification économique peut souvent passer par la prévention des pertes de rendement des cultures. Les méthodes agroforestières ont généralement un *coût* initial moindre que celui de la construction de terrasses ou de diguettes, et elles permettent aussi de stabiliser, voire d'augmenter les rendements des cultures. Toutes choses égales par ailleurs, il est par conséquent vraisemblable que la conservation par l'agroforesterie montre des résultats économiquement plus favorables que la conservation au moyen de structures en terre.

La conservation du sol au moyen d'une politique de contrainte est dans la plupart des cas vouée à l'échec. C'est là où la conservation est mise en œuvre avec la coopération active des agriculteurs, conscients de leurs intérêts, et en intégration avec d'autres mesures d'amélioration agricole, qu'elle a le plus de chances d'être efficace. Cette situation est en parfait accord avec l'approche de la planification agroforestière par la méthode de diagnostic et de conception (méthode D & D).

Les méthodes de barrière et de couverture pour le contrôle de l'érosion

L'érosion peut être contrôlée en stoppant l'écoulement de l'eau et l'entrainement du sol au moyen de barrières contre le ruissellement c'est la *méthode de la barrière*, et en entretenant une couverture de plantes vivantes et de litière à la surface du sol, c'est la *méthode de couverture*. L'effet de la couverture du sol est tant de contrôler l'impact des gouttes de pluie que de former des microbarrages dispersés contre le ruissellement.

Les modèles de prédiction de l'érosion sont basés sur les variables de contrôle de l'érosivité des pluies, de l'érodibilité du sol, de la pente (angle et longueur) et de la couverture du sol. L'examen de ces modèles montre que la méthode de couverture offre autant, voire davantage de possibilités pour réduire l'érosion que la méthode de la barrière.

Données expérimentales

Les données expérimentales confirment les prévisions des modèles en montrant le potentiel important de la couverture du sol pour le contrôle de l'érosion. L'effet du couvert des arbres est relativement faible, et peut même être négatif. La litière ou le paillis, par contre, sont très efficaces; une couverture de litière de 60% réduit fréquemment l'érosion à de faibles niveaux, même sans mesures supplémentaires du type barrière. Le potentiel de l'agroforesterie pour le contrôle de l'érosion réside donc dans sa capacité à maintenir à la surface du sol une couverture de litière plus importante pendant la période des pluies érosives.

En se basant sur le peu de preuves disponibles, les effets de l'agroforesterie sur les causes de l'érosion semblent être les suivants:

- l'érosivité des précipitations n'est souvent que peu réduite (de 10% approximativement) et peut parfois être augmentée par la présence d'un couvert ligneux;
- la résistance du sol à l'érosion, qui diminue fréquemment en cas d'utilisation agricole continue, peut être maintenue grâce au pouvoir qu'a l'agroforesterie d'entretenir la matière organique du sol;
- le ruissellement et, partant, la longueur effective de la pente peuvent être réduits en premier lieu au moyen de barrages de haies, et ensuite en combinant ligneux et structures en terre;
- comme nous l'avons dit plus haut, il existe un potentiel considérable d'augmentation de la couverture du sol grâce à la litière végétale.

Ainsi, dans la conception de systèmes agroforestiers pour le contrôle de l'érosion, le premier but devrait être d'établir et d'entretenir une couverture de litière végétale à la surface du sol. Cette conclusion est étayée par des preuves directes et indirectes convergentes.

La présence de ligneux ne conduit pas nécessairement à de faibles taux d'érosion. Ce qui importe, c'est l'arrangement spatial des ligneux, et en particulier leur gestion.

Les données sur les taux d'érosion enregistrés sous agroforesterie sont rares et des mesures plus nombreuses sont en cours. Les quelques données existantes confirment l'hypothèse selon laquelle les systèmes agroforestiers peuvent réduire l'érosion à des taux acceptables.

Les haies vives diffèrent des structures en talus et fossés en ce qu'elles constituent des barrières en partie perméables. Les critères standard pour la conception d'ouvrages de conservation, basés sur des structures en terre imperméables, ne sont pas forcément transférables tels quels aux barrières de haies. Ces dernières étant partiellement perméables, elles risquent moins d'être détruites par de violents orages. Des recherches sont nécessaires sur les effets des barrières de haies sur le ruissellement et sur les déplacements de terre.

Pratiques agroforestières de lutte contre l'érosion

Le rôle des arbres et des arbustes dans le contrôle de l'érosion peut être direct ou complémentaire. Dans *l'utilisation directe*, les ligneux constituent par eux-mêmes les moyens de contrôle du ruissellement et de la perte de sol. Dans *l'utilisation complémentaire*, le contrôle est obtenu en premier lieu par d'autres moyens (bandes enherbées, structures en talus et fossés, terrasses); les ligneux servent à stabiliser les structures et à rentabiliser le terrain qu'ils occupent.

Les fonctions de la composante ligneuse dans le contrôle de l'érosion peuvent être:

- la réduction de l'érosion hydrique par une couverture de litière en surface;
- une action de barrière contre le ruissellement par des haies plantées en rangs serrés et par la litière qui s'accumule à leur pied;
- la lutte contre le déclin de la résistance du sol à l'érosion en entretenant la matière organique;
- le renforcement et la stabilisation des structures de conservation en terre là où elles existent;
- la réduction de l'érosion éolienne par des brise-vent et des rideaux abris (pas détaillés ici);
- la rentabilisation du terrain occupé par les structures de conservation;
- la connexion des pratiques antiérosives à la production (rôle en partie psychologique) en en faisant une partie intégrante et permanente du système d'exploitation agricole.

Des méthodes de contrôle de l'érosion par l'agroforesterie ont été conçues ou recommandées, ou bien sont à l'essai dans bon nombre de pays, dans certains cas sur la base de résultats expérimentaux ou, sur d'autres sites, sur une base empirique ou expérimentale.

Peu d'effets des pratiques agroforestières sur l'érosion sont connus avec certitude. En se basant sur ces quelques données, on peut résumer les effets probables comme suit (voir aussi tableau 10 p. 61).

Pratiques de rotation. La jachère arborée améliorée peut contrôler l'érosion pendant la période de jachère, mais le contrôle global de l'érosion dépend principalement des pratiques utilisées pendant la période de mise en culture. Pour la pratique *taungya*, certaines preuves donnent à penser qu'il peut se produire une certaine augmentation de l'érosion pendant la période de culture, par comparaison avec les plantations ligneuses pures, mais l'effet adverse n'est probablement pas important.

Pratiques spatiales mixtes. Les combinaisons de cultures ainsi que les jardins ligneux multiétages, y compris les jardins de case, peuvent contrôler l'érosion grâce à une couverture dense et régulièrement renouvelée de la surface du sol. Dans le cas des jardins à plusieurs étages, ce contrôle est inhérent à la nature de la pratique. Pour des combinaisons de cultures, le contrôle dépend de la gestion, en particulier du maintien d'une couverture de litière.

Pratiques zonales. Pour la culture intercalaire avec haies (*cultures en couloirs, en allées, barrières de haies*), il existe des preuves indirectes substantielles, mais peu de preuves expérimentales, du contrôle potentiel de l'érosion par l'apport d'une couverture de litière sur les allées et par l'effet de barrière produit par les haies. Le contrôle efficace de l'érosion ne sera pas automatique, et variera en fonction des détails de la conception et des pratiques de gestion. Etant donné le potentiel apparemment élevé et le manque de données expérimentales, il est nécessaire et urgent de prendre des mesures suivies du taux d'érosion existant avec cette pratique.

La pratique des *ligneux sur structures anti-érosives* implique l'utilisation complémentaire de la composante ligneuse. Planter des arbres peut rendre productif le terrain occupé, aider à stabiliser les structures et, dans certains cas, augmenter leurs effets protecteurs. Cette pratique joue aussi un rôle psychologique et augmente les chances que ces structures soient perçues favorablement et donc, entretenuées. Ceci s'applique aux ligneux sur structures en talus et fossés, sur bandes enherbées et en terrasses.

Bien que nous n'en parlions pas dans le présent ouvrage, il convient de mentionner, par souci d'exactitude, le potentiel établi des *brise-vent* et des *rideaux abris* pour contrôler l'érosion éolienne

Pratiques sylvopastorales. Le contrôle de l'érosion sur les terres de pâturage repose essentiellement sur les pratiques établies de gestion des pâturages, notamment la limitation du nombre d'animaux et la rotation des pâturages. Les méthodes sylvopastorales seules ne suffisent probablement pas, mais elles peuvent jouer un rôle lorsqu'elles sont associées à d'autres mesures de gestion des pâturages. Elles présentent un potentiel particulier pour réduire la pression sur les pâturages grâce à l'apport de fourrage riche en protéines aux périodes de l'année où l'herbe est rare.

Foresterie de restauration et gestion des bassins versants. Il est possible de concilier les avantages connus de l'agroforesterie et de la *foresterie de restauration*. La période de restauration est suivie d'une utilisation productive contrôlée, en maintenant une partie du couvert ligneux pour poursuivre la conservation.

L'agroforesterie peut constituer un élément, à côté d'autres types importants d'utilisation des terres, de la *gestion intégrée des bassins versants*.

Troisième partie Agroforesterie et entretien de la fertilité du sol

Fertilité du sol et dégradation

La *fertilité du sol* est la capacité du sol de soutenir la croissance des plantes de manière durable, dans des conditions données de climat et d'autres propriétés pertinentes de la terre. Elle fait partie du concept plus large de productivité de la terre.

Le diagnostic du problème des faibles rendements des cultures doit distinguer la faible fertilité du sol, due aux conditions naturelles, du déclin de la fertilité du sol, amené par l'utilisation antérieure de la terre. Ces deux causes peuvent demander des actions de type différent.

Effets des ligneux sur les sols

Le lien entre les ligneux et la fertilité du sol est indiqué par la qualité élevée des sols sous forêt naturelle, par leur cycle nutritif relativement fermé, par le pouvoir de restauration des sols de la jachère ligneuse dans l'agriculture itinérante, et par le succès de la foresterie de restauration. La comparaison des propriétés des sols sous le couvert des arbres et en dehors de celui-ci apporte des preuves plus détaillées.

Les ligneux entretiennent ou améliorent le sol par divers processus:

- l'augmentation des apports de matière organique et d'éléments nutritifs au sol;
- la réduction des pertes de sol, provoquant ainsi un meilleur recyclage de la matière organique et des éléments nutritifs;
- l'amélioration des conditions physiques du sol;
- l'amélioration des conditions chimiques du sol;
- l'influence sur les processus et les conditions biologiques du sol.

Certains de ces processus sont démontrés, d'autres sont des hypothèses à vérifier (voir tableau 14, figure 7.)

Matière organique du sol

La matière organique du sol joue un rôle clé dans le maintien de la fertilité, en particulier (mais pas uniquement) dans des conditions à faible taux d'intrants. Elle a pour effet principal d'améliorer les conditions physiques du sol et de fournir une réserve d'éléments nutritifs, progressivement libérés par minéralisation.

Les résidus des plantes herbacées apportés au sol se décomposent rapidement au début, avec une demi-vie de moins de six mois dans les sols tropicaux. Les résidus ligneux se décomposent plus lentement. Pendant la décomposition, il se produit une perte de carbone et une libération d'éléments nutritifs. Les résidus deviennent matière organique ou humus. Il existe au moins deux fractions humiques, labile et stable. C'est surtout la fraction labile qui contribue à la libération d'éléments nutritifs et qui est directement affectée par la gestion. On ignore si les résidus ligneux confèrent des propriétés particulières à l'humus du sol.

En prenant comme base le cycle connu de la matière organique sous forêt naturelle et son déclin sous culture, il est possible de construire un cycle sous agroforesterie qui maintienne l'équilibre de la matière organique du sol. Les taux indiqués ci-dessous sont approximativement ceux de la production de biomasse épigée qui, si elle est retournée au sol, est supposée pouvoir maintenir la matière organique à des niveaux acceptables pour la fertilité:

tropiques humides 8000 kg MS/ha/an

tropiques subhumides 4000 kg MS/ha/an
 zone semi-aride 2000 kg MS/ha/an

La production primaire nette des communautés végétales naturelles est légèrement supérieure à ces valeurs, tandis que celle des ligneux utilisés en agroforesterie peut approcher, et occasionnellement dépasser celle de la végétation naturelle (voir tableau 20).

Dans les systèmes agroforestiers, les besoins de maintien de la matière organique du sol sont à coup sûr comblés si toute la biomasse des ligneux et les résidus des cultures sont ajoutés au sol. Si la partie ligneuse des arbres est enlevée, cela devient plus difficile, voire impossible si l'on enlève en plus le feuillage des ligneux et les résidus des cultures.

La vitesse de décomposition de la litière est influencée par sa qualité, ou sa teneur relative en sucres, en éléments nutritifs, en lignite et autres polyphénols. La vitesse de décomposition détermine le rythme de libération des éléments nutritifs. Il est souhaitable de synchroniser la libération des éléments nutritifs avec les besoins d'assimilation des plantes. Les systèmes agroforestiers permettent de manipuler ce processus, par la sélection des espèces ligneuses et par le choix du moment de l'émondage.

Eléments nutritifs des plantes

Les arbres et arbustes fixateurs d'azote introduits dans les systèmes agroforestiers sont capables de fixer de 50 à 100 kg N/ha/an. L'azote restitué dans la litière et les émondages peut atteindre 100 à 300 kg/ha/an, dérivés en partie du recyclage des engrains azotés (voir tableau 22).

Le second rôle important des ligneux consiste à améliorer l'efficacité du cycle des éléments nutritifs. Les mécanismes en jeu sont le prélèvement dans les horizons inférieurs du sol, la réduction de la perte par entraînement grâce aux systèmes racinaires des ligneux, un approvisionnement équilibré en éléments nutritifs, et l'amélioration du rapport entre les minéraux disponibles et ceux qui sont fixés. Pour une production de biomasse de feuillage ligneux de 4000 kg MS/ha/an, le retour potentiel d'éléments nutritifs dans la litière est de l'ordre, en kg/ha/an, de 80 à 120 pour l'azote, de 8 à 12 pour le phosphore, de 40 à 120 pour le potassium, et de 20 à 60 pour le calcium. Ces quantités sont considérablement supérieures aux besoins nutritifs des cultures (voir tableau 23; figure 12; figure 13).

L'importance accordée par la recherche à la fixation de l'azote a conduit à négliger relativement les effets des systèmes agroforestiers sur les autres éléments nutritifs et sur la capacité d'accroître le recyclage de tous les éléments nutritifs sous agroforesterie, par rapport à l'agriculture.

Autres propriétés et processus du sol

Il est abondamment prouvé que les ligneux, dans les systèmes agroforestiers, peuvent aider à entretenir les propriétés physiques du sol, ce qui est important pour la fertilité du sol.

La teneur en bases de la litière ligneuse peut aider à contrôler l'acidification, mais il est improbable qu'elle soit suffisante pour modérer d'une manière appréciable l'acidité des sols très acides, si ce n'est dans les systèmes qui utilisent la biomasse ligneuse accumulée depuis de nombreuses années.

Pour la coupe forestière, les méthodes manuelles ou qui font appel à des outils manuels laissent le sol en meilleure condition que l'abattage mécanique. L'efficacité des systèmes de rotation est nécessairement réduite par le brûlage, qui entraîne la perte de la plus grande partie du carbone, de l'azote et du soufre emmagasinés.

Comme le démontre la deuxième partie du présent ouvrage, l'agroforesterie offre un certain potentiel anti-érosif. Puisque le principal effet défavorable de l'érosion est la perte de matière organique et d'éléments nutritifs, le potentiel de contrôle de l'érosion constitue un moyen important de maintien de la fertilité du sol.

Rôle des racines

Depuis peu, on reconnaît de plus en plus l'importance des racines comme composante de la production primaire. La biomasse racinaire des ligneux représente typiquement 20 à 30% de la biomasse végétale totale (ou 25 à 40% de la biomasse épigée). Cependant, la production primaire nette des racines est de loin supérieure à la biomasse sur pied, grâce au renouvellement des radicelles. Les racines constituent une réserve appréciable d'éléments nutritifs et, puisqu'elles sont presque invariablement restituées au sol, elles sont souvent un élément important du recyclage des éléments nutritifs.

Les systèmes racinaires des ligneux et les mycorhizes associés améliorent l'efficacité du recyclage des éléments nutritifs, qui se définit comme le rapport entre ce qui est assimilé par les plantes et ce qui est perdu par entraînement et par érosion. Ils contribuent également aux propriétés physiques du sol.

La clé de l'utilisation des systèmes racinaires et mycorhiziens en agroforesterie est la maximisation de ces effets positifs tout en réduisant la compétition entre ligneux et cultures pour l'eau et les éléments nutritifs. La nécessité d'en savoir davantage sur la croissance et le fonctionnement des racines dans les systèmes agroforestiers est évidente.

Arbres et arbustes pour l'amélioration du sol

Les propriétés qui font qu'un ligneux est favorable à l'amélioration du sol et qui permettraient de le reconnaître comme tel ne sont pas clairement établies. Citons:

- une capacité élevée de fixation de l'azote;
- une production élevée de biomasse;
- un réseau dense de radicelles et de mycorhizes associés;
- des racines profondes;
- une teneur élevée et équilibrée en éléments nutritifs dans le feuillage;
- une teneur appréciable en éléments nutritifs dans les racines;
- soit une décomposition rapide de la litière, là où la libération d'éléments nutritifs est souhaitée, soit une vitesse modérée de décomposition, pour la protection contre l'érosion;
- l'absence de substances toxiques dans le feuillage et les exsudats des racines;
- une capacité de croissance sur sols pauvres pour la réhabilitation ou la restauration.

Cinquante-cinq espèces d'arbres et d'arbustes appartenant à trente-deux genres ont été identifiées comme ayant un potentiel de maintien ou d'amélioration de la fertilité du sol (tableau 27) Parmi les espèces au potentiel particulièrement élevé, on trouve:

- *Acacia albida*;
- *Acacia tortilis*;
- *Calliandra calothyrsus*;
- *Casuarina equisetifolia*;
- *Erythrina poeppigiana*;
- *Gliricidia sepium*;
- *Inga jinicuil*;
- *Leucaena leucocephala*;
- *Prosopis cineraria*;
- *Sesbania sesban*

Pratiques agroforestières pour la fertilité du sol

La plupart des systèmes agroforestiers indigènes signalés (autres que l'agriculture itinérante) ont une structure spatiale mixte, contrastant avec les systèmes zonaux, qui font l'objet de beaucoup de recherches. Dans la majorité des systèmes indigènes, le contrôle de l'érosion et l'entretien de la fertilité sont des fonctions avérées L'utilisation de sols pauvres et la réhabilitation des terres dégradées en sont d'autres (tableau 28).

Il n'existe un corpus substantiel de résultats de recherche sur le sol que pour l'agriculture itinérante et pour la combinaison de cultures de caféier ou de cacaoyer avec *Erythrina*, *Inga* et *Cordia*. Les données sur les systèmes de culture en couloirs avec haies proviennent essentiellement d'un site, à Ibadan au Nigeria, bien que d'autres études plus poussées soient en cours ou soient prévues. Les données pédologiques sur d'autres pratiques agroforestières sont rares.

Les résultats tirés des recherches pédologiques relatives aux pratiques agroforestières sont résumés ci-dessous.

Pratiques de rotation Pour l'agriculture itinérante reposant sur la jachère forestière naturelle, il n'y a pas moyen de contourner l'important besoin de terre exigé par le rapport entre jachère et cultures, nécessaire à la restauration de la fertilité du sol. Etant donné la pression démographique sur les terres, ce système autrefois stable n'est plus durable dans de nombreuses régions

On ignore le potentiel des jachères ligneuses améliorées, et plus généralement les effets relatifs sur le sol des combinaisons par rotation et des combinaisons spatiales de ligneux et de cultures.

Pratiques spatiales mixtes Les combinaisons de cultures de caféier ou de cacaoyer avec *Erythrina*, *Inga* ou *Cordia* se caractérisent par un important retour au sol de la matière organique et des éléments nutritifs, dans la litière et dans les émondages, ainsi que par un niveau modéré de fixation d'azote. Lorsque des engrains ont été appliqués, les éléments nutritifs de ceux-ci retournent également au sol, ce qui démontre l'efficacité du système en stimulant la récupération et le recyclage des éléments nutritifs.

Grâce au taux élevé de production de biomasse et au recyclage efficace des éléments nutritifs, les jardins ligneux multiétages, y compris les jardins de case, incarnent les conditions mêmes de la durabilité, en combinant une productivité élevée avec la conservation totale des ressources.

Pratiques zonales. La culture intercalaire avec haies (culture en couloirs) permet d'obtenir une grande production de biomasse des haies vives, de même que la fixation d'azote, et une importante restitution d'éléments nutritifs dans les émondages. On pourrait concevoir des systèmes dans lesquels les rendements des cultures par unité de surface totale sont plus élevés avec haies vives que dans des monocultures. La seule étude suivie du sol qui soit disponible fait état du maintien fructueux

de la fertilité du sol pendant six ans. Les racines sont probablement un facteur contribuant (voir tableau 32).

La seule présence d'une pratique agroforestière donnée n'est en aucune façon suffisante pour assurer le maintien de la fertilité du sol. D'autres facteurs sont tout aussi importants: (1) la conception du système en fonction des conditions environnementales et socioéconomiques locales; (2) la bonne gestion du système; (3) l'intégration de l'agroforesterie dans le système global d'exploitation.

Quatrième partie Agroforesterie pour la conservation du sol

Modélisation des changements du sol sous agroforesterie

Le modèle informatisé SCUAF (Soil Changes under Agroforestry) a été mis au point pour prédire les effets sur le sol de systèmes agroforestiers déterminés dans des environnements donnés C'est un modèle à intrants-extrants relativement simple, qui permet de prédire les changements en matière d'érosion, de la matière organique et des éléments nutritifs du sol Les figures 19 à 23 en illustrent les résultats Le modèle SCUAF peut être utilisé pour faciliter la conception des recherches agroforestières.

Besoin de recherche

Les pays moins développés des régions tropicales et subtropicales connaissent un problème croissant de déclin de la fertilité des sols. Ce déclin est causé à la fois par l'érosion et par d'autres processus de dégradation du sol. Les preuves indirectes, s'ajoutant aux quelques données expérimentales, indiquent que beaucoup de pratiques agroforestières permettent de contrôler l'érosion de même que les autres formes de dégradation du sol. La combinaison d'un potentiel apparemment élevé avec le manque de résultats expérimentaux souligne clairement et fortement le besoin de recherche.

La recherche agroforestière peut être menée à trois niveaux:

- "que se passe-t-il?" ou les essais de systèmes;
- "pourquoi cela se passe-t-il?" ou l'étude des composantes au sein des systèmes ou des interactions entre composantes, et
- "comment cela se passe-t-il?" ou l'étude des processus fondamentaux.

Les essais de systèmes (recherches sur le *quois*) pratiqués isolément ne suffisent pas pour faire avancer les connaissances, étant donné le grand nombre de variables et de conditions climatiques et pédologiques des sites. L'étude des composants des systèmes (recherches sur le *pourquoi*) conduit à la conception efficace de prototypes de systèmes, qui peuvent ensuite être testés avec une série limitée de variables. Une meilleure connaissance des processus fondamentaux aiderait à comprendre le fonctionnement des composantes des systèmes, leurs interactions, et par conséquent les systèmes eux-mêmes.

La recherche sur la conservation du sol au moyen de l'agroforesterie peut être envisagée sous deux angles: les études spécialisées et les aspects pédologiques de la recherche agroforestière en général. Nous avons énuméré des sujets de recherche pédologique spécialisée, et une série minimum d'observations pédologiques que nous suggérons d'inclure dans la recherche agroforestière générale. Un ensemble de dix hypothèses à vérifier par la recherche pédologique et agroforestière spécialisée est présenté.

Des exemples de conception de recherches sur le *pourquoi* ont été donnés, avec des notes sur les techniques expérimentales et les observations. Des études plus poussées sur les méthodes de recherche spécifiques aux problèmes de l'agroforesterie sont nécessaires.

Conclusion

L'hypothèse générale sur les sols et l'agroforesterie est la suivante:

les systèmes agroforestiers appropriés contrôlent l'érosion entretiennent la matière organique du sol et ses propriétés physiques et favorisent un recyclage efficace des éléments nutritifs du sol.

En conclusion, cette hypothèse est essentiellement exacte. L'agroforesterie offre un potentiel considérable pour la conservation du sol, tant par le contrôle de l'érosion que par d'autres moyens de maintien de la fertilité du sol. Ce potentiel concerne beaucoup de pratiques agroforestières et une grande diversité de zones climatiques et de types de sol (voir tableau 33).

Si cette conclusion est finalement confirmée par la recherche, l'agroforesterie pourra apporter une contribution majeure à la conservation du sol et à l'utilisation durable des terres.

Bibliographie

Abujamin, S. et Abujamin, S. 1985. Crop residue mulch for conserving soil in uplands. In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. Lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America: 607-614.

Adlard, P.G. et Johnson, J.A. 1983. *Annotated bibliography: biomass estimation nutrient cycling and organic matter relations in forest stands* Oxford: Commonwealth Forestry Institute, 220 p. non numérotées.

Agamuthu, P et Broughton, W J. 1985. Nutrient cycling within the developing oil palm legume system. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 13: 111-123,

- Agboola, A.G. 1982. Organic manuring and green manuring in tropical agricultural production systems. *Transactions of the twelfth International Congress of Soil Science*. 1: 198-222.
- Aggarwal, R.K. 1980. Physico-chemical status of soils under 'khejri' (*Prosopis cineraria* Linn.) In H.S. Saxena, ed. *Khejri (Prosopis cineraria) in the Indian deserts-its role in agroforestry*. Jodhpur, India: CAZRI: 32-37.
- Ahn, P.M. 1979. Optimum length of planned fallows. In H.O. Mongi et P.A. Huxley, ed. *Soils research in agroforestry* Nairobi: ICRAF: 15-40.
- Aina, P., Lal, R. et Taylor, G.S. 1979. Effects of vegetal cover on soil erosion on an alfisol. In R. Lal et D.J. Greenland, ed. *Soil physical properties and crop production in the tropics*. Chichester, United Kingdom: Wiley: 501-508.
- Ainslie, S.R. 1935. *Soil erosion in Nigeria*. Kaduna, Nigeria: Government Printer.
- Akbar, M.A. et Gupta, P.C. 1984. Nutrient composition of different cultivars of *Leucaena leucocephala*. *Leucaena research report*. 5: 14-17.
- Alpizar, L., Fassbender, H.W., Heuveldop, J., Fölster, H. et Enriquez, G. 1986. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. Part I. *Agroforestry Systems* 4: 175-190.
- Alpizar, L., Fassbender, H.W., Heuveldop, J., Fölster, H. et Enriquez, G. 1988. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. Part III. *Agroforestry systems*, 6: 37-62.
- Altieri, M.A., Trujillo, F.J. et Farrell, J. 1987. Plant-insect interactions and soils fertility relations in agroforestry systems: implications for the design of sustainable agroecosystems. In H.K. Gholz, ed. *Agroforestry: realities, possibilities and potentials* Dordrecht, Netherlands: Nijhoff et ICRAF: 89-108.
- ASA 1982. *Determinants of soil loss tolerance*. ASA Publication 45. Ankeny, Iowa, USA: ASA, 153 p.
- ASAE 1985 *Erosion and soil productivity*. St. Joseph, Michigan, USA: ASAE, 289 p.
- Anderson, J.M. et Ingram, J.S.I. (éd.) 1993 (2e éd.). *Tropical soil biology and fertility: a handbook*. Wallingford, UK: CAB International, 221 p.
- Andriesse, J.P., 1987. *Nutrient cycling in soils used for shifting cultivation under various climatic conditions in Asia: summary final report* Amsterdam: Royal Tropical Institute, 8 p.
- Andriesse, J. P. Koopmans, T.T. et Schelhaas, R M 1984. A monitoring study of nutrient cycles in soils used for shifting cultivation under various climatic conditions in tropical Asia: I. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 12: 1-16
- Andriesse, J.P., Koopmans, T.T. et Schelhaas, R.M. 1987. A monitoring study of nutrient cycles in soils used for shifting cultivation under various climatic conditions in tropical Asia: III. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 19: 285-332
- Andriesse, J.P. et Schelhaas, R.M. 1985. *Monitoring project of nutrient cycles in soils used for shifting cultivation under various climatic conditions in tropical Asia: progress report 3*. Amsterdam: Royal Tropical Institute, 58 p.
- Anger, G., Duvel, K.H., Ntwali, J.M.V. et Pioetrowicz, P. 1985. *L'arbre et la haie dans l'exploitation paysanne*. Fiche technique 3. Nyabisindu, Rwanda: Projet agro-pastoral de Nyabisindu, 91 p.
- Arias, H.A. 1988. *Tasa de descomposición y liberación de nutrientes en el follaje de ocho especies de interés agroforestal en la franja premontal de Colombia* MSc thesis, University of Costa Rica. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Aranguren, J., Escalente, G. et Herrera, R. 1982. Nitrogen cycle of tropical perennial crops under shade trees. I. Coffee. II. Cacao. *Plant and soil* 67: 247-269.
- Atkinson, D., Bhatt, K.K.S., Mason, P.A., Coutts, M P. et Read, D.J., ed. 1983. *Tree root systems and their mycorrhizas*. The Hague: Nijhoff, 525 p.
- Atta-Krah, A.N. et Sumberg, J.E. 1988. Studies with *Gliricidia sepium* for crop/livestock production systems in West Africa. *Agroforestry Systems* 6: 97-118.
- Babu, R., Tejwani, K.G., Agarwal, M.L. et Bhushan, L.S. 1978. Distribution of erosion index and iso-erodent map of India. *Indian Journal of Soil Conservation*, 6: 1-12
- Baggio, A. et Heuveldorp, J. 1984. Initial performance of *Calliandra calothyrsus* Meissn. in live fences for the production of biomass. *Agroforestry Systems*, 2: 19-29,
- Bahiru Duguma, Kang, B T et Okali, D.D.U. 1988. Effect of pruning intensities of three woody leguminous species grown in alley cropping with maize and cowpea on an alfisol, *Agroforestry Systems* 6: 19-35,
- Bartholemew, W.V. 1977. Soil nitrogen changes in farming systems in the humid tropics. In A. Ayanaba et P.J. Dent, ed. *Biological nitrogen fixation in farming systems of the humid tropics*. Chichester, UK: Wiley: 27-42,
- Bartholemew, W.V., Meyer, J. et Laudelot, H. 1953. *Mineral nutrient immobilization under forest and grass fallows in the Yangambi (Belgian Congo) region*. Publication INEAC Série Scientifique 57. Brussels: INEAC, 27 p.
- Bashir Jama, Amare Getahun, Ngugi, D. et Macklin, B. 1986. *Leucaena* alley cropping for the Kenya coast. In R.T. Prinsley et M.J. Swift, ed. *Amelioration of soil by trees: a review of current concepts and practices*, London: Commonwealth Science Council: 155-165.

- Baumer, M. 1983. *Notes on trees and shrubs in arid and semi-arid regions*. Emasar Phase II. Rome: FAO, 270 p.
- Baumer, M. 1984. Agroforesterie et aménagement du territoire. *Mondes et Cultures*, 44: 663-711.
- Bnnumer, M. 1987. *Agroforesterie et désertification*. Wageningen, Netherlands: Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale, 260 p.
- Baumer, M., Darnhofer, T. et Guandalino, S. 1991. Baobab Farm Ltd., ou "Que faire d'une carrière après exploitation?". *Bois et forêts des tropiques*, 226: 48-60.
- Baumer, M. et Rey, P.A. 1974. Pastoralisme, aménagement, cartographie de la végétation et développement intégral harmonisé dans les régions circum-sahariennes. Genève, Institut d'étude du développement, *Genève-Afrique, Acta africana* 13(1): 1-18.
- Beer, J. 1987. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. *Agroforestry Systems*, 5: 3-13.
- Belsky, A.J., Amundson, R.G., Duxbury, J.M., Riha, S.J., Ali, A.R., et Mwonga S.M., 1989. The effects of trees on their physical, chemical and biological environments in a semi-arid savanna in Kenya. *J. Applied Ecology*, 26: 1005-1024.
- Benge, M. 1979. *Use of Leucaena for soil erosion control and fertilization*. Washington DC: USAID.
- Bennema, J. et de Meester, T. 1981. The role of soil erosion and land degradation in the process of land evaluation. In R.P.C. Morgan, ed. *Soil conservation: problems and prospects*. Chichester, UK: Wiley: 77-86.
- Bernhard-Reversat, F. 1977. Recherches sur les variations stationnelles des cycles biogéochimiques en forêt ombrophile de Côte d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 15: 175-189.
- Bernhard-Reversat, F. 1982. Biogeochemical cycles of nitrogen in a semi-arid savanna. *Oikos*, 38: 321-332.
- Bernhard-Reversat, F. 1987. Les cycles des éléments minéraux dans un peuplement à *Acacia seyal* et leur modification en plantation d'*Eucalyptus* au Sénégal. *Acta Oecologica*, 8: 3-16.
- Bernhard-Reversat, F., Huttel, C. et Lemée, G. 1975. Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire. I-VII. *Terre et Vie*, 29: 169-264.
- Bhati, P.N. 1977. Losses of plant nutrients through erosion process-a review. *Soil Conservation Digest*, 5: 37-46.
- Bhardwaj, K.K.R. et Dev, S.P. 1985. Production and decomposition of *Sesbania cannabina* (Retz.) Pers. in relation to the effect on the yield of wetland rice. *Tropical Agriculture*, 62: 233-236.
- Biot, Y; 1986. *Modelling of the on-site effect of sheet and rill wash on the productivity of the land* Development Studies Discussion Paper 192. Norwich, UK: University of East Anglia, 23 p.
- Bishop, J.P. 1982. Agroforestry systems for the humid tropics east of the Andes. In S.B. Hecht, ed. *Amazonia: agriculture and land use research*. Cali, Colombia: CIAT: 403-416.
- Blakie, P. 1985. *The political economy of soil erosion in developing countries*. London: Longman, 188 p.
- Bojö, J. 1992. Cost-benefit analysis of soil and water conservation projects: a review of 20 empirical studies. In Kebede Tato and H. Hurni (ed.) *Soil conservation for survival*. Aukeny, Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society, 195-205.
- Bond, G. 1976. The results of the IBP survey of root-nodule formation in non-leguminous angiosperms. In P.S. Nutman, ed. *Symbiotic nitrogen fixation in plants*. London: Cambridge: 443-474.
- Bornemisza, E. 1982. Nitrogen cycling in coffee plantations. In G.B. Robertson, R. Herrea et T. Rosswall, ed. *Nitrogen cycling in ecosystems of Latin America and the Caribbean*. The Hague: Nijhoff: 241 -246.
- Borthakur, D.N. et al. 1979. *Agroforestry based farming system as an alternative to jhuming*. Shillong, India: ICAR Research Complex, 32 p.
- BOSTID 1984. *Leucaena: promising forage and tree crop for the tropics*. (2^e éd.) Washington DC: Bureau de la science et de la technologie pour le développement international, 100 p.
- Bowen, G.D. 1984. Three roots and the use of nutrients. In G.D. Bowen et E.K.S. Nambiar, ed. *Nutrition of plantation forests*. London: Academic Press: 147-179.
- Bowen, G.D. 1985. Roots as a component of tree productivity. In M.G.R. Cannell et J.E. Jackson, ed. *Attributes of trees as crop plants*. Abbots Ripton, UK: Institute of Terrestrial Ecology: 303-315.
- Brewbaker, J.L. 1986. Significant nitrogen fixing trees in agroforestry systems. In H.K. Ghosh, ed. *Agroforestry: realities, possibilities and potentials*. Dordrecht, Netherlands: Nijhoff et ICRAF: 31-45.
- Brewbaker, J.L. 1987. *Leucaena*: a multipurpose tree genus for tropical agroforestry? In H.A. Steppeler et P.K. Nair, ed. *Agroforestry: a decade of development*. Nairobi: ICRAF: 289-323.
- Brunig, E.F. et Sander, N. 1983. Ecosystem structure and functioning: some interactions of relevance to agroforestry. In P.A. Huxley, ed. *Plant research and agroforestry*. Nairobi: ICRAF: 1-21.

- Buck, M.G. 1986. Concepts of resource sharing in agroforestry systems. *Agroforestry systems*, 4: 191-203.
- Cannell, M.G.R. 1985. Dry matter partitioning in tree crops. In M.G.R. Cannell et J.E. Jackson, ed. *Attributes of trees as crop plants*. Abbots Ripton, UK: Institute of Terrestrial Ecology: 160-193.
- Cannell, M.G.R. et Jackson, J.E., ed. 1985. *Attributes of trees as crop plants*. Abbots Ripton, UK: Institute of Terrestrial Ecology: 592 p.
- Carlowitz, P.G., von. 1986a. *Multipurpose tree and shrub seed directory*. Nairobi: ICRAF, 265 p.
- Carlowitz, P.G., von. 1986b. Multipurpose tree yield data-their relevance to agroforestry research and development and the current state of knowledge. *Agroforestry Systems*, 4: 291-314.
- Carlowitz, P.G., von. 1986c *Recommendations for the design and establishment of demonstration trials at the Ethiopian Centre Community Forestry and Soil Conservation*. Nairobi: ICRAF, ICRAF Working Paper 41: 89 p.
- Caudle, N. et McCants, C.B., ed. 1987. *Tropsoils: technical report 1985-1986*. Raleigh, USA: North Carolina State University: 268 p.
- Celestino, A.F. 1984. *Establishment of ipil-ipil hedgerows for soil erosion and degradation control in hilly land*. FSSRI/PLB-CA monograph. Los Baños, Philippines: University of the Philippines.
- Celestino, A.F. 1985. Farming systems approach to soil erosion control and management. In E.T. Craswell, J.V. Remenyi et L.G. Nallana, ed. *Soil erosion management* ACIAR Proceedings Series 6. Canberra: Centre australien pour la recherche agricole internationale, 64-70.
- Cerri, C.E. Athie, D. et Sodrzesieski, D., ed. 1982. *Proceedings of the regional colloquium on soil organic matter studies*. São Paulo, Brazil: CENA/Promocet, 254 p.
- Chagas, J.M. 1983. Efeitos da leuacena e de abudacão NPK sobre a cultura do feijao no cerrado. *Revista ceres*. 30: 481-485.
- Charreau, C. 1975. Matière organique et propriétés biochimiques du sol de la zone tropicale sèche d'Afrique occidentale. *Bulletin pédologique de la FAO* n°27. Rome: FAO, 305-326, 38 réf.
- Charreau, C. et Fauck, R. 1970. Mise au point de l'utilisation agricole des sols de la région de Séfa (Casamance). *Agronomie Tropicale* 25: 151-191.
- Cheatle, R.J., Muraya, P. et Young, A. 1989. Modelling soil changes under agroforestry. In D.B. Thomas, E.K. Biamah, A.M. Kilewe, L. Lundgren et B.O. Mochoge, ed. *Soil and water conservation in Kenya*. Nairobi: University of Nairobi and SIDA: 254-271.
- Chidumayo, E.N. 1987. A shifting cultivation land use system under population pressure in Zambia. *Agroforestry Systems* 5: 15-25.
- Chijoke, E.O. 1982. Influences exercées par les essences à croissance rapide sur les sols des régions tropicales humides de plaine. Etudes FAO: Forêts 21. Rome: FAO, 111 p.
- Chin Saik Yoon et Toomey, G. 1986. *Paulownia: China's wonder tree*. IDRC Reports. April: 11 - 12.
- Christy, L.C. 1971. *Legislative principles of soil conservation*. FAO Soils Bulletin 15. Rome: FAO, 68 p.
- CIPEA 1986. Mycorrhizae: can Africa benefit? *Land and Water*. FAO AGLS Newsletter. 27:34.
- Clarkson, D.T. 1985. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 36: 77-105.
- Cochran, W.S. et Cox, G.M. 1957. *Experimental designs*. (2^e éd.) New York: Wiley, 617 p.
- Coleman, D.C. 1976. A review of root production processes and their influence on soil biota in terrestrial ecosystems. In J.M. Anderson et A. MacFadyen, ed. *The role of terrestrial and aquatic organisms in decomposition processes*. Oxford, UK: Blackwell: 417-434.
- Coleman, D.C. 1985. Through a ped darkly: an ecological assessment of root-soil-microbial-faunal interactions. In A.H. Fitter, ed. *Ecological interactions in the soil environment*. Oxford, UK: Blackwell: 1-21.
- Commonwealth Secretariat 1983. *Conservation farming in the Commonwealth*. London: Commonwealth Secretariat and Department of Agriculture, Sri Lanka, 140 p.
- Conex (Agritex) 1960. *Land use planning procedures*. Salisbury (Harare), Zimbabwe: Department of Conservation and Extension.
- Craswell, E.T., Remenyi, J.V. et Nallana, L.G, ed. 1985. *Soil erosion management* ACIAR Proceedings Series 6. Canberra: Centre australien pour la recherche agricole internationale, 132 p
- Crosson, P. 1985. Impact of erosion on land productivity and water quality in the United States. In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. Lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America, 217-236.

- CTFT 1979. *Conservation des sols au sud du Sahara.* (2^e éd.) Nogentsur-Marne, France: CTFT, 72 p.
- CTFT 1988. *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. (*synonyme: Acacia albida* (Del.): *monographie*). Nogent-sur-Marne: CTFT, 72 p.
- Cuenca, G., Aranguren, J. et Herrera, R. 1983. Root growth and litter decomposition in a coffee plantation under shade trees. In D. Atkinson, K.K.S. Bhatt, P.A. Mason, M.P. Coutts et D.J. Read, ed. *Tree root systems and their mycorrhizas*. The Hague: Nijhoff. 477486.
- Cunningham, R.K. 1963. The effect of clearing a tropical forest soil. *Journal of Soil Science* 14: 334-345.
- Curl, E.A. et Truelove, B. 1986. *The rhizosphere*. Berlin: Springer, 288 p.
- Dalal, R.C. 1982. Organic matter content in relation to the period of cultivation and crop yields in some subtropical soils. *Transactions of the Twelfth International Congress of Soil Science* 6: 59.
- Dalzell, H.W., Riddlestone, A.J., Gray, K.R. et Thurairajan, K. 1988. Aménagement du sol: production et usage du compost en milieu tropical et subtropical Bulletin pédologique de la FAO 56. Rome: FAO, 177 p.
- Dancette, C et Poulain, J.F 1969. Influence de l'*Acacia albida* sur les facteurs pédoclimatiques et les rendements des cultures Sols Africains, 13: 197-239.
- Das, D.C. 1980. Some aspects of shifting cultivation related to soil and water conservation. *Indian Journal of Soil Conservation* 8: 53-59
- de Boodt, M et Gabriels, D., ed. 1978. *Assessment of erosion*. Chichester, UK: Wiley, 563 p
- de la Rosa, J.M. n.d. *A study on the growth and yield of corn intercropped with varying population of giant ipil-ipil (Leucaena leucocephala) on a hillside*. B. Sc. thesis. Visayas, Philippines: Visayas State College of Agriculture, 53 p.
- Dent, D. et Young, A. 1981. *Soil survey and land evaluation*. London: Allen and Unwin, 278 p.
- Depommier, D. 1985. The role of the woody vegetation in soil conservation and rehabilitation. In E. Biamah, ed. *Proceedings of a Soil Conservation Workshop on Grazing Lands*. Nairobi: Ministry of Agriculture and Livestock Development, 82-118.
- Dijkman, M.J. 1950. *Leucaena - a promising soil erosion control plant*. *Economic Botany*, 4: 337-347.
- Dommergues, Y.R. 1987. The role of biological nitrogen fixation in agroforestry. In H.A. Steppeler et P.K.R. Nair, ed. *Agroforestry: a decade of development*. Nairobi: ICRAF, 245-271.
- Douglas, M.G. 1988. Integrating conservation into farming systems: experiences from Malawi. In W.C. Moldenhauer et N.W. Hudson, ed. *Conservation farming on steep lands*. Ankeny, Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society, 215-227.
- Dregne, H.E. 1987. Soil erosion: cause and effect. *Land Use Policy* 4: 412-418.
- Dudal, R. 1986. Fertilizer management in the tropics. *Land and Water*: FAO AGLS Newsletter. 25: 28-33.
- Dumsday, R.G. et Flinn, J.C. 1977. Evaluating systems of soil conservation through bioeconomic modelling. In D.J. Greenland et R. Lal, ed. *Soil conservation and management in the humid tropics*. Chichester, UK: Wiley, 127-139.
- Dunne, T., Dietrich, W.E. et Brunego, M.J. 1978. Recent and past erosion rates in semi-arid Kenya. *Zeitschrift für Geomorphologie*. Supplementband. 29: 130- 140.
- EDI 1987. *Agroforestry in Kenya*. Washington, DC: Economic Development Institute, 50 p.
- El-Swaify, S.A., Lo, A., Joy, R., Shimshiro, L. et Yost, R.S. 1988. Achieving conservation-effectiveness in the tropics using legume intercrops. *Soil Technology*, 1: 1 - 12.
- El-Swaify, S.A., Moldenhauer, W.C. et Lo, A., ed. 1985. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America, 793 p.
- El-Swaify, S.A., Walker, T.S. et Virmani, S.M. 1984. *Dryland management alternatives and research needs for alfisols in the semi-arid tropics*. Hyderabad, India: ICRISAT, 38 p.
- Elwell, H.A. 1980. *Design of safe rotational systems*. Salisbury (Harare), Zimbabwe: Conex (Agritex), 50 p.
- Elwell, H.A. 1981. A soil loss estimation model for southern Africa. In R.P.C. Morgan, ed. *Soil conservation: problems and prospects*. Chichester, UK: Wiley: 281-292.
- Elwell, H.A. et Stocking, M.A. 1976. Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia. *Geoderma* 15: 61 -70.

- Eslava, F.M. non publié. *The Naaland style of upland farming in Naga, Cebu, Philippines: a case of an indigenous agroforestry scheme*. Article présenté au 3^e cours d'agroforesterie ICRAF/USAID. Serdang, Selangor, Malaysia, Oct. 1984.
- Ewel, J., Benedict, F., Berish, C., Brown, B., Gliessman, S., Amador, M., Bermudez, R., Martinez, A., Miranda, R. et Price, N. 1982. Leaf area, light transmission, roots and leaf damage in nine tropical plant communities. *Agroecosystems*, 7:305-326.
- FAO 1965. *Soil erosion by water: some measures for its control on cultivated lands*. FAO Agriculture Development Paper 81. Rome: FAO, 284 p.
- FAO 1974. L'agriculture itinérante et la conservation des sols en Afrique. Bulletin pédologique de la FAO 24. Rome: FAO, 220 p.
- FAO 1976a. *Cadre pour l'évaluation des sols*. Bulletin pédologique de la FAO 32. Rome: FAO, 72 p.
- FAO 1976b. *Conservation in arid and semi-arid zones*. FAO Conservation Guide 3. Rome: FAO, 125 p.
- FAO 1978. *Report on the FAO/UNEP expert consultation on methodology for assessing soil degradation*. Rome: FAO, 70 p.
- FAO 1979. Méthode provisoire pour l'évaluation de la dégradation des sols. Rome: FAO, 84 p.
- FAO 1982. World soil charter. *Bulletin of the International Society of Soil Science*. 62: 30-37.
- FAO 1983. Directives: évaluation des terres pour l'agriculture pluviale. Bulletin pédologique de la FAO 52. Rome: FAO, 237 p.
- FAO 1984. *Land evaluation for forestry*. FAO Forestry Paper 48. Rome: FAO, 123 p.
- FAO 1985. La conservation et l'aménagement des sols dans les pays en développement. Bulletin pédologique de la FAO 33. Rome: FAO, 98 p.
- FAO 1986. *Brise-vents et rideaux abris avec référence particulière aux zones sèches*. Cahiers FAO: conservation 15. Rome: FAO, 385 p.
- FAO 1989. FAO/UNESCO Carte mondiale des sols. Légende révisée. Rapport sur les ressources en sols du monde 60. Rome: FAO, 125 p.
- FAO/UNESCO 1974. FAO/UNESCO Carte mondiale des sols. Légende. Volume I. Paris: UNESCO, 59 p.
- Felker, P. 1978. *State of the art: Acacia Albida as a complementary permanent intercrop with annual crops*. Report to USAID. Riverside, California, USA: University of California, 133 p.
- Felker, P., Cannel, G.H., Clark, P.R., Osborn, J.F. et Nash, P. 1983. Biomass production of *Prosopis* species (mesquite), *Lensaena*, and other leguminous trees grown under heat/drought stress. *Forestry Science* 29: 592-606.
- Fernandes, E.C.M. et Nair, P.K.R. 1986. An evaluation of the structure and function of tropical home gardens. *Agroforestry Systems*, 21: 279-310.
- Fitter, A.H., ed. 1985. *Ecological interactions in the soil environment*. Oxford, UK: Blackwell, 400 p.
- Flach, K.W. 1986. Modelling of soil productivity and related land classification. In W. Siderius, ed. *Land evaluation for land-use planning and conservation in sloping areas*. ILRI Publication 40. Wageningen, Netherlands: ILRI: 196-205.
- Fogel, R. 1980. Mycorrhizae and nutrient cycling in natural forest ecosystems. *New Phytologist*, 63: 199-212.
- Fogel, R. 1985. Roots as primary producers in below-ground ecosystems. In A.H. Fitter, ed. *Ecological interactions in soil*. Oxford, UK: Blackwell: 23-36.
- Follet, R.F. et Stewart, B.A., ed. 1985. *Soil erosion and crop productivity*. Madison, Wisconsin, USA: ASA, 533 p.
- Fonzen, P.F. et Oberholzer, E. 1984. Use of multipurpose trees in hill farming systems in western Nepal. *Agroforestry Systems*, 2: 187- 197.
- Ford, G.W. et Greenland, D.J. 1968. The dynamics of partly humified organic matter in some arable soils. *Transactions of the Ninth International Congress of Soil Science*. 2: 403-410.
- Ford, G.W., Greenland, D.J. et Oades, J.M. 1969. Separation of the light fraction from soils by ultrasonic dispersion in halogenated hydrocarbons containing a surfactant. *Journal of Soil Science* 20: 291 -296.
- Foster, G.R. 1988. Modelling soil erosion and sediment yield. In R. Lal, ed. *Soil erosion research methods*. Ankeny, Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society: 97-117.
- Fox, R.L., Yost, R.S., Sandy, N.A. et Kang, B.T. 1985. Nutritional complexities associated with pH variables in tropical soils. *Soil Science Society of America Journal* 49: 1475-1480.

- Frissel, M.J., ed. 1977. Cycling of mineral nutrients in agricultural ecosystems. *Agroecosystems*, 4: 1 -354.
- Frost, P.G.H. 1985. Organic matter and nutrient dynamics in a broad leaved African savanna. In J.C. Tothill et J.J. Mott, ed. *Ecology and management of the world's savannas*. Farham Royal, UK: CAB International: 200-205.
- George, M. 1982. Litter production and nutrient return in *Eucalyptus* hybrid plantations. *Indian Forestry*; 108: 253-260.
- Ghai, S.K., Rao, D.L.N. et Batra, L. 1985. Comparative study of the potential of sesbanias for green manuring. *Tropical Agriculture* 62: 52-56.
- Gholz, H.L., ed. 1987. *Agroforestry: realities possibilities and potentials*. Dordrecht, Netherlands: Nijhof/ICRAF, 227 p.
- Gibson, A.H., Dreyfus, B.L. et Dommergues, Y.R. 1982. Nitrogen fixation by legumes. In Y.R. Dommergues et H.G. Diem, ed. *Microbiology of tropical soils and plant productivity*. The Hague: Nijhoff: 37-73.
- Gill, H.S. et Abrol, I.P. 1986. Salt affected soils and their amelioration through afforestation. In R.T. Prinsley et M.J. Swift, ed. *Amelioration of soil by trees: a review of current concepts and practices*. London: Commonwealth Science Council: 43-56.
- Gillespie, A.R. 1989. Modelling nutrient flux and interspecies root competition in agroforestry interplantings. *Agroforestry systems*, 8: 257-265.
- Gliessman, S.R., Lambert, J.D.H., Armason, J.T. et Sanchez, P.A. 1982. Report of the work group shifting cultivation and traditional agriculture. In G.P. Robertson, R. Herrera et T. Rosswall, ed. *Nitrogen cycling in ecosystems of Latin America and the Caribbean*. The Hague: Nijhoff: 389-394.
- Glover, N. et Beer, J. 1986. Nutrient cycling in two traditional Central American agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 4: 77-87.
- Golley, F.B., McGinnis, J.T., Clements, R.G., Child, G.I. et Duever, M.J. 1975. *Mineral cycling in a tropical moist forest ecosystem*. Athens, Georgia, USA: Université de Géorgie, 248 p.
- Gonzalez, A.M.A. et Sauerbeck, D.R. 1982. Decomposition of 14-C-labbered plant residues in different soils and climates of Costa Rica. In C.E. Cerri, D. Athie et D. Sodrzejesh, ed. *Proceedings of the regional colloquium on soil organic matter studies*. São Paulo, Brésil, CENA/PROMOCET, 141-146.
- Gourou, P. 1948. *Les pays tropicaux*. Paris: Presses universitaires, 157 p.
- Greenland, D.J. 1985. Nitrogen and food production in the tropics: contributions from fertilizer nitrogen and biological nitrogen fixation. In B.T. Kang et J. van der Heide, ed. *Nitrogen management and farming systems in humid and subhumid tropics*. Haren, Netherlands: Institute of Soil Fertility, 9-38.
- Greenland, D.J. et Lal, R., ed. 1977. *Soil conservation and management in the humid tropics*. Chichester, UK: Wiley, 283 p.
- Greenland, D.J. et Nye, P.H. 1959. Increases in the carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. *Journal of Soil Science*. 10: 284-299.
- Grewal, S.S. et Abrol, I.P. 1986. Agroforestry on alkali soils: effects of some management practices on initial growth, biomass accumulation and chemical composition of selected tree species. *Agroforestry Systems* 4: 221 -232.
- GTZ 1983. *Projet agro-pastoral de Nyabisindu*. Nyabisindu, Rwanda: Association allemande pour la coopération technique, 28 p.
- Gurumurti, K., Katuri, D.P. et Bhandari, H.C.S. 1984. Biomass production in energy plantations of *Prosopis juliflora*. *Indian Forestry*, 110: 879-894.
- Habte, M. et El-Swaify, S.A. 1986. Simulated erosion's effects on N₂ fixation and growth of *Sesbania*. *Nitrogen-Fixing Tree Association Research Report* 4: 64-65.
- Halliday, J. 1984. Register of nodulation reports for leguminous trees and other arboreal genera with nitrogen-fixing trees. *Nitrogen-Fixing Tree Association Research Report*, 4: 3845.
- Hailey, Lord 1938. *An African survey*. London: Oxford University Press, 1837 p.
- Hamilton, L.S. et King, P.N. 1983. *Tropical forested watersheds: hydrological and soils response to major uses or conversions*. Boulder, Colorado, USA: Westview Press, 168 p.
- Handawela, J. 1986. Effect of trees on upland annual agriculture in the low country dry zone of Sri Lanka. In R.T. Prinsley et M.J. Swift, ed. *Amelioration of soil by trees: a review of current concepts and practices*. London: Commonwealth Science Council, 145-154.
- Hardy, F. 1942. Soil erosion in Trinidad and Tobago. *Tropical Agriculture* 29: 29-35.
- Harrison-Murray, R.S. et Lal, R. 1979. High soil temperatures and the response of maize to mulching in the lowland humid tropics. In R. Lal et D.J. Greenland, ed. *Soil physical properties and crop production in the tropics*. Chichester, UK: Wiley: 285-304.

- Helal, H.M. et Sauerbeck, D.R. 1983. Method to study turnover processes in soil layers of different proximity to roots. *Soil Biology and Biochemistry* 15: 223-226.
- Hecht, S.B. 1982a. *Amazonia: agriculture and land use research*, Cali, Colombia: CIAT, 428 p.
- Hecht, S.B. 1982b. Agroforestry in the Amazon basin: practice, theory and limits of a promising land use. In S-B. Hecht, ed. *Amazonia: agriculture and land use research*. Cali, Colombia: CIAT: 331-372.
- Hermann, R.K. 1977. Growth and production of tree roots: a review. In J.K. Marshall, ed. *The below-ground ecosystem: a synthesis of plant-associated processes*. Range Science Department Scientific Series 26. Fort Collins, Colorado, USA: Colorado State University: 7-28.
- Heusch, B. 1986. Cinquante ans de banquettes de D.R.S.-C.E.S. en Afrique du Nord: un bilan. *Cahier ORSTOM. Série Pédologie*, 22: 153-162,
- Higgins, G.M. et Kassam, A.H. 1981. Relating potential productivity to soil loss. *Land and Water*, FAO AGLS Newsletter, 9: 21-25.
- Huck, M.G. 1983. Root distribution, growth, and activity with reference to agroforestry. In P.A. Huxley, ed. *Plant research and agroforestry*. Nairobi: ICRAF: 527-542.
- Hudson, N. 1981. *Soil conservation*. (2^e éd.) London: Batsford, 324p.
- Hudson, N.W. 1983. Soil conservation strategies in the third world. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38: 446-450.
- Hudson, N.W. 1988a. New ideas on soil conservation strategies. *IBSRAM Newsletter*, 7: 6.
- Hudson, N.W. 1988b. *Soil conservation strategies for the future*. S. Rimwanich, ed. *Land conservation for future generations: proceedings of the Fifth International Soil Conservation Conference*. Bangkok, Ministry of Agriculture and Cooperatives: 117-130.
- Hudson, N.W. 1990. Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. *Bulletin pédologique de la FAO* 57. Rome: FAO, 182 p.
- Hulugalle, N.R. et Lal, R. 1986. Root growth of maize in a compacted gravelly tropical alfisol as affected by rotation with a woody perennial. *Field Crops Research*, 13: 33-44.
- Hurni, H. et Nuntapong, S. 1983. Agroforestry improvements for shifting cultivation systems: soil conservation research in Northern Thailand. *Mountain Research and Development*, 3: 338-345.
- Huttel, C. 1975. Root distribution and biomass in three Ivory Coast rain forest plots. In F.B. Golley et E. Medina, ed. *Tropical ecological systems. trends in terrestrial and aquatic research*. Heidelberg, Germany: Springer: 123-130.
- Huxley, P.A., ed. 1983. *Plant research and agroforestry*. Nairobi: ICRAF, 617 p.
- Huxley, P.A. 1985. The basis of selection, management and evaluation of multipurpose trees-an overview; In M.G.R. Cannell et J.E. Jackson, ed. *Attributes of trees as crop plants*. Abbots Ripton, UK: Institute of Terrestrial Ecology: 13-35.
- Huxley, P.A. 1986a. Simplifying experimental agroforestry. *ICRAF Newsletter*, 16: 1-2.
- Huxley, P.A. 1986b. *Rationalizing research on hedgerow intercropping-an overview*. ICRAF Working Paper 40. Nairobi: ICRAF, 151 p.
- Huxley, P.A. et Wood, P.J. 1984. *Technology and research considerations in ICRAF's "diagnosis and design" procedures*. ICRAF Working Paper 26. Nairobi: ICRAF, 49 p.
- Huxley, P.A., Pinney, A. et Gatama, D. 1989. *Development of agroforestry, research methodology aimed at simplifying the study of potential tree/crop mixtures (tree/crop interface project)*. Final report. Nairobi: ICRAF, 140p.
- IAEA 1977. *Soil organic matter studies*. Volumes I and II. Vienna: IAEA, 812 p.
- Idessa, J., Ganry, F. et Gerdat, J. 1985. Nitrogen balance in some tropical agrosystems. In B.T. Kang et J. van der Heide, ed. *Nitrogen management and farming systems in humid and subhumid tropics*. Haren, Netherlands: Institute of Soil Fertility: 247-268.
- IITA 1983. Potential of *Sesbania rostrata* as a nitrogen source in alley cropping. *IITA/Research Highlights*. Ibadan, Nigeria: IITA: 28-29.
- Imbach, A.C., Fassbender, H.W., Borel, R., Beer, J. et Bonneman, A. 1989. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma Cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and with poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs and leaching. *Agroforestry Systems*, 8(3): 267-287.
- Ingram, J.A. et Swift, M.J. 1990. *Sustainability of cereal-legume intercrops in relation to management of soil organic matter and nutrient cycling*. University of Zimbabwe, Harare (Zimbabwe); proceedings of the Workshop on Research Methods for Cereal/Legume Intercropping in Eastern and Southern Africa, Lilongwe (Malawi), 23-27 janvier 1989. CIMMYT, 200-214.

- IRRI 1984. *Organic matter and rice*. Los Baños, Philippines: IRRI, 631 p.
- Jacks, G.V. et Whyte, R.O. 1939. *The rape of the earth a world survey of soil erosion*. London: Faber, 313 p.
- Jenkinson, D.S. 1977. Studies on the decomposition of plant material in soil. V. The effects of plants cover and soil type on the loss of carbon from 14-C labelled ryegrass decomposing under field conditions. *Journal of Soil Science* 28: 424-434.
- Jenkinson, D.S. et Ayanaba, A. 1977. Decomposition of carbon-14 labelled plant material under tropical conditions. *Soil Science Society of America Journal* 41: 912-915.
- Jenkinson, D.S. et Rayner, J.H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*. 123: 298-305.
- Jensen, A.M. 1983. *Shelterbelt effects in tropical and temperate zones*. IDRC-MR80e. Ottawa: IDRC, 61 p.
- Jimenez, A.E. et Martinez, V.P. 1979. Estudios ecológicos del agrosistema cafetalero. II. Producción de materia orgánica en diferentes tipos de estructura. *Biotica* 4: 109- 126.
- Joffre, R., Vacher, J., de los Llanos, C. et Long, G. 1988. The dehesa: an agrosilvopastoral system of the mediterranean region with special reference to the Sierra Morena area of Spain. *Agroforestry Systems* 6: 71-96.
- Johnston, A.E. 1986. Soil organic matter, effects on soil and crops. *Soil Use and Management* 2: 97-105.
- Jones, M.J. et Wild, A. 1975. *Soils of the West African Savanna*. Commonwealth Bureau of Soils Technical Communication 55. Farnham Royal, UK: CAB International, 246 p.
- Jonsson, K., Fidjeland, L., Maghembe, J.A. et Högberg, P. 1988. The vertical distribution of fine roots of five tree species and maize in Morogoro, Tanzania. *Agroforestry Systems* 6: 63-70.
- Jordan, C.F. 1982. The nutrient balance of an Amazonian rain forest. *Ecology* 63: 647-654.
- Jordan, C.F. et Escalante, G. 1980. Root productivity in an Amazonian rain forest. *Ecology* 61: 14-18.
- Jordan, C., Caskey, W., Escalante, G., Herrera, R., Montagnini, F., Todd, R. et Uhl, C. 1982. The nitrogen cycle in a "Terra Firme" rainforest on oxisol in the Amazon territory of Venezuela. In G.P. Robertson, R. Herrera et T. Rosswall, ed. *Nitrogen cycling in ecosystems of Latin America and the Caribbean*. The Hague: Nijhoff, 325-332.
- Jordan, C., Caskey, W., Escalante, G., Herrera, R., Montagnini, F., Todd, R. et Uhl, C. 1983. Nitrogen dynamics during conversion of primary Amazonian rain forest to slash and burn agriculture. *Oikos* 40: 131-139.
- Jurion, F. et Henry, J. 1969. *Can primitive farming be modernized?*. Brussels: INEAC, 457 p.
- Kang, B.T. et Juo, A.S.R. 1986. Effect of forest clearing on soil chemical properties and crop performance. In R. Lal, P. A. Sanchez et R.W. Cummings Jr, ed. *Land clearing and development in the tropics*. Rotterdam, Netherlands: Balkema, 383-394.
- Kang, B.T. et Bahiru Duguma 1985. Nitrogen management in alley cropping systems. In B.T. Kang et J. van der Heide, ed. *Nitrogen management and farming systems in humid and subhumid tropics*. Haren, Netherlands: Institute of Soil fertility: 269-284.
- Kang, B.T., Grimme, H. et Lawson, T.L. 1985. Alley cropping sequentially cropped maize and cowpea with *Leucaena* on a sandy soil in southern Nigeria. *Plant and Soil* 85: 267-277.
- Kang, B.T. et van der Heide, J., ed. 1985. *Nitrogen management in farming systems in humid and subhumid tropics*. Haren, Netherlands: Institute of Soil Fertility, 361 p.
- Kang, B.T., Wilson, G.F. et Lawson, T.L. 1984. *Alley cropping: a stable alternative to shifting cultivation*. Ibadan, Nigeria: IITA, 22 p.
- Kang, B.T., Wilson, G.F. et Sipkens, L. 1981. Alley cropping maize (*Zea mays* L.) and leucaena (*Leucaena leucocephala* LAM) in Southern Nigeria. *Plant and Soil* 63: 165-179.
- Kawahara, T., Kanazawa, Y. et Sakurai, S. 1981. Biomass and net production of man-made forest in the Philippines. *Journal of the Japan Forestry, Society* 63: 320-327.
- Kellman, M.C. 1969. Some environmental components of shifting cultivation in upland Mindanao. *Journal of Tropical Geography* 28: 40-56.
- Kellman, M. 1980. Soil enrichment by neotropical savanna trees. *Journal of Ecology*, 67: 565-577.
- Kirkby, M.J. et Morgan, R.P.C., ed. 1980. *Soil erosion*. Chichester, UK: Wiley, 312 p.
- Kirmse, R.D. et Norton, B.E. 1984. The potential of *Acacia albida* for desertification control and increased productivity in Chad. *Biological Conservation* 29: 121-141.

- Klinge, H., Rodrigues, W.A., Brunig, E. et Fittkau, E.J. 1975. Biomass and structure of a central American rain forest. In F.B. Golley et E. Medina, ed. *Tropical ecological systems: trends in terrestrial and aquatic research*. Heidelberg, Germany: Springer, 115-122.
- Klingebiel, L.A.A. et Montgomery, P.H. 1961. *Land capability classification*. USDA Handbook 210. Washington, D.C.: USDA, 21 p.
- Knisel, W.G., ed. 1980. *CREAMS: a field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems*. USDA Soil Conservation Research Report 26. Washington, D.C.: USDA, 643 p.
- Koopmans, T.T. et Andriesse, J.P. 1982. *Monitoring project of nutrient cycling in shifting cultivation. Progress report 1: baseline study*. Amsterdam: Royal Tropical Institute, 74 p.
- Kussow, W., El-Swaify, S.A. et Mannerling, J., ed. 1982. *Soil erosion and conservation in the tropics*. ASA Special Publication 43. Madison, Wisconsin, USA: ASA, 149 p.
- Kyuma, K., Tulaphitak, T. et Pairintra, C. 1985. Changes in soil fertility and tilth under shifting cultivation: I-III. *Soil and Plant Nutrition*, 31: 227-261.
- Ladd, J.N. et Amato, M. 1985. Nitrogen cycling in legume-cereal rotations. In B.T. Kang et J. van der Heide, ed. *Nitrogen management and farming systems in humid and subhumid tropics*. Haren, Netherlands: Institute of Soil Fertility, 105-127.
- Lal, R. 1976a. *Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria and their control*. IITA Monograph I. Ibadan, Nigeria: IITA, 118 p.
- Lal, R. 1976b. Soil erosion on alfisol in Western Nigeria. *Geoderma* 16: 363-431.
- Lal, R. 1977a. Soil-conserving versus soil-degrading crops and soil management for erosion control. In D.J. Greenland et R. Lal, ed. *Soil conservation and management in the humid tropics*. Chichester, UK: Wiley, 81-86.
- Lal, R. 1977b. Soil management systems and erosion control. In D.J. Greenland et R. Lal, ed. *Soil conservation and management in the humid tropics*. Chichester, UK: Wiley, 93-97.
- Lal, R. 1980. Losses of plant nutrients in runoff and eroded soil. In T. Rosswall, ed. *Nitrogen cycling in West African ecosystems*. Stockholm: Royal Swedish Academy et SCOPE: 31 -38.
- Lal, R. 1983. *Soil erosion in the humid tropics with particular reference to agricultural land development and soil management*. IAHS Publication 140. Wallingford, UK: Association Internationale des Sciences Hydrologiques: 221 -239.
- Lal, R. 1984. Soil erosion from tropical arable lands and its control. *Advances in Agronomy* 37: 183-248.
- Lal, R. 1985. Soil erosion and its relation to productivity in tropical soils. In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. Lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America, 237-247.
- Lal, R. (éd.) 1987. *Tropical land clearing for sustainable agriculture*. IBSRAM Proceedings 3. Bangkok, IBSRAM, 226 p.
- Lal, R. 1988a. *Soil erosion research methods*. Ankeny, Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society, 244 p.
- Lal, R. 1988b. *Soil erosion control with alley cropping*. In S. Rimwanich, ed. *Land conservation for future generations: proceedings of the fifth International Soil Conservation Conference*. Bangkok, Ministry of Agriculture and Cooperatives: 237-246.
- Lal, R. et Greenland, D.J. 1979. Management of organic matter in soils of the tropics and sub-tropics. *Transactions of the Twelfth International Congress of Soil Science*. 1: 152-178.
- Lal, R. et Kang, B.T. 1982. Management of organic matter in soils of the tropics and sub-tropics. *Transactions of the Twelfth International Congress of Soil Science*, 1: 152-178.
- Lal, R., Sanchez, P.A. et Cummings, R.W., ed. 1986. *Land cleaning and development in the tropics*. Rotterdam, Netherlands: Balkema, 462 p.
- Lamotte, M. 1975. The structure and function of a tropical savannah ecosystem. In F.B. Golley et E. Medina, ed. *Tropical ecological systems: trends in terrestrial and aquatic research*. Heidelberg, Germany: Springer: 179-222.
- Larson, W.E., Pierce, F.J. et Dowdy, R.H. 1985. Loss in long-term productivity from soil erosion in the United States. In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. Lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America, 262-271.
- LaRue, T.A. et Patterson, T.G. 1981. How much nitrogen do legumes fix? *Advances of Agronomy*, 34: 15-38.
- Lathwell, D.J. et Bouldin, D.R. 1981. Soil organic matter and nitrogen behaviour in cropped soils. *Tropical Agriculture*, 58: 341-348.
- Leakey, D.G.B. 1949. Changes in systems of cultivation aimed at limiting soil degradation by development of the cultivation of perennial tree crops in the Central Province of Kenya Colony. *Bulletin Agricole du Congo Belge*, 40: 2164-2172.
- Leblond, B. et Guerin, L. 1983. *Soil conservation: project design and implementation using labour-intensive techniques*. Geneva: ILO, 206 p.

- Lelong, F., Roose, E., Aubert, G., Fauck, R. et Pedro, G. 1984. Géodynamique actuelle de différents sols à végétation naturelle ou cultivés d'Afrique de l'Ouest. *Catena*, 11: 343-376.
- Lewis, L.A. 1987. Predicting soil loss in Rwanda. In K.J. Beek, P.A. Burrough et D.E.M. McCormack, ed. *Quantified land evaluation procedures*. ITC Publication 6. Enschede, Netherlands: ITC, 137- 139.
- Librero, A.R. 1985. Socioeconomic considerations in a soil erosion management program: case study of two provinces in the Philippines. In E.T. Craswell, J.V. Remenyi et L.G. Nallana, ed. *Soil erosion management*. ACIAR Proceedings Series 6. Canberra: Centre australien pour la recherche agricole internationale, 90-101.
- Lieth, H. 1976. Biological productivity of tropical lands. *Unasylva*, 28: 24-31.
- Lieth, H. et Whittaker, R.H., ed. 1975. *The primary productivity of the biosphere*. New York: Springer, 399 p.
- Lim, M.T. 1985. *Biomass and biomass relationship of 3.5 year-old open-grown Acacia mangium*. Occasional paper 2. Serdang, Malaysia: Faculty of Forestry, University Pertanian Malaysia, 13 p.
- Lim Kim Huan, 1988. *Soil erosion control with alley cropping*. In S. Rimwanich, ed. *Land conservation for future generations: proceedings of the Fifth International Soil Conservation Conference*. Bangkok, Ministry of Agriculture and Cooperatives, 237-246.
- Lipman, E. 1986. *Etat de la recherche agroforestière au Rwanda*. Ruhande, Rwanda: Institut des Sciences Agronomiques du Rwanda, Département de Foresterie, 144 p.
- Lo, A., El-Swaify, S.A., Dangler, E.W. et Shinshiru, L. 1985. Effectiveness of E130 as an erosivity index in Hawaii. In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. Lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America, 384-392.
- Loué, A. sans date. *Influence de l'arbre d'ombrage sur la nutrition du cafier*. Contribution 10. Bingerville, Côte d'Ivoire. Laboratoire de Chimie du Centre de Recherche Agronomique de Bingerville, 255-259.
- Luchok, J., Cawthorn, J.W. et Breslin, M.J., ed. 1976. *Hill lands: proceedings of an international symposium*. Morgantown, West Virginia, USA: University of West Virginia, 770 p.
- Lulandala, L.L.L. et Hall, J.B. 1991. *Leucaena leucocephala: potential role in rural development*. Nairobi: ICRAF, Working Paper 65, VII + 70 p.
- Lundgren, B. 1978. *Soil conditions and nutrient cycling under natural and plantation forests in Tanzanian highlands*. Report on Forest Ecology and Forest Soils 31. Uppsala, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, 429 p.
- Lundgren, L. 1980. Comparison of surface runoff and soil loss from runoff plots in forest and small-scale agriculture in the Usambara Mountains, Tanzania. *G eografiska Annaler*, 62A: 113-148.
- Lundgren, B. et Nair, P.K.R. 1985. Agroforestry for soil conservation. In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America, 703-717.
- Lundgren, B. et Young, A. 1992. Land use management in relation to soil conservation and agroforestry. In Kebede Tato et H. Hurui (ed.), *Soil conservation for survival*, chap. 14 (pp. 143- 155). 6^e Conférence internationale sur la conservation du sol, au Kenya et en Ethiopie, 6- 18 novembre 1989. Soil and Water Conservation Society.
- Lyman, J. et Brewbaker, J.L., ed. 1982. Matrix of priority nitrogen-fixing tree species by use and ecology. In J. Lyman et J.L. Brewbaker, ed. *Resource documents on nitrogen-fixing trees*. Waimanalo, Hawaii, USA: NFTA, 21-27.
- MacDicken, K.G. et Brewbaker, J.L. 1984. Descriptive summaries of economically important nitrogen-fixing trees. *N.F.T.A. Research Report* 2: 46-54.
- McCormack, D.E. et Young, K.K. 1981. Technical and societal implications of soil loss tolerance. In R.P.C. Morgan, ed. *Soil conservation: problems and prospects*. Chichester, UK: Wiley, 365-376.
- McMutrie, R.E. 1985. Forest productivity in relation to carbon partitioning and nutrient cycling: a mathematical model. In M.G.R. Cannell et J.E. Jackson, ed. *Attributes of trees as crop plants*. Abbots Ripton, UK: Institute of Terrestrial Ecology: 195-207.
- Mann, H.S. et Saxena, S.K., ed. 1980. *Khejri (Prosopis cineraria) in the Indian desert-its role in agroforestry*. Jodhpur, India: CAZRI Monograph 11, 77 p.
- Mann, H.S. et Saxena, S.K. 1981. *Bordi-Zizyphus nummularia: a shrub of the Indian arid zone*. Jodhpur, India: CAZRI, 96 p.
- Mass, J.M., Jordan, C.F. et Sarakhan, J. 1988. Soil erosion and nutrient losses in seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. *Journal of Applied Ecology* 25: 595-607.
- Mathur, H.N., Agarwal, M.C., Babu, R. et Joshie, P. 1979. Benefit-cost ratio of fuel cum fodder plantation in Doon Valley. *Indian Journal of Soil Conservation*, 7: 53-58.
- Maydell, H.J., von. 1986. *Arbres et arbustes du Sahel. Leurs caractéristiques et leurs utilisations*. Eschborn (Allemagne). Office allemand de la coopération technique, 533 p.
- Mellilo, J.M. et Gosz, J.R. 1983. Interactions of biogeochemical cycles in forest ecosystems. In B. Bolin et R.B. Cooke, ed. *The major biochemical cycles and their interactions*. Chichester, UK: Wiley, 177-222.

- Mergen, F. 1987. Research opportunities to improve the production of homegardens. *Agroforestry Systems* 5: 57-67.
- Metzner, J. 1976. "Lamtoroniasi": an experiment in soil conservation. *Bulletin of Indonesian Economic Studies*, 12: 103-109.
- Michon, R. et Bizimana, M. 1984. *Résultats des expérimentations sur l'érosion des sols: mesures 1984*. Bujumbura, Burundi: Département des Eaux et Forêts, 18 p.
- Michon, G., Mary, F. et Bompard, J. 1986. Multistoried agroforestry garden system in West Sumatra, Indonesia. *Agroforestry: Systems* 4: 315-338.
- Miehe, S. 1986. *Acacia albida* and other multipurpose trees on the Fur farmlands in the Jebel Marra highlands, Western Darfur, Sudan. *Agroforestry Systems* 4: 89- 119.
- Mishra, B.K. et Ramakrishnan, P.S. 1983. Slash and burn agriculture at higher elevations in North-Western India: I and II. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 9: 83-96.
- Mishra, C.M., Srivastava, R.J. et Singh, S.L. 1986. Pattern of biomass accumulation and productivity of *L. leucocephala* var.K-8 under different spacing. *Indian Forestry*, 112: 743-746.
- Moldenhauer, W.C. et Hudson, N.W., ed. 1988. *Conservation farming on steep lands*. Ankeny, Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society, 296 p.
- Mongi, H.O. et Huxley, P.A., ed. 1979. *Soils research in agroforestry*. Nairobi: ICRAF, 584 p.
- Morgan, R.P.C., ed. 1981. *Soil conservation: problems and prospects*. Chichester, U.K.: Wiley, 576 p.
- Mueller-Harvey, I., Juo, A.S.R. et Wild, A. 1985. Soil organic C, N, S and P after forest clearance in Nigeria: mineralization rates and spatial variability. *Journal of Soil Science* 36: 585-591.
- Mulongoy, K. 1986. *Nitrogen cycling in alley cropping systems*. IITA Research Briefs 7. Ibadan, Nigeria: IITA, 3-5.
- Murphy, P.G. 1975. Net primary productivity in tropical terrestrial ecosystems. In H. Lieth et R.H. Whittaker, ed. *The primary productivity of the biosphere*. New York: Springer: 217-231.
- Mwakalagho, R.J.M. 1986. A C.B. study of conservation in Malawi. In SADCC, *cost-benefit analysis of soil and water conservation projects*. Maseru, Lesotho, Land Utilization Programme Report 4: 35-42.
- Nair, M.A. et Sreedharan, C. 1986. Agroforestry farming systems in the homesteads of Kerala, Southern India. *Agroforestry Systems* 4: 339-363.
- Nair, P.K.R. 1984. *Soil productivity aspects of agroforestry*. Nairobi: ICRAF, 85 p.
- Nair, P.K.R. ed. 1984-1988. Agroforestry system descriptions 1-26. *Agroforestry Systems* divers numéros.
- Nair, P.K.R. 1987a. Soil productivity under agroforestry. In H.K. Gholz, ed. *Agroforestry: realities, possibilities and potentials*. Dordrecht, Netherlands: Nijhoff et ICRAF: 21-30.
- Nair, P.K.R. 1987b. Agroforestry systems inventory. *Agroforestry Systems* 5: 301-318.
- Nair, P.K.R., ed. 1989. *Agroforestry systems in the tropics*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer, 664 p.
- Nakano, K. et Syahbuddin 1989. *Nutrient dynamics in forest fallows in south-east Asia*. In J. Proctor ed. *Mineral nutrients in tropical forest and savannas*. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 325-336.
- National Research Council 1983. *Calliandra: a versatile small tree for humid tropics*. Washington D.C.: National Academy Press, 52 p.
- National Research Council 1984. *Casuarinas: nitrogen-fixing trees for adverse sites* Washington D.C.: National Academy Press, 118 p.
- National Soil Erosion-Soil Productivity Research Planning Committee 1981. Soil erosion effects on soil productivity: a research perspective. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36: 82-90
- Neumann, I.F. 1983. Use of trees in smallholder agriculture in tropical highlands In W. Lockeretz, ed. *Environmentally sound agriculture*. New York: Praeger: 351-376
- NFTA 1988 *Gliricidia sepium (Jacq.) Walp: management and improvement*. Proceedings of a workshop held 21-27 June 1987, in Turrialba, Costa Rica. Waimanalo, Hawaii, USA: NFTA, 225 p.
- Novoa, B A R. et Posner, J.L, ed. 1981. *Agricultura de la ladera en América tropical*. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 203 p.
- Nutman, P.S. 1976. I.B.P. field experiments on nitrogen fixation by nodulated legumes In P.S. Nutman, ed. *Symbiotic nitrogen fixation in plants*. London: Cambridge University Press, 211 -237
- Nye, P.H. et Greenland, D.J. 1960. *The soil under shifting cultivation*. Technical Communication 51 Harpenden, UK: Commonwealth Bureau of Soils, 144 p

- Nye, P.H. et Tinker, P.B. 1977. *Solute movement in the soil-root system*. Oxford, UK: Blackwell, 342 p.
- Okigbo, B.N. et Lal, R. 1977. Role of cover crops in soil and water conservation. In *Soil conservation and management in developing countries*. FAO Soils Bulletin 32. Rome: FAO, 97-108
- O'Loughlin, C.L. et Pearce A.J. ed. 1984 *Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability*. Honolulu, Hawaii. USA: East-West Center, 310 p.
- O'Sullivan, T.E 1985. Farming systems and soil management: the Philippines/Australian development assistance program experience. In E.T Crasswell, J.V. Remenyi et L.G Nallana, ed. *Soil erosion management*. ACIAR Proceedings Series 6 Canberra: ACIAR: 77-81.
- Othieno, C.O. 1975. Surface run-off and soil erosion on fields of young tea. *Tropical Agriculture*, 52: 299-308.
- Othieno, C.O. et Laycock, D.H. 1977. Factors affecting soil erosion within tea fields. *Tropical Agriculture* 54: 323-330.
- Pacardo, E.P 1985 Soil erosion and ecological stability. In E.T. Crasswell, J.V. Remenyi et L.G. Nallana, ed. *Soil erosion management*. ACIAR Proceedings Series 6. Canberra: ACIAR: 82-85
- Parera, V. 1983 *Leucaena* for erosion control and green manure in Sikka. In *Leucaena research in the Asia-Pacific region* Ottawa: IDRC: 169- 172
- Parker, G.G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle *Advances of Ecological Research* 13: 57-133.
- Parton, W.J., Schimel, D.S. Cole, C V. et Ojima, D.S. 1987 Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands *Soil Science Society of America Journal* 51: 1173-1179
- Paul, E.A. et van Veen, J.A. 1978 The use of tracers to determine the dynamic nature of soil organic matter *Transactions of the Eleventh International Congress of Soil Science*, 3: 61 - 102
- Peake, L. 1986. *Erosion crop yields and time: a reassessment of quantitative relationships*. Discussion paper 191 Norwich, UK: University of East Anglia, School of Development Studies, 40 p.
- Penning de Vries, F.W.T et Krul, J.M. 1980 Productivity of Sahelian rangelands in relation to the availability of nitrogen and phosphorus from the soil. In T. Rosswall, ed. *Nitrogen cycling in West African ecosystems*. Stockholm: Royal Swedish Academy et SCOPE: 95-113
- Perez, J., Davey, C.B. et McCallum, R.E. 1987 *Gmelina arborea*: intercropping, coppicing and nutritional requirements. In N. Caudle et C.B McCants, ed. *Tropsoils: technical report 1985-1986*. Raleigh, USA: North Carolina State University, 28.
- Petersen, H., O'Neill, R.V. et Gardner, R.H. 1985. Use of an ecosystem model for testing ecosystem responses to inaccuracies of root and microflora productivity estimates. In A.H. Fitter, ed. *Ecological interactions in the soil environment*. Oxford, UK: Blackwell: 233-242
- Piccolo, A. 1986 Soil humus in the tropics: extraction and characterization. *Land and water*, FAO AGLS Newsletter, 5: 16-19
- Pieri, C. 1983 Nutrient balances in rainfed farming systems in arid and semi-arid regions In *Proceedings of the Seventeenth Colloquium*. Bern: International Potash Institute: 181 -209
- Pieri, C. 1985. Bilans minéraux de systèmes de cultures pluviales en zones arides et semi-arides. *Agronomie Tropicale* 40: 1-20
- Poore, M.E.D. et Fries, C. 1986. Les effets écologiques des eucalyptus. Etudes FAO: Forêts 59. Rome: FAO, 118 p.
- Poschen, P. 1986. An evaluation of the *Acacia albida-based* agroforestry practices in the Hararghe Highlands of Eastern Ethiopia. *Agroforestry Systems* 4: 129-143.
- Poulsen, G. 1984 *Making the hills of Phong Chau green and productive in collaboration with the local people*. Bai Bang, Hanoi, Vietnam: Consultant's Report to Scanmanagement, 22 p.
- Pound, B et Cairo, L.M. 1983. *Leucaena: its cultivation and use*. London: Overseas Development Administration, 287 p.
- Prinsley, R.T. et Swift, M.J., ed. 1986. *Amelioration of soil by trees: a review of current concepts and practices*. London: Commonwealth Science Council, 181 p
- Prinz, D. 1986 Increasing the productivity of smallholder farming systems by introduction of planted fallows. *Plant Research and Development*. 24: 31 -56.
- Prussner, K.A. 1981. *Leucaena leucocephala farming systems for agroforestry and the control of swidden agriculture*. Jakarta, Indonesia: USAID, 12 p.
- Pursino, A.A.C., Lurlarp, C et Lynd, J. 1986. Mycorrhiza and soil fertility effects with growth: nodulation and nitrogen fixation of Leucaena grown on a typic eutrustox. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 17: 473-489
- Pushparajah, E. 1981 Nitrogen cycle in rubber (*Hevea*) cultivation. In R. Wetselaer, J.R. Simpson et T. Rosswall, ed. *Nitrogen cycling in South-East Asian ecosystems* Canberra: Australian Academy of Sciences, 101-108

- Queblatin, E. 1985 Upland agriculture development: the Central Visayas Regional project-I experience. In E.T Craswell, J.V. Remenyi et L.G. Nallana, ed. *Soil erosion management*, ACIAR Proceedings Series 6. Canberra: ACIAR, 71-76
- Quencez, P. 1986 Utilisation des palmes pour lutter contre l'érosion en plantation de palmiers à huile. *Oléagineux*, 41: 315-320.
- Radwanski, S.A. 1969 Improvement of red acid sands by the neem tree (*Azadirachta indica*) in Sokoto, North-Western State of Nigeria. *Journal of Applied Ecology* 6: 505-511.
- Radwanski, S.A. et Wickens, G.E. 1967. The ecology of *Acacia albida* on mantle soils in Zelingei, Jebel Marra, Sudan. *Journal of Applied Ecology*, 4: 569-579
- Radwanski, S.A. et Wickens, G.E. 1981. Vegetative fallows and potential value of the neem tree (*Azadirachta indica*) in the tropics. *Economic Botany*, 35: 398-414.
- Raintree, J B. 1989. *La "D and D": manuel de l'utilisation: La méthodologie de diagnostic et de conception en agroforesterie*. Nairobi, ICRAF, 125 p.
- Ramakrishnan, P.S., 1989. *Nutrient cycling in forest fallows in North-Eastern India*. In J. Proctor, ed. *Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecosystems*. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 337-352
- Ramakrishnan, PS. et Toky, O.P. 1981. Soil nutrient status of hill agro-ecosystems and recovery pattern after slash and burn agriculture (jhum) in North-Eastern India. *Plant and Soil*, 60: 41-64.
- Read, M.D., Kang, B.T. et Wilson, G.F. 1985 Use of *Leucaena leucocephala* (Lam de Wit) leaves as a nitrogen source for crop production. *Fertilizer Research*, 8: 107- 116.
- Reichle, D.E., ed. 1981. *Dynamic properties of forest ecosystems*. IBP 23. Cambridge: University Press, 683 p.
- Reifsnyder, W.E. et Darnhofer, T. O., ed. 1989. *Meteorology and Agroforestry*. Proceedings of an International Workshop on the Applications of Meteorology to Agroforestry Systems Planning and Management, Nairobi, Kenya, 9-13 février 1987. ICRAF. 536 p.
- Reij, C., Turner, S. et Kuhlman, T. 1986 *Soil and water conservation in sub-Saharan Africa: issues and options*. Amsterdam: IFAD et Free University of Amsterdam, 82 p
- Rijsberman, F.R. et Wolman, M.G., ed. 1984. *Quantification of the effects of erosion on soil productivity in an international context*. Delft, Netherlands: Hydraulics Laboratory, 157 p.
- Rijsberman, F.R et Wolman, M G., ed. 1985. Effects of erosion on soil productivity: an international comparison. *Journal of Soil and Water Conservation*, 40: 349-354
- Robertson, G. P. Herrera, R. et Rosswall, T., ed. 1982 *Nitrogen cycling in ecosystems of Latin America and the Caribbean*. The Hague, Nijhoff, 430 p
- Robinson, J. B. D. 1967. The effects of exotic softwood crops on the chemical fertility of a tropical soil. *East African Agriculture and Forestry Journal*, 23: 175- 191
- Rodin, LE. et Basilevic, N.I. 1968. *World distribution of plant biomass*. UNESCO Natural Resources Research 5. Paris: UNESCO, 45-52.
- Roose, E.J. 1976. Use of the universal soil loss equation to predict erosion in West Africa. In: *Soil erosion: prediction and control*. Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, USA: 60-74.
- Roose, E.J. 1977a. *Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*. Paris: ORSTOM, Travaux et Documents de l'ORSTOM n°78, 108 p.
- Roose, E.J. 1977b. Application of the universal soil loss equation of Wischmeier and Smith in West Africa. In D.J. Greenland et R. Lal, ed. *Soil conservation and management in the humid topics*. Chichester, UK: Wiley: 177-187.
- Roose, E. 1979. *Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés sous sorgho et sous savanne soudano-sahélienne*. Paris: ORSTOM, 123 p
- Roose, E. 1980. *Dynamique actuelle d'un sol ferallitique sablo-argileux très désaturé sous cultures et forêt dense humide équatoriale du sud de la Côte d'Ivoire* Paris: ORSTOM, 204 p
- Roose, E.J. 1986 Runoff and erosion before and after clearing depending on the type of crop in Western Africa. In R. Lal, P.A. Sanchez et R.W. Cummings Jr, ed. *Land clearing and development in the tropics*. Rotterdam, Netherlands: Balkema: 317-330.
- Roose, E. 1988 Soil and water conservation lessons from steep-slope farming in French-speaking countries of Africa. In W.C Moldenhauer et N.W. Hudson, ed. *Conservation fanning on steep lands*. Ankeny, Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society, 129-139.
- Rose, C.W 1985a. Developments in soil erosion and deposition models *Advances in Soil Science* 2: 1-63
- Rose, C W. 1985b Progress in research in soil erosion processes and a basis for soil conservation practices. In E. T. Craswell, J.V. Remenyi et L.G. Nallana, ed. *Soil erosion management*, ACIAR Proceedings Series 6. Canberra: ACIAR: 32-41.
- Rose, C.W. 1988. Research progress on soil erosion processes and a basis for soil conservation practices. In R. Lal, ed. *Soil erosion research methods*. Ankeny, Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society, 119-139

- Rose, C.W. et Freebairn, D.M 1985. A new mathematical model of soil erosion and deposition processes with application to field data In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. Lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America, 549-557.
- Rose, C.W., Williams, J.R., Sander, G.C. et Barry, D.A. 1983. A mathematical model of soil erosion and deposition processes: I-II. *Soil Science Society of America Journal*, 47: 991-1000.
- Roskoski, J.P. 1982. Nitrogen fixation in a Mexican coffee plantation In G.P. Robertson, R. Herrera et T. Rosswall, ed. *Nitrogen cycling in ecosystems of Latin America and the Caribbean*. The Hague: Nijhoff. 283-292
- Roskoski, I.P. et van Kessel, C 1985. Annual, seasonal and diel variation in nitrogen fixing activity by *Inga jinicuil*, a tropical leguminous tree. *Oikos*, 44: 306-312
- Rosswall, T., ed 1980. *Nitrogen cycling in West African ecosystems*. Stockholm: Royal Swedish Academy et SCOPE. 450 p.
- Rosswall, T., non publié. *Comments on nitrogen cycling in tropical ecosystems*. Document présenté à la 1^{re} réunion du T.S.B.F., Lancaster, UK, 1984.
- Rundel, P.W., Nilsen, E.T., Sharifi, M.R., Virginia, R.A., Jarrel, W.M., Khol, D.H. et Shearer, G.B. 1982 Seasonal dynamics of nitrogen cycling for a *Prosopis* woodland in the Sonoran Desert. *Plant and Soil*, 67: 343-353.
- Russo, R.O. et Budowski, G. 1986. Effect of pollarding frequency on biomass of *Erythrina poeppigiana* as a coffee shade tree. *Agroforestry Systems*, 4: 145- 162
- Sanarn Rimwanich, ed. 1988. *Land conservation for future generations proceedings of the Fifth International Soil Conservation Conference*. 2 vol. Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives, 1311 p
- Sanchez, P.A. 1976 *Properties and management of soils in the tropics*. New York: Wiley, 618 p.
- Sanchez, P.A. 1987 Soil productivity and sustainability in agroforestry systems In H.A. Stoppler et P.K.R. Nair, ed. *Agroforestry: a decade of development*. Nairobi: ICRAF, 205-223
- Sanchez, P.A., Palm, C.A., Davey, C.B., Szott, L.T. et Russell, C.E. 1985. Tree crops as soil improvers in the humid tropics? In M.G.R. Cannell et J.E. Jackson, ed. *Attributes of trees as a crop plants*. Abbot Ripton, UK: Institute of Terrestrial Ecology, 327-358
- Sanchez, P.A. et Russell, C.E. 1987. Contrasting effects of *Pinus caribaea* and *Gmelina arborea* on soil properties. In N. Caudle et C.B. McCants, ed *Troposoils: technical report 1985-1986*. Raleigh, North Carolina, USA: North Carolina State University: 29-30.
- Sanginga, N., Mulongoy, K. et Ayanaba. A 1987 Nitrogen fixation by *Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit under Nigerian field conditions estimated by N-15 technique. *Biological Agriculture and Horticulture*, 3: 347-352.
- Sauerbeck, D.R. 1977 The turnover of organic matter in soils as traced by radiocarbon. *Journal of Nuclear Agriculture and Biology*, 6: 33-41.
- Sauerbeck, D.R. 1983. Studies on the breakdown of plant residues in soils and the turnover of photosynthates in the rhizosphere In *Proceedings of the Republic of China-Federal Republic of Germany Seminar on Plant Nutrition and Soil Science*. Taipei, Taiwan: National Science Council: 147-155.
- Sauerbeck, D.R. et Gonzalez, M.A. 1977. Field decomposition of carbon-14-labelled plant residues in various soils of the Federal Republic of Germany and Costa Rica. In IAEA *Soil organic matter studies*. Vienna: 159-170
- Sauerbeck, D.R. et Johnen, B.G. 1977 Root formation and decomposition during plant growth. In IAEA *Soil organic matter studies*. Vienna: 141-148
- Sauerbeck, D.R., Nonnen, S. et Allard, I.L. 1982. Consumption and turnover of photosynthates in the rhizosphere depending on plant and growth conditions (abstract) *Transactions of the Twelfth International Congress of Soil Science*. 6: 59
- Saunders, I. et Young, A. 1983 Rates of surface processes on slopes, slope retreat and denudation. *Earth Surface Processes and Land-forests*, 8: 473 -501.
- Schnitzer, M. 1977. Recent findings in the characterization of humic substances extracted from soils from widely differing climatic zones. In IAEA *Soil organic matter studies* Vienna: 117- 132
- Seubert, C.E., Sanchez, P.A. et Valverde, C 1977 Effects of land clearing methods on soil properties of an ultisol and crop performance in the Amazon jungle of Peru. *Tropical Agriculture* 54: 307-321
- Shaxson, T.F. 1988. Conserving soil by stealth. In W.C. Moldenhauer et N.W. Hudson, ed. *Conservation farming on steep lands*. Ankeny, Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society: 9- 17.
- Shaxson, T.F., Hunter, N.D., Jackson, T.R. et Alder, J.R. 1977 *A land husbandry manual*. Zomba, Malawi: Government Printer, 338 p.
- Shaxson, T.F., Hudson, N.W., Sanders, D.W., Roose, E. et Moldenhauer, W.C. 1989 *Land husbandry A framework for soil and water conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society, 64 p.
- Sheng, T.C. 1986. *Watershed conservation a collection of papers for developing countries*. Fort Collins, Colorado, USA- Colorado State University, 92 p.
- Siderius, W., ed. 1986. *Land evaluation for land-use planning and conservation in sloping areas*. ILRI Publication 40. Wageningen, Netherlands: ILRI, 331 p.

- Simon, A. 1983. *Techniques de conservation des sols dans les hauts plateaux de l'Ouest*. Bafoussam, Cameroun: Union Centrale Coopérative Agricole de l'Ouest, 139 p.
- Singh, A. et Singh, M D. 1981. *Soil erosion hazards in North Eastern hill region*. Shillong, India: Division of Agricultural Engineering, ICAR Research Complex for North East Hills Region, 30 p.
- Singh, G., Babu, R. et Chandra, S 1981a. *Soil loss prediction research in India* ICAR Bulletin T- 12/D-9 Dehra Dun, India: Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute, 70 p.
- Singh, G. Ventakataraman, C. et Sastry, G. 1981b. *Manual of soil and water conservation practices in India*. Dehra Dun, India: Central Soil and Water Research and Training Institute, 434 p.
- Smith, RM et Stamey, W.L. 1965 Determining the range of tolerable erosion *Soil Science*, 100: 414-424
- Soemwarto, O. 1987 Homegardens: a traditional agroforestry system with a promising future. In H.A. Steppler et P.K.R. Nair, ed. *Agroforestry: a decade of development* Nairobi: ICRAF: 157- 170.
- Sojka, R.E., Langdale, G.W. et Karlen, D.L. 1984 Vegetative techniques for reducing water erosion of cropland in the Southeastern United States. *Advances in Agronomy* 37: 155- 181.
- Stebbing, E. P. 1953. *The creeping desert in the Sudan and elsewhere in Africa 15° to 13° latitude*. Khartoum. McCorquodale and Co (Sudan) Ltd., 165 p.
- Steppler, H.A. et Nair, P.K R. ed 1987. *Agroforestry: a decade of development*. Nairobi: ICRAF, 335 p.
- Stevenson, F.S. 1986 *Cycles of soil* New York: Wiley, 380 p.
- Stockdale, F. A 1937 Soil erosion in the Colonial Empire *Empire Journal of Experimental Agriculture*, 5: 281-297.
- Stocking, M. 1978. A dilemma for soil conservation. *Area*, 10: 306-308.
- Stocking, M. 1981. *A working model for the estimation of soil loss suitable for underdeveloped areas*. Occasional Paper 15. Norwich, U K: University of East Anglia, School of Development Studies, non paginé.
- Stocking, M. 1984. *Erosion and soil productivity: a review*. Rome: FAO, 102 p.
- Stocking, M. 1985a. *Erosion-induced loss in soil productivity: a research design*. Consultants Working Paper 2. Rome: FAO, Soil Conservation Programme, 33 p.
- Stocking, M. 1985b. Development projects for the small farmer: lessons from Eastern and Central Africa in adapting conservation. In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. Lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America: 747-758.
- Stocking, M 1986. *The cost of soil erosion in Zimbabwe in terms of the loss of three major nutrients*. Consultants Working Paper 3 Rome: FAO, Soil Conservation Programme, 164 p.
- Stocking, M. 1987. *A methodology for erosion hazard mapping of the SADC region*. Maseru, Lesotho: SADC, 32 p.
- Stocking, M.A. 1988a Assessing vegetative cover and management effects In R Lal, ed. *Soil erosion research methods*. Ankeny, Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society, 163-185.
- Stocking, M. 1988b. *Quantifying the on-site impact of soil erosion* In Sanarn Rimwanich, ed. *Land conservation for future generations: proceedings of the Fifth International Soil Conservation Conference*. Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives, 137-162.
- Stocking, M. et Elwell, H. 1981. A model way of predicting erosion. *International Agricultural Development*, 1: 14- 15.
- Stocking, M. et Pain, A. 1983 *Soil life and the minimum soil depth for productive yields*. Discussion paper 150. Norwich, UK: University of East Anglia, School of Development Studies, 24 p.
- Stocking, M. et Peake, L. 1985. *Erosion-induced loss in soil productivity trends in research and international cooperation*. Norwich. UK: University of East Anglia, Overseas Development Group: Rome: FAO, 52 p.
- Stocking, M. et Peake, L. 1986. Crop yield losses from the erosion of alfisols. *Tropical Agriculture* 63: 41-45.
- Stromgaard, P. 1984. The immediate effect of burning and ashfertilization. *Plant and Soil*, 80: 307-320.
- Stromgaard, P 1985 Biomass. growth and burning of woodland in a shifting cultivation area of South Central Africa. *Forest Ecology and Management*. 12: 163-178.
- Sumberg, J. E. 1986 Alley farming with *Gliricidia septum*: germplasm evaluation and planting density trial *Tropical Agriculture* 63: 170-172.
- Swift, M.J, ed. 1984. Soil biological processes and tropical soil fertility: a proposal for a collaborative programme of research. *Biology International*, Special Issue 5, 38 p.

- Swift, M.J., ed. 1985. Tropical soil biology and fertility (TSBF): inter-regional research planning workshop. *Biology International*, Special Issue 9, 24 p.
- Swift, MJ, ed 1987. Tropical soil biology and fertility (TSBF): inter-regional research planning workshop *Biology International*, Special Issue 13, 68 p.
- Swift, M.J., Heal, J.W. et Anderson, J.M 1979 *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Oxford, UK: Blackwell, 372 p.
- Swih, MJ. et Sanchez, P.A. 1984. Biological management of tropical soil fertility for sustained productivity. *Nature and Resources*, 20: 2-10.
- Szott, LT, Davey, CB et Palm, C.A. 1987a. Alley-cropping on ultisols In N. Caudle et C.B. McCants, ed. *Troposoils: technical report 1985-1986*. Raleigh, North Carolina, USA: North Carolina State University: 23-26.
- Szott, L.T., Davey, C.B., Palm, C.A. et Sanchez, P. A. 1987b. Improved fallows In N. Caudle et C B. McCants, ed *Troposoils: technical report 1985-1986*. Raleigh, North Carolina, USA North Carolina State University: 31-35.
- Szott, L.T., Davey, C.B., Perez, J et Palm, C.A. 1987c. Forest and soil regeneration. In N. Caudle et CB. McCants, ed. *Troposoils: technical report 1985-1986*. Raleigh, North Carolina, USA: North Carolina State University: 35-42.
- Toky, O P. et Ramakrishnan, P S 1981 Run-off and infiltration losses related to shifting agriculture (jhum) in North-Eastern India *Environmental Conservation*, 8: 313-321.
- Toky, O.P. et Ramakrishnan, P.S. 1982. Role of bamboo (*Dendrocalamus hamiltonia* Nus and Arn.) in conservation of potassium during slash and burn agriculture (jhum) in North-Eastern India. *Journal of Tree Science*, 1: 17-26.
- Toky, O.P. et Ramakrishnan, P.S. 1983. Secondary succession following slash and burn agriculture in North-Eastern India. I-II. *Journal of Ecology*, 71: 735-757.
- Tolsma, D.J., Emst, W.H.O., Verweij, R.A. et Vooijs, R. 1987. Seasonal variation of nutrient concentrations in a semi-arid savanna ecosystem in Botswana. *Journal of Ecology* 75: 755-770.
- Tran Van Nao 1983. Agroforestry systems and some research problems. In P.A. Huxley, ed. *Plant research and agroforestry*. Nairobi: ICRAF: 71-77.
- Tsai, L.M. et Hazah, M.B. 1985. Biomass accumulation in naturally regenerating lowland secondary forest and an *Acacia mangium* stand in Sarawak. *Pertanika* 8: 237-242.
- Turner, J. et Lamben, M.J.1983. Nutrient cycling within a 27 year-old *Eucalyptus grandis* plantation in New South Wales. *Forest Ecology and Management* 6: 155-168.
- UNESCO 1978. *Tropical forest ecosystems*. UNESCO Natural Resources Research 14. Paris: UNESCO, 683 p.
- USDA 1975. *Soil taxonomy*. US Agriculture Handbook 436. Washington, D.C.: USDA, 754 p.
- Vandenbelt, R.J. 1992. Faidherbia albida in the West African semiarid tropics. Patancheru (India), ICRISAT/Nairobi, ICRAF, 206 p.
- van Eijk-Bos, C. et Moreno, L.A. 1986. *Barreras vivas de Gliricidia sepium (Jacq.)Steud (matarratón) y su efecto sobre la pérdida de suelo en terrenos de colinas bajas-Urabá (Colombia)*. Bogota, Colombia: Conif-Informa, 16 p.
- van Faassen, H.G. et Smilde, K.W.1985. Organic matter and nitrogen turnover in soils. In B.T. Kang et J. van der Heide, ed. *Nitrogen management and farming systems in humid and subhumid tropics*. Haren, Netherlands: Institute of Soil fertility: 39-55.
- van Uexkull, H.R. 1986. *Efficient fertilizer use in acid upland soils of the humid tropics*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 210. Rome: FAO, 69 p.
- Vergara, N.T. non publié. *The potential role of agroforestry in integrated watershed management*. Document présenté à l'atelier du Centre Est-Ouest/USAID sur l'aménagement intégré des bassins versants, Honolulu, Hawaii, USA, 1985.
- Verinumbe, I. 1987. Crop production on soil under some forest plantation in the sahel. *Agroforestry Systems* 5: 185-188.
- Virginia, R.A. 1986. Soil development under legume tree canopies. *Forest Ecology and Management*, 16: 69-79.
- Virginia, R.A., Jenkins, M.B. et Jarrell, W.M. 1986. Depth of root symbiont occurrence in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2: 127- 130.
- van Uexkull, H.R. 1986. *Efficient fertilizer use in acid upland soils of the humid tropics*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 210. Rome: FAO, 69 p.
- Vose, P. 1980. *Introduction to nuclear techniques in agronomy and plant biology*. Oxford, UK: Pergamon, 391 p.
- Weber, F. et Hoskins, M.W. 1983. *Soil conservation technical sheets*. Moscow, Idaho, USA: University of Idaho, 124 p.
- Weber, F.R. et Stoney, C H 986. *Reforestation in and lands*. Arlington, Virginia, USA: Volunteers in Technical Assistance, 335 p.

- Weerakoon, W.L. 1983. Conservation farming research program at Maha Illuppallama. In *Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability*. London: Commonwealth Secretariat: 65-67.
- Weerakoon, W.L. et Gunasekera, C.L.G. 1985. *In situ* application of *Leucaena leuccephala* (Lam) de Wit. as a source of green manure in rice. *Sri Lankan Journal of Agricultural Sciences*, 22: 20-27.
- Wenner, C.G. 1980. *Trees in erosion and soil conservation in Kenya*. Nairobi: Ministry of Agriculture, 26 p.
- Wenner, C.G. 1981. *Soil conservation in Kenya: especially in small-scale farming in high-potential areas using labour-intensive methods*. (7^e éd.) Nairobi: Ministry of Agriculture and SIDA. 230 p.
- Wetselaer, R., Simpson, J.R. et Rosswall, T., ed. 1981. *Nitrogen cycling in south-east Asian ecosystems*. Canberra: Australian Academy of Sciences, 216 p.
- Whittaker, R.H. et Woodwell, G.M. 1971. Measurement of net primary production in forest. In *Productivity of forest ecosystems*. Paris: UNESCO, 59-175.
- Wiersum, K.F. 1984. Surface erosion under various tropical agroforestry systems. In C.L. O'Loughlin et A.J. Pearce, ed. *Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability*. Honolulu, Hawaii, USA: East-West Center, 231-239.
- Wiersum, K.F. 1985. Effects of various vegetation layers in an *Acacia auriculiformis* forest plantation on surface erosion in Java, Indonesia. In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. Lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America: 79-89.
- Wiersum, K.F. 1986. *Ecological aspects of agroforestry, with special emphasis on tree-soil interactions: lecture notes*. FONC Project Communication 1986-16. Jogjakarta, Indonésie: Fakultas Kerhuanan Universiti Gadjah Mada, 73 p.
- Wiggins, S.L. 1981. The economics of soil conservation in the Acheluate River basin, El Salvador. In R.P.C. Morgan, ed. *Soil conservation: problems and prospects*. Chichester, UK: Wiley, 399415.
- Wijewardene, R. et Waidyanatha, P. 1984. *Conservation farming*. Peradeniya, Sri Lanka: Department of Agriculture; London: Commonwealth Secretariat, 38 p.
- Wilkinson, G.E. 1975. Canopy characteristics of maize and the effect on soil erosion in western Nigeria. *Tropical Agriculture*, 52: 289-297.
- Wilkinson, G.E. 1985. *Drafting land use legislation for developing countries*. FAO Legislative Study 31. Rome: FAO, 150 p.
- Williams, J.R. 1985. The physical components of the EPIC model. In S. A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. Lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America: 272-284.
- Williams, J.R., Dyke, P.T. et Jones, C.A. 1982. EPIC-a model for assessing the effects of erosion on soil productivity. In *Proceedings of the Third Conference on the State-of-the-Art in Ecological Modelling*. New York: Elsevier: 231-242.
- Wilson, G.F., Kang, B.T. et Mulongoy, K. 1986. Alley cropping: trees as source of green-manure and mulch in the tropics. *Biological Agriculture and Horticulture* 3: 251-267.
- Wischmeier, W.H. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 31: 5-9.
- Wischmeier, W.H. et Smith, D.D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*. US Agriculture Handbook 537. Washington, D.C.: USDA, 58 p.
- Woomer, P.L., et Ingram, J.S.I., 1990, *The biology and fertility of tropical soils. Report to the Tropical Soil Biology and Fertility Programme (TSBF)*. Nairobi, TSBF c/o UNESCO, 44 p.
- Yamoah, C.F., Agboola, A.A. et Mulongoy, K. 1986a. Decomposition, nitrogen release and weed control by prunings of selected alley cropping shrubs. *Agroforestry Systems* 4: 239-246.
- Yamoah, C.F., Agboola, A.A., Wilson, G.G. 1986b. Nutrient competition and maize performance in alley cropping systems. *Agroforestry Systems* 4: 247-254.
- Yamoah, C.F., Agboola, A.A., Wilson, G.G. et Mulongoy, K. 1986c. Soil properties as affected by the use of leguminous shrubs for alley cropping with maize. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 18: 167-177.
- Yost, R.S., El-Swaify, S.A., Dangler, E.W. et Lo, A. 1985. The influence of simulated soil erosion and restorative fertilization on maize production on an oxisol. In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer et A. Lo, ed. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, Iowa, USA: Soil Conservation Society of North America: 248-261.
- Young, A. 1969. Present rate of land erosion. *Nature*, 224: 851-852.
- Young, A. 1976. *Tropical soils and soil survey*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 468 p.
- Young, A. 1977. *Traditional forms of land use in relation to soil erosion*. In Soil conservation and management in developing countries. FAO Soils Bulletin 32. Rome: FAO, 51-59.
- Young, A. 1984a. *Land evaluation for agroforestry: the tasks ahead*. ICRAF Working Paper 24. Nairobi: ICRAF, 54 p.
- Young, A. 1984b. Common sense on desertification? *Soil Survey and Land Evaluation* 4: 90-91.

- Young, A. 1985a. *An environmental data base for agroforestry*. ICRAF Working Paper 5, édition revue. Nairobi: ICRAF, 69 p.
- Young, A. 1985b. *Soils aspects of the forestry plantation programme for the Vinh Phu pulp and paper mill, Vietnam*. Consultant's report for Scanmanagement. Nairobi: ICRAF, 92 p.
- Young, A. 1986a. *The potential of agroforestry for soil conservation Part I: erosion control*. ICRAF Working Paper 42. Nairobi: ICRAF, 69 p.
- Young, A. 1986b. Land evaluation and agroforestry diagnosis and design: towards a reconciliation of procedures. *Soil Survey and Land Evaluation* 5: 61-76.
- Young, A. 1986c. Evaluation of agroforestry potential in sloping areas. In W. Siderius, ed. *Land evaluation for land-use planning and conservation* in sloping areas. Wageningen, Netherlands: ILRI, 106132.
- Young, A. 1987a. *The potential of agroforestry for soil conservation. Part II: maintenance of fertility*. ICRAF Working Paper 43. Nairobi: ICRAF, 135 p.
- Young, A. 1987b. The potential of agroforestry for soil conservation and sustainable land use. In J. Kozub, ed. *Land and water resources management*. Washington, D.C.: Economic Development Institute of the World Bank: 301-317.
- Young, A. 1987c. Distinctive features of land use planning for agroforestry. *Soil Survey and Land Evaluation*, 7: 133-140.
- Young, A. 1987d. The potential of agroforestry for soil conservation. with special reference to vertisols. In M. Latham, P. Ahn et C.R. Elliott, ed. *Management of vertisols under semi-arid conditions*. Bangkok, Thailand, IBSRAM Proceedings 6: 187-199.
- Young, A. 1987e. Methods developed outside the international agricultural research systems. In A.H. Bunting, ed. *Agricultural environments: characterization, classification and mapping*. Wallingford, UK: CAB International: 43-64.
- Young, A. 1988. The potential of agroforestry for soil conservation In Sanarn Rimwanich, ed. *Land conservation for future generations: proceedings of the Fifth International Soil Conservation Conference*. Bangkok, Ministry of Agriculture and Cooperatives: 237-246.
- Young, A. 1989a. Dix hypothèses pour la recherche sols/agroforesterie. *L'agroforesterie aujourd'hui*, 1(1): 13-16.
- Young, A. 1989b. The environmental basis of agroforestry. In W.E. Reifsnyder et T. Darmhofer, ed. *Meteorology and agroforestry: proceedings of an international workshop on the application of meteorology to agroforestry systems planning and management*. Nairobi: ICRAF, 29-48.
- Young, A. 1991a. Soil fertility. In M.E. Avery, M.G.R. Cannell et C.K. Ong, ed. *Biophysical research for Asian agroforestry*. New Delhi, Winrock: 187-207.
- Young, A. 1991 b. Maintenance of soil fertility for sustainable production of trees and crops through agroforestry systems. In Tropical Agriculture research Center, ed. *Soil constraints on sustainable plant production in the tropics*. Tsukuba (Japan), Tropical Agriculture Research Center: 197-206.
- Young, A., Cheatle, R.J. et Muraya, P. 1987. *The potential of agroforestry for soil conservation. Part III. Soil changes under agroforestry (SCUAF): a predictive model*. ICRAF Working Paper 44. Nairobi: ICRAF, 90 p.
- Young, A. et Muraya, P. 1988. *Soil changes under agroforestry (SCUAF): a predictive model*. In Sanarn Rimwanich, ed. *Land conservation for future generations: proceedings of the Fifth International Soil Conservation Conference*. Bangkok, Ministry of Agriculture and Cooperatives: 655-667.
- Young, A. et Muraya, P. 1990. *Soil changes under agroforestry*. Computer program with user's handbook. Version 2. Nairobi: ICRAF, 124 p. et programme sur disquette.
- Young, A. et Pinney, A. 1989. Agroforestry and the TSBF Programme. In S.S.I. Ingram et M.S. Swift, ed. *Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) Programme: report of the Fourth TSBF International Workshop*. Special issue. *Biology International*, 20: 41 -52.
- Young, A. et Saunders, I. 1986. Rates of surface processes and denudation. In A.D. Abrahams, ed. *Hillslope processes*. Boston: Allen and Unwin: 3-30.
- Young, A. et Wright, A.C.S. 1980. Rest period requirements of tropical and subtropical soils under annual crops. In *Report of the second FAO/UNFPA expert consultation on land resources for the future*. Rome: FAO, 197-268.
- Young, A. and 12 others 1987. Assessment of land resources: group report. In D.J.. McLaren et B.J. Skinner, ed. *Resources and world development*. Chichester, UK: Wiley: 858-873.
- Zambia, Department of Agriculture 1977. *Land use planning guide*. Lusaka: Department of Agriculture, 256 p.
- Zhao Hua Zhu, 1986a, non publié. *Research on intercropping with Paulownia*. Document présenté à la 18ème conférence IURFO, Ljubljana, Yugoslavia, 1986.
- Zhao Hua Zhu, Chao Ching-Su, Lu Xin-Yu et Xiong Yao Gao, 1986b. *Paulownia in China: cultivation and utilization*. Singapore. Asian Network for Biological Sciences/Ottawa, IDRC, 65 p.
- Zimmerman, T. 1986. Agroforestry - a last hope for conservation in Haiti? *Agroforestry Systems* 4: 255-268.

Liste des abréviations utilisées

ACIAR:	Australian Centre for International Agricultural Research (Canberra, Australie)
AGILS (FAO):	Agriculture Department, Land and Water Development Division, Soil Resources, Management and Conservation Service (Rome, Italie)
ASA:	American Society of Agronomy (Ankena, Iowa, Etats-Unis)
ASAE:	American Society of Agricultural Engineers (St. Joseph, Michigan, Etats-Unis)
BOSTID:	Board of Science and Technology for International Development (Washington, DC, Etats-Unis)
CAB International:	Centre for Agriculture and Biosciences International (ex-Commonwealth Agricultural Bureaux International (Wallingford, Royaume Uni)
CATIE:	Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Ensenanza (Turrialba, Costa Rica)
CAZRI:	Central Arid Zone Research Institute (Jodphur, Inde)
CIAT:	Centro Internacional de Agricultura tropical (Cali, Colombie)
CREAMS:	Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems (Produits chimiques, ruissellement et érosion des systèmes de gestion agricole)
CTFT:	Centre technique forestier tropical (Nogent-sur-Marne, France)
DRS-CES:	Défense et restauration des sols-conservation des eaux et du sol
EDI:	Energy Development International (Washington, DC, Etats-Unis)
EPIC:	Erosion-productivity impact calculator (Calculateur de l'impact de l'érosion sur la productivité)
EWC:	East West Center (Honolulu, Hawaii, Etats-Unis)
FAO:	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (Rome, Italie)
projet FONC:	Projet Forêt/Nature/Conservation (Jojakarta, Indonésie)
GEMS (PNUE):	Global Environmental Monitoring System (Nairobi, Kenya)
GTZ:	Gesellschaft für Technische ZETats-UNismmenarbeit (Eschborn, Allemagne)
IAEA:	Agence internationale de l'énergie atomique (Vienne, Autriche)
IAHS:	International Association of Hydrological Sciences (Wallingford, Royaume Uni)
IBP (UNESCO):	International Biological Programme (Paris, France)
IBSRAM:	International Board for Soil Research and Management (Bangkok, Thaïlande)
ICAR:	Indian Council of Agricultural Research (New Delhi, Inde)
ICRAF:	International Centre for Research in Agroforestry (Nairobi, Kenya)
ICRISAT:	International Crop Research Institute for the Semi-Arid Tropics (Hyderabad, Inde)
IDRC:	International Development Research Centre (Ottawa, Canada)
IFAD:	International Fund for Agricultural Development (Rome, Italie)
IITA:	International Institute of Tropical Agriculture (Ibadan, Nigeria)
CIPEA:	Centre international pour l'élevage en Afrique (Addis Abeba, Ethiopie)
OIT:	Organisation internationale du travail (Genève, Suisse)
ILRI:	International Institute for Land Reclamation and Improvement (Wageningen, Pays-Bas)
INEAC:	Institut national pour l'étude agronomique du Congo (Kisangani, Zaïre)
IRRI:	International Rice Research Institute (Los Banos, Philippines)
ITC:	International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (Eindhoven, Pays-Bas)
IUFRO:	International Union of Forestry Research Organizations (Vienne, Autriche)
NFTA:	Nitrogen-Fixing Tree Association (Waianae, Hawaii, Etats-Unis)
NIFTAL:	projet Nitrogen Fixation of Tropical Agricultural Legumes (Paia, Hawaii, Etats-Unis)
ORSTOM:	Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (Paris, France)
SADC:	Southern Africa Development Coordination Conference (Gaborone, Botswana)
SIDA:	Agence suédoise internationale de développement (Stockholm, Suède)
SLEMSA:	Soil-Loss Estimation Model for Southern Africa
TSBF:	programme sur la biologie et la fertilité des sols tropicaux (Harare, Zimbabwe)
PNUE:	Programme des Nations unies pour l'environnement (Nairobi, Kenya)
UNESCO:	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (Paris, France)

UNFPA: United Nations Fund for Population Activities (New York, NY, Etats-Unis)
UPLB: Université des Philippines à Los Banos (Los Banos, Philippines)
USAID: United States Agency for International Development (Washington DC, Etats-Unis)
USDA: United States Department of Agriculture (Washington DC, Etats-Unis)
Equation de Wischmeier: Equation universelle de perte de sol

VAM: mycorhize vésiculaire arbusculaire
WMO: World Meteorological Organization (Genève, Suisse)

Réalisation
Olivier Guyaux Communication s.a.
Rue des Bollandistes, 23 - 1040 Bruxelles

Cet ouvrage a été réalisé par publication assistée par ordinateur

© by CTA. Tous droits de traduction et de reproduction réservés pour tous pays

ISBN 92 9081 130 7

[Version texte](#)