

Rôle des arbres fixateurs d'azote dans le maintien de la fertilité azotée des sols

F. GANRY, Y. DOMMERGUES

Résumé — Pour assurer la pérennité des rendements agricoles, il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodes tendant à équilibrer le bilan des éléments nutritifs. En ce qui concerne l'azote, cet équilibre peut être atteint par deux voies : la fixation d'azote par les plantes cultivées elles-mêmes et aussi par les arbres introduits dans les agrosystèmes et la fertilisation azotée. Si l'on considère uniquement le cas des arbres, nous montrons que leur contribution à l'équilibre azoté des agrosystèmes peut être importante à condition d'améliorer leur aptitude à fixer l'azote ou à remonter l'azote nitrrique lixivie. Les stratégies d'intervention doivent impérativement prendre en compte les conditions socioéconomiques : (a) les logiques paysannes en particulier pour accroître l'attrait du paysan pour les arbres fixateurs d'azote, il est recommandé de donner la préférence aux espèces produisant, en plus du bois, du fourrage à haute valeur protéique pour le bétail ou des fruits ou graines comestibles ; (b) la valorisation du travail (qui est souvent le facteur le plus rare) ; (c) la minimisation du risque et l'adaptabilité aux marchés ; (d) les problèmes fonciers ; (e) les problèmes juridiques de l'exploitation des ressources.

Mots-clés : agroforesterie, légumineuse, fixation de l'azote, inoculation, fertilisation azotée, zone tropicale.

Abstract — The role of nitrogen fixing trees in maintaining nitrogen fertility of soils. Ensuring the sustainability of farm yields requires the implementa-

tion of methods to balance nutrients. Balanced nitrogen supplies can be achieved in two ways. The first is to increase nitrogen fixation by cultivated plants and by trees included in agricultural systems and the second is nitrogen fertilisation. Trees can make a substantial contribution to the nitrogen balance of agricultural systems if their ability to fix nitrogen or their ability to retrieve leached nitrate is improved. Intervention strategies must take socioeconomic conditions into account. These include farmers' logic, especially increasing their interest in nitrogen-fixing trees. It is recommended that preference should be given to the species that not only give wood but also high protein forage for cattle or edible fruits or seeds. Optimal use should be made of labour (frequently the limiting factor), risks must be reduced and adaptation to markets must be assured. Attention should be paid to landholding problems and the legal problems of exploitation of resources.

Keywords: agroforestry, legume, nitrogen fixation, inoculation, nitrogen fertilisation, nitrogen fertility, tropical zone.

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: B* 16905 Ex: 1

Introduction

On admet que les arbres, qu'il s'agisse d'arbres fixateurs ou non fixateurs d'azote, exercent un effet favorable sur le maintien ou même l'amélioration de la fertilité des sols en faisant intervenir différents

... ..
... ..

mécanismes dont les trois principaux sont les suivants (YOUNG, 1986, a et b ; SANCHEZ, 1987 ; LAL, 1989) :

- redistribution des éléments nutritifs dans le profil ;
- réduction des pertes des éléments nutritifs par contrôle de l'érosion et amélioration des propriétés physiques des sols ;
- amélioration quantitative et qualitative de la fraction organique du sol.

Quant aux arbres fixateurs d'azote, qui sont soit des légumineuses (espèces associées symbiotiquement avec des rhizobiums), soit des plantes actinorhiziennes (espèces associées avec des frankias), ils possèdent la propriété remarquable de fixer l'azote de l'air. On peut donc supposer que ces espèces pourraient non seulement suffire à leurs propres besoins en azote mais aussi assurer, au moins partiellement, la nutrition azotée des cultures associées, notamment dans les sols déficients en azote et ainsi contribuer à assurer l'établissement de ce qu'il est convenu d'appeler une agriculture durable. En fait, ce rôle des arbres fixateurs d'azote ne semble pas toujours clairement établi car les essais au champ ont donné des résultats discordants. C'est ainsi que, si certaines expériences montrent indiscutablement l'effet bénéfique des arbres fixateurs d'azote, d'autres au contraire indiquent qu'il peuvent causer un épuisement du sol (LUNDGREN, 1978). On verra, au cours

de cet exposé, que ces résultats contradictoires s'expliquent parfaitement si l'on prend en compte les concepts suivants (qui malheureusement sont encore trop souvent ignorés) :

- toutes les espèces de légumineuses ne sont pas fixatrices d'azote : c'est le cas notamment des légumineuses appartenant à la sous-famille des césalpinia-cées dont 23 % seulement des espèces examinées nodulent, d'après GILLER et WILSON (1991), et nombre d'entre elles présentent des variations intraspécifiques parfois considérables de leur potentiel fixateur d'azote ;
- divers facteurs environnementaux peuvent limiter ou même inhiber la fixation d'azote au champ car ce processus est souvent plus sensible aux contraintes du milieu que le végétal lui-même ;
- le bilan azoté d'un écosystème comportant des espèces fixatrices d'azote peut être négatif si les exportations d'azote dépassent les intrants.

D'après YOUNG (1986a), on peut distinguer cinq principaux systèmes d'exploitation des arbres : foresterie de protection, foresterie de réhabilitation, foresterie de production, agroforesterie, aménagement des bassins versants. Il convient d'ajouter maintenant la foresterie urbaine en raison de son développement dans toutes les régions du monde.

La figure 1 représente schématiquement les flux d'azote entre et à l'intérieur des trois pools d'azote

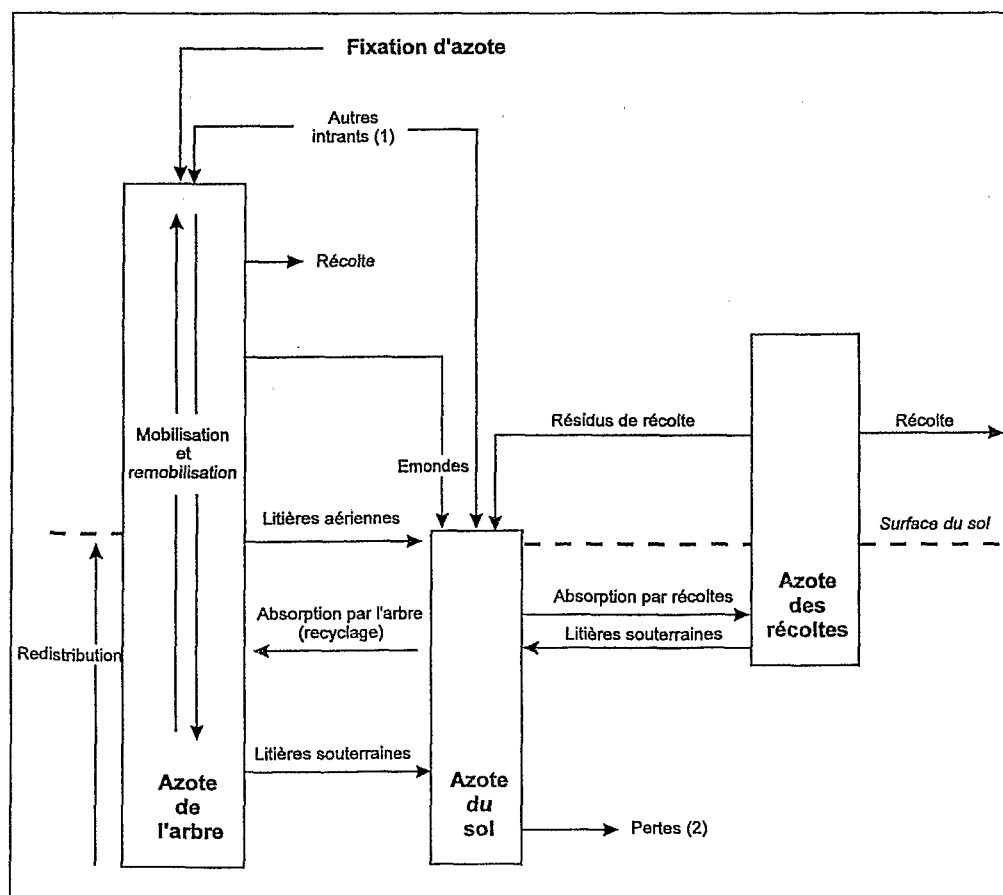


Figure 1. Les trois principaux pools de l'azote (azote de l'arbre, azote du sol et azote des récoltes) et les intrants et extrants (pertes) dans un système agroforestier constitué par un arbre fixateur d'azote et une récolte annuelle associée. (1) intrants autres que la fixation d'azote : dépôts secs et humides, absorption de NH_3 , irrigation, apports par alluviation, eau du sous-sol. (2) extrants (pertes) : lessivage, drainage, érosion par l'eau, érosion par le vent, pertes gazeuses (dénitrification, volatilisation de NH_3).

dans le cas d'un écosystème non fertilisé constitué par un arbre fixateur d'azote phréatophyte associé à une culture annuelle : pool d'azote de l'arbre, pool d'azote du sol et pool d'azote de la culture associée. L'apport d'azote résulte de la fixation d'azote et des apports par les pluies et les poussières (dépôts secs et humides), ceux-ci étant en moyenne de l'ordre de 3 à 10 kg d'azote/ha/an. Les pertes sont constituées essentiellement par les exportations, la volatilisation, la dénitrification, le lessivage et l'érosion. Nous nous intéresserons ici essentiellement à la fixation de l'azote et aux transferts (flux) entre pools d'azote dans le cadre des écosystèmes agroforestiers et forestiers.

Fixation biologique de l'azote par l'arbre

Il est essentiel de déterminer avec autant de précision que possible l'entrée d'azote dans chaque écosystème renfermant une espèce fixatrice d'azote. Les méthodes appliquées pour effectuer de telles mesures ne seront pas détaillées. Ces méthodes (il s'agit essentiellement de méthode des bilans, méthode par différence, méthodes isotopiques — notamment méthode dite de la dilution isotopique, méthode de la valeur A et méthode de l'abondance naturelle de ^{15}N —, évaluation de la nodulation, détermination des uréides et amidés dans la sève du xylème ou méthode de réduction de l'acétylène) ont fait l'objet d'excellentes publications (PEOPLES *et al.*, 1989 ; DANSO *et al.*,

1992). Dans le cas des arbres, l'évaluation de la fixation d'azote est compliquée par l'interférence de processus spécifiques liés à la nature pérenne de ces végétaux.

Concept de potentiel fixateur d'azote et de fixation réelle d'azote

Pour une espèce donnée d'arbre associée à une bactérie fixatrice donnée, la quantité d'azote qu'elle fixe varie considérablement avec les conditions climatiques et édaphiques. Si l'on se trouve dans le cas idéal où aucun facteur limitant n'intervient, l'arbre peut exprimer pleinement son potentiel fixateur d'azote (PFN). Mais si un facteur limitant intervient, la fixation d'azote est réduite dans des proportions variables. On mesure alors la fixation d'azote réelle (FNR). Le tableau I montre clairement qu'un arbre, tel que *Casuarina equisetifolia* peut fixer des quantités d'azote importantes lorsqu'il est cultivé dans des conditions optimales ou suboptimales, le PFN atteignant alors 42,2-42,4 g d'azote fixé/arbre/an (soit environ 80 kg/ha/an en extrapolant à une plantation renfermant 2 000 arbres/ha). Au champ, dans des conditions semi-arides, la FNR de cette même espèce est réduite sous l'effet de contraintes climatiques et édaphiques. Elle est seulement de 4,3 à 6,0 g d'azote fixé/arbre/an à la station de Notto et de 29,0 g à celle de Malika. La différence entre les deux stations peut être attribuée au fait que le sol de la station de Notto est plus pauvre que celui de la station de Malika de

Tableau I. Potentiel fixateur d'azote et fixation réelle d'azote chez *Casuarina equisetifolia*.

N° expérience et site	Méthode de mesure (a)	Age	Azote fixé par arbre (valeur cumulée)	Azote fixé par arbre et par an (moyenne)	Références (b)
Potentiel fixateur d'azote (c)					
1. Bel-Air (Dakar)	TND	24 mois	84,8 g	42,4 g	(1)
	AV	24 mois	84,4 g	42,2 g	
Fixation réelle d'azote					
2. Notto	TND	3 ans	13,4 g	4,5 g	(2)
3. Notto	TND	3 ans	18,0 g	6,0 g	(3)
	NA	3 ans	13,0 g	4,3 g	
4. Malika	Bal.	13 ans	377,0 g (d)	29,0 g	(4)

(a) Méthode de mesure de la fixation d'azote : TND, méthode par différence ; AV, valeur A ; Bal., méthode des bilans ; NA, abondance naturelle de ^{15}N .

(b) Références : (1) Sougoufara *et al.* (1990) ; (2) Sougoufara *et al.* (1989) ; (3) Mariotti *et al.* (1992) ;

(4) Dommergues (1963).

(c) Arbres cultivés dans des conditions optimales d'irrigation et de fertilisation en conteneurs de 1 m³.

(d) En admettant que la densité de plantation est de 2 000 arbres/ha.

plus, la station de Notto est située à 5 km de la mer, alors que celle de Malika est en bordure de la côte, elle bénéficie ainsi de précipitations occultes non négligeables (embruns marins et rosées nocturnes). Il est aussi possible que les écarts observés résultent, au moins partiellement, du fait que les méthodes employées pour les évaluations étaient différentes.

Fixation potentielle d'azote

Il est bien établi que la fixation potentielle (PFN) dépend non seulement de caractéristiques génétiques de la bactérie associée (rhizobium ou frankia) mais aussi, et souvent très largement, de celles de la plante hôte. La dépendance à l'égard des souches bactériennes est bien connue. Le graphique concernant *Acacia mangium* (figure 4) illustre parfaitement ce fait : la quantité fixée par les semis est douze fois plus élevée avec la souche 23c qu'avec la souche CB756. Dans les projets forestiers ou agroforestiers mis en place jusqu'à présent, à part quelques exceptions (BRUNCK *et al.*, 1990), on ne s'est pas préoccupé de ce caractère essentiel désigné sous le terme d'effectivité (aptitude d'une souche de rhizobium ou frankia à fixer l'azote en symbiose). On verra en fin d'article les stratégies qu'il convient d'adopter pour obtenir la meilleure fixation d'azote.

En ce qui concerne le rôle de l'arbre lui-même dans la symbiose, il est considérable, comme le montre le classement provisoire suivant. Ce classement est fondé à la fois sur des données de nodulation et de fixation d'azote déterminées dans des conditions environnementales aussi favorables que possible.

Les espèces à PFN élevé sont les suivantes :

Leucaena leucocephala ;
Calliandra spp. ;
Casuarina equisetifolia, *C. glauca*,
C. cunninghamiana ;
Acacia mearnsii (synonyme : *mollissima*)
A. mangium, *A. auriculiformis*, *A. crassicarpa* ;
Gliricidia sepium ;
Sesbania spp.

Les espèces à PFN moyen sont les suivantes :

Prosopis juliflora ;
Acacia saligna (synonyme : *cyanophylla*).

Les espèces à PFN faible sont les suivantes :

Acacia raddiana, *A. senegal*, *A. cyclops* ;
Faidherbia albida ;

Les espèces à PFN nul sont les suivantes (les légumineuses non nodulantes figurant dans la liste ci-dessous appartiennent toutes à la sous-famille des césalpiniacées à l'exception de *Parkia biglobosa*, qui est une mimosacée) :

Bauhinia sp. ;
Cassia siamea ;

Ceratonia siliqua ;
Parkia biglobosa ;
Parkinsonia aculeata ;
Tamarindus indica.

Ce classement sera certainement affiné à l'avenir lorsque les informations concernant les différences entre les provenances seront disponibles. En première approximation on peut considérer qu'une espèce à PFN élevé peut fixer au moins 30-50 g d'azote/arbre/an au cours des premières années, ce qui correspond à une fixation de 60-100 kg d'azote/ha/an pour une plantation comprenant 2 000 arbres/ha.

Fixation réelle d'azote

On a déjà indiqué que la fixation réelle d'azote (FNR) était en fait presque toujours inférieure à la FNP car elle est limitée par des facteurs environnementaux. La plupart de ces facteurs sont les mêmes que ceux qui affectent la croissance des végétaux ; mais les seuils peuvent différer sensiblement. C'est ainsi qu'en ce qui concerne la tolérance à la salinité, la tolérance de la bactérie symbiotique est plus grande que celle de la plante hôte.

Il est un facteur qui, bien que favorable à la croissance du végétal, ralentit ou même inhibe la fixation d'azote : c'est l'excès d'azote disponible (azote minéral et minéralisable) dans le sol. Les premières observations dont nous disposons suggèrent que, dans une plantation fermée, la fixation de l'azote a tendance à diminuer avec l'âge par suite de l'accumulation progressive d'azote disponible. L'accroissement de la teneur du sol en azote disponible dans une plantation vieillissante serait responsable de la raréfaction de la nodulation, souvent observée dans beaucoup de peuplements âgés. Il est probable que la durée de fixation active d'une plantation varie considérablement suivant les espèces ligneuses considérées, la densité de la plantation et les conditions édaphiques et climatiques. A ce propos, il convient de signaler que la nodulation peut se maintenir et la fixation d'azote rester active très longtemps : c'est le cas des plantations d'une vingtaine d'années de *Casuarina equisetifolia*, au Sénégal ou d'*Allocasuarina verticillata*, en Tunisie.

Les chiffres de fixation d'azote sont en général exprimés en kg d'azote fixé/ha/an mais on ne dispose bien souvent d'aucune information concernant la densité des plantations, ce qui rend les comparaisons difficiles. On se limitera ici à donner quelques exemples tirés de la revue de DANSO *et al.* (1992) : *Leucaena leucocephala*, 110-548 ; *Sesbania sesbania*, 43-102 ; *Albizia lebbeck*, 94 ; *Gliricidia sepium*, 13-108 ; *Inga jinicuil*, 35 kg d'azote fixé/ha/an. On trouvera d'autres exemples dans la revue de SUTHERLAND et SPRENT (1993).

Particularités de la nodulation chez les arbres

La nodulation chez les arbres peut présenter trois caractéristiques particulières qu'on ne retrouve pas ou plus rarement chez les plantes annuelles : elle peut être pérenne, profonde ou aérienne. La nodulation peut être pérenne, c'est la règle chez les espèces actinorhiziennes. Chez les légumineuses, les nodules pérennes semblent plus rares. Nous les avons pourtant observés chez un certain nombre d'espèces, telles qu'*Albizia lebbek*, à condition qu'elles soient bien alimentées en eau toute l'année. La pérennité des nodules présente un avantage certain puisque la fixation d'azote peut repartir dès que les conditions sont favorables : il n'est pas nécessaire d'attendre une nouvelle infection, processus qui requiert des conditions plus difficiles à réunir que la reprise de l'activité à partir de nodules déjà existants (REDDELL, 1993). La nodulation profonde a été observée chez des espèces phréatophytes appartenant aussi bien à la famille des légumineuses, par exemple chez *Prosopis juliflora* (FELKER, CLARK, 1982 ; JENKINS *et al.*, 1988) que chez les espèces actinorhiziennes comme *Allocasuarina decaisneana*, espèce pour laquelle les nodules ont été trouvés à des profondeurs supérieures à 10 m (REDDELL, 1993). Cette caractéristique présente l'avantage de permettre à l'arbre de continuer à fixer l'azote même lorsque les horizons supérieurs du sol sont desséchés. La nodulation aérienne est connue depuis longtemps chez un certain nombre de légumineuses annuelles appartenant notamment aux genres *Sesbania* et *Aeschynomene*. Elle a aussi été signalée récemment chez des espèces pérennes telles que *Aeschynomene elaphroxylon*, *Pentaclethra maculosa*, *Casuarina cunninghamiana* et *C. glauca* (DUHOUX *et al.*, 1993). La nodulation aérienne conférerait à l'arbre une indépendance indéniable face à diverses contraintes du milieu, notamment l'excès d'azote disponible, l'engorgement ou la toxicité de certains éléments.

Transferts d'azote entre les différents pools d'azote

Modalités spécifiques d'intervention des arbres dans les transferts d'azote

Les modalités d'intervention des arbres dans les transferts d'azote diffèrent de celles des plantes annuelles en raison de leur caractère pérenne, de leur physiologie et de leur architecture ; il s'agit du recyclage partiel de l'azote, de la mobilisation et de la remobilisation de l'azote dans les tissus même de l'arbre et de

la redistribution de l'azote dans les profils du sol. Ces modalités d'intervention se retrouvent chez tous les arbres mais peuvent comporter des variantes particulières aux arbres fixateurs d'azote, variantes qui sont explicitées ci-dessous.

Recyclage partiel de l'azote par l'arbre

Tous les arbres réutilisent (on dit aussi recyclent) en partie l'azote minéralisé à partir de leurs propres litières, litières aériennes (feuilles, rameaux, fleurs et fruits) et litières souterraines (résidus racinaires, desquamation et exudations racinaires ; nodules) qui se décomposent dans le sol sous l'effet de la microfaune et des micro-organismes. Il faut ajouter au flux d'azote provenant des litières le flux d'azote qui résulte du lessivage des houppiers et du ruissellement de l'eau le long des troncs (*stem-flow*). Dans le cas des arbres fixateurs d'azote, l'azote provient à l'origine non seulement du sol mais aussi de l'air (par fixation). Le recyclage partiel de l'azote a été clairement mis en évidence par l'expérience de VAN KESSEL *et al.* (1994), déjà citée plus haut, qui a consisté à suivre les variations en fonction du temps de l'abondance naturelle de ^{15}N dans un peuplement dense de *Leucaena leucocephala* comportant un sous-bois d'espèces non-fixatrices d'azote (figure 2). Le $\delta^{15}\text{N}$ des tissus des branches et des feuilles de l'arbre a diminué pendant les six années qui ont suivi la mise en place de la plantation. Cette diminution a été particulièrement nette pour les jeunes feuilles dont le $\delta^{15}\text{N}$ était de 3,9 ‰ quand la plantation avait 1 an ; 2,7 ‰ à 2 ans ; 1,7 ‰ à 4 ans et 1,5 ‰ à 6 ans. Parallèlement le $\delta^{15}\text{N}$ des espèces du sous-bois tombait de 7,3 ‰ à 1 an à 3,4 ‰ à 2 ans, 0,7 ‰ à 4 ans et 0,9 ‰ à 6 ans. A la sixième année, le $\delta^{15}\text{N}$ des

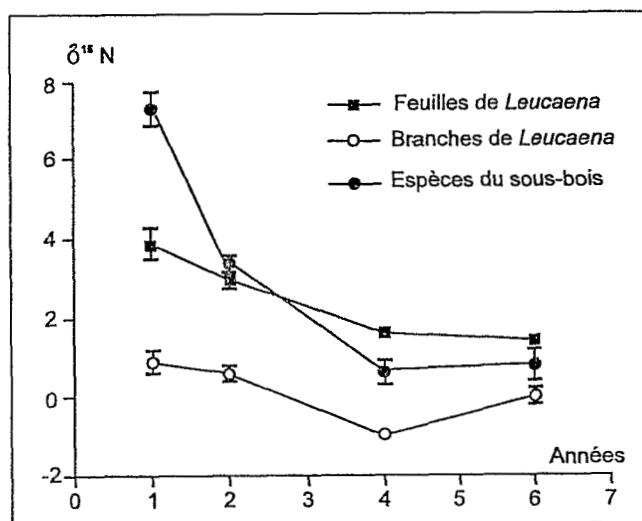


Figure 2. Variation en fonction du temps des valeurs moyennes du taux en azote ($\delta^{15}\text{N}$) des feuilles et branches de *Leucaena leucocephala* et des plantes non fixatrices d'azote du sous-bois (VAN KESSEL *et al.*, 1994).

végétaux du sous-bois et celui de *L. leucocephala* étaient sensiblement les mêmes. Ces résultats montrent qu'à la fin de la période de 5-6 ans :

- *L. leucocephala* avait puisé l'azote nécessaire dans le même pool du sol que les plantes du sous-bois (c'est le phénomène de recyclage) ;

- il y avait eu transfert de l'azote fixé par l'arbre vers les plantes non fixatrices de l'azote du sous-bois.

Le pourcentage d'azote recyclé par les arbres fixateurs d'azote doit *a priori* être inférieur au pourcentage recyclé par les arbres non fixateurs (qui est d'au moins 20 %) puisque les arbres fixateurs disposent d'une source d'azote supplémentaire : l'azote provenant de la fixation. C'est effectivement ce que l'on observe pour l'aulne (3 %) et *Acacia holosericea* (LANGKAMP *et al.*, 1982 ; WHEELER, 1991).

Mobilisation et remobilisation de l'azote dans l'arbre

Comme chez tous les autres arbres, les réserves azotées (résultat d'un processus de mobilisation) à l'intérieur même du pool d'azote des arbres fixateurs d'azote, subissent une remobilisation et des transferts qui peuvent être importants puisque, d'après DOMENACH et KURDALI (1989), 10 % des réserves azotées d'*Alnus glutinosa* sont mobilisées et transférées pour la repousse.

Redistribution de l'azote dans le profil du sol

Comme tous les autres arbres, les arbres fixateurs d'azote remontent en surface des éléments nutritifs, notamment l'azote minéral, qui se trouvent ou qui ont été lessivés dans les horizons profonds. Les espèces phréatophytes remontent en outre des éléments nutritifs de nappe phréatique, qui peut être très profonde (plus de 30 m) (JENKINS *et al.*, 1988 ; DUPUY et DREYFUS, 1992). Parmi les autres éléments redistribués en surface, le phosphore occupe une place importante surtout dans le cas où les arbres sont mycorhizés (WHEELER, 1991).

Transferts de l'azote des arbres vers le sol

Plantations forestières

Dans un sol sodique de la station de Banthra, Lucknow (Inde), la teneur en azote du sol (originellement de 0,02 %) a été quadruplée sous une plantation d'*Acacia nilotica* et multipliée par six sous une plantation de *Prosopis juliflora*, en l'espace de huit ans (GARG et JAIN, 1992). Au Sénégal, dans un reboisement de *Casuarina equisetifolia* âgé de treize ans, on a trouvé que le stock d'azote du sol était de 309 kg/ha alors que dans le sol hors reboisement ce

stock était seulement de 80 kg/ha, ce qui correspond approximativement à un stock d'azote quadruplé (DOMMERMUES, 1963). Plus récemment, MAILLY et MARGOLIS (1992) ont trouvé que le stock d'azote du sol sous des plantations de *C. equisetifolia* situées dans la même région était d'environ 1 567 kg/ha ; cette évaluation est probablement nettement plus élevée que la précédente parce qu'elle correspond à des plantations sensiblement plus âgées (17-34 ans) et à des sites différents.

Les exemples que nous venons de donner ont trait à des plantations non exploitées. Lorsqu'il s'agit de plantations exploitées pour leur biomasse, la situation

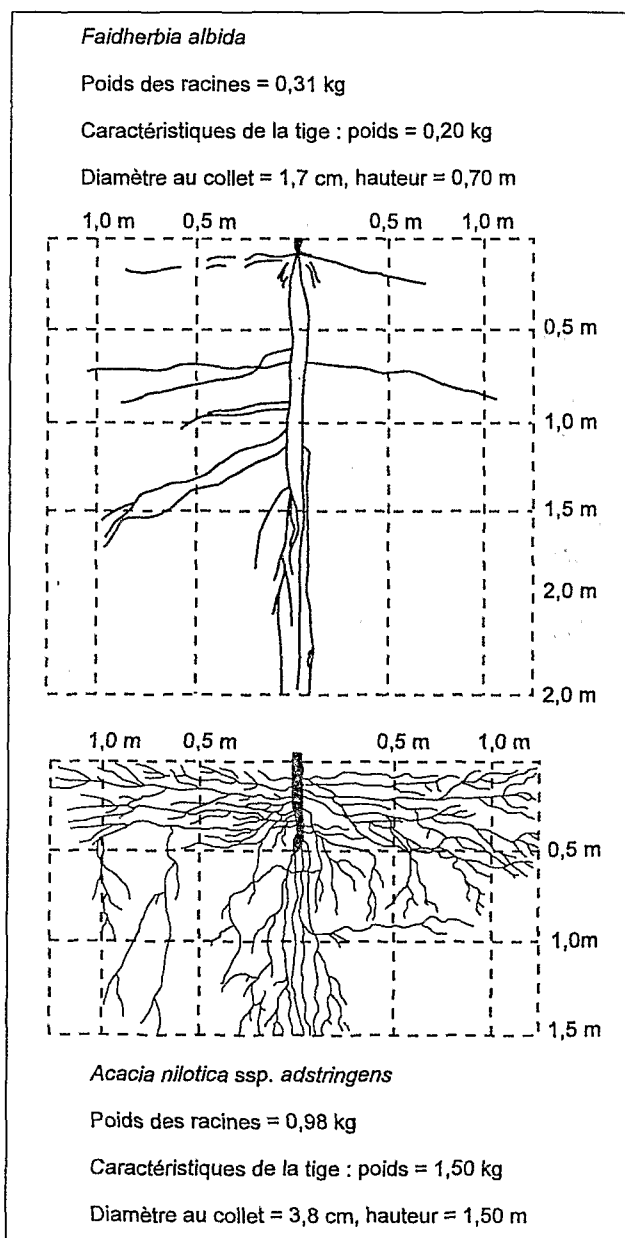


Figure 3. Systèmes racinaires d'*Acacia nilotica* et de *Faidherbia albida* âgés de trente-deux mois plantés dans un sol ferrugineux tropical très sableux, à la station de Thienaba, Sénégal (CAZET, 1989).

est variable. Dans certains cas, le bilan azoté du sol est positif, probablement parce que la fixation d'azote est très active. C'est ainsi qu'une étude déjà ancienne portant sur la comparaison de six sites plantés en *Acacia mollissima* (synonyme : *A. mearnsii*) et six sites témoins non plantés en Afrique du Sud a montré qu'après trente années de culture d'*A. mollissima* (trois rotations) la teneur moyenne en azote des sols était passée de 0,35 % à 0,53 %, ce qui correspond à un apport moyen d'azote de 180 + 40 kg/ha/an (ORCHARD et DARBY, 1956).

Mais le bilan d'azote sous plantation forestière peut être négatif si les coupes exportent plus d'azote qu'il n'en a été fixé. Considérons, par exemple, l'étude effectuée en Malaisie par HALENDA (1989), qui montre que la totalité de la biomasse aérienne d'une plantation d'*Acacia mangium*, âgée de 6,8 ans renferme 616,0 kg d'azote/ha (tableau II). Si les exportations portaient sur la totalité de cette biomasse, les pertes d'azote seraient considérables et l'on aboutirait ainsi à l'épuisement du stock d'azote du sol. Pour diminuer ces pertes il faudrait limiter l'exploitation au bois seul, d'où une perte moindre, soit 284,2 kg d'azote par hectare en six ans. En fait, il faut ajouter aux pertes dues à l'exploitation, celles qui résultent des autres processus, à savoir le lessivage, l'érosion et

le drainage, la volatilisation de l'azote ammoniacal, la dénitrification et les exportations par les récoltes (WETSELAAR et GANRY, 1982 ; GANRY, 1990) qui pourraient atteindre au moins 10-20 kg/ha/an. En d'autres termes, pour obtenir un bilan d'azote équilibré en l'absence d'apport d'engrais azoté et en limitant les exportations au seul bois, il serait nécessaire que la fixation d'azote atteigne ou dépasse 50-60 kg/ha/an.

Agroforesterie

Il est clair que les arbres fixateurs d'azote peuvent apporter au sol des quantités significatives d'azote, contribuant ainsi à la nutrition des plantes cultivées associées (tableau III). Mais dans la plupart des cas, cet apport n'est pas suffisant pour prévenir une diminution de la teneur du sol en azote suivant tout défrichement de forêt. C'est ainsi que dans un alfisol tropical du sud du Nigeria, la teneur en azote du sol immédiatement après défrichement de la végétation arborée (forêt secondaire de cinq ans) était de 0,214 % dans l'horizon 0-5 cm et 0,134 % dans l'horizon 5-10 cm en 1982 ; après mise en culture en maïs-niébé (*Vigna unguiculata*), en l'absence de haies de *Leucaena* la teneur en azote est tombée à 0,038 % dans l'horizon 0-5 cm (soit 17 % de la teneur origi-

Tableau II. Biomasse et teneur en azote de différentes composantes d'une plantation d'un hectare d'*Acacia mangium* âgée de 6,8 ans (HALENDA, 1989).

Composante	Biomasse (poids sec)		Azote	
	t/ha	%	kg/ha	%
Fruits et fleurs	0,6	0,5	14,7	2,4
Feuilles	4,7	3,8	148,1	24,0
Rameaux (diamètre < 1 cm)	2,9	2,4	24,9	4,0
Branches (diamètre > 1 cm)	12,4	10,0	111,5	18,1
Branches mortes	5,2	4,2	32,6	5,3
Troncs	97,4	79,0	284,2	46,1
Total	123,2		616,0	

Tableau III. Caractéristiques chimiques du sol (horizon 0-15 cm) avant et six mois après plantation de *Leucaena leucocephala* (SANGINGA et al., 1988).

Historique du sol	pH	C (%)	N total (%)	P*
Sol avant <i>Leucaena</i>	6,10	0,85	0,07	6,46
Sol après <i>Leucaena</i>				
Non inoculé	6,70	1,33	0,12	20,00
Inoc. IRC1050	6,63	1,27	0,13	14,13
Inoc. IRC 1045	6,63	1,81	0,15	21,56
LSD 5 %	0,28	0,26	0,05	18,05

(* P assimilable en mg P par kg de sol).

nale en azote) et 0,042 % dans l'horizon 5-10 cm (soit 31 % de la teneur originale en azote) en 1986. Dans le cas de la culture en couloirs avec haies de *Leucaena* (avec application des émondés sur le sol) la teneur en azote du sol a diminué, mais dans de moindres proportions, puisqu'elle est tombée à 0,103 % (26 % de la teneur originale en azote) dans l'horizon 0-5 cm et 0,090 % (48 % de la teneur originale en azote) dans l'horizon 5-10 cm en 1986 (LAL, 1989). Les pertes d'azote sont probablement dues en majeure partie aux exportations des cultures successives de maïs-niébé ainsi qu'à des pertes d'origine physique (érosion, lessivage ou volatilisation) ou microbiologique (dénitrification). Ces différentes pertes ont été partiellement compensées par l'association avec le *Leucaena*.

Dans le cas des arbres poussant spontanément, on peut supposer que le niveau relativement élevé de fertilité observé sous un arbre, ou à proximité, a précédé l'installation de l'arbre et n'en est donc pas la conséquence (SANCHEZ, 1987). C'est à cette possibilité que fait allusion GEIGER *et al.* (1992) dans le cas de *Faidherbia albida*. Seules des expérimentations précises conduites dans différents milieux pourront permettre de valider ou d'invalider cette hypothèse.

Transferts de l'azote des arbres aux cultures associées

Dans le cas des légumineuses annuelles, le transfert de l'azote fixé à une non-légumineuse ne semble pas toujours se réaliser, ce qui suggère qu'il dépendrait de certaines conditions encore mal connues (FUJITA *et al.*, 1992 ; ANDERSON et SINCLAIR, 1993). Mais, dans le cas des arbres fixateurs d'azote, le transfert de l'azote fixé par l'arbre à la plante non-fixatrice d'azote associée ne semble faire aucun doute. L'expérience de VAN KESSEL *et al.* (1994), citée plus haut, montre en effet sans ambiguïté qu'il y a transfert de l'azote fixé aux plantes du sous-bois. Ce transfert peut évidemment aussi concerner des cultures associées simultanément ou séquentiellement. Bien entendu le transfert ne porte pas sur la totalité de l'azote fixé puisqu'on a vu que l'arbre réabsorbait une partie de l'azote provenant de la fixation et que des pertes pouvaient intervenir simultanément. Nous disposons seulement de quelques données concernant les transferts d'azote des systèmes agroforestiers, qui sont d'ailleurs très divers (VON CARLOWITZ, 1989), et nous nous limiterons aux systèmes suivants : cultures en couloirs, parcs arborés, jachères forestières, amendements avec des composts.

Cultures en couloirs

Dans le cas des cultures en couloirs (*alley cropping*), les cultures sont installées dans des couloirs entre des

haies d'arbres souvent fixateurs d'azote, appartenant notamment aux genres *Erythrina*, *Gliricidia*, *Inga*, *Leucaena*, *Mimosa*, *Robinia* et *Sesbania*. Les arbres sont régulièrement émondés (*lopped*) et les émondés (*prunings*) sont appliqués sur le sol cultivé, où elles constituent un engrais vert (*green manure*) ou un mulch. Il est admis que cette pratique améliore très significativement les rendements de la culture associée aussi bien sous climat humide que sous climat semi-aride (XU *et al.*, 1993). Une partie de l'azote fixé est transférée aux cultures par les émondés. Dans le cas de *L. leucocephala*, les émondés apportent de 110 à 580 kg d'azote (SANGINGA *et al.*, 1988) mais l'azote apporté par ces émondés est mal utilisé par le maïs. C'est ainsi qu'une expérience conduite dans le sud du Nigeria a montré que, dans le cas où les émondés de *L. leucocephala* apportent 300 kg d'azote/ha, cet apport équivaut seulement à 34-41 % d'une application de 80 kg/ha de sulfate d'ammonium. Cette faible efficacité s'expliquerait par le fait que les feuilles et les rameaux de *L. leucocephala* libèrent rapidement leur azote, soit 50 % au cours des quatre premières semaines suivant leur application sur le sol (MULONGOY, 1983) et que cet azote minéralisé est probablement perdu en grande partie par volatilisation ou lessivage (SANGINGA *et al.*, 1988). *L. leucocephala* a été longtemps utilisé mais depuis les ravages causés par le psylle (BREWBAKER, 1987), on a dû faire appel à d'autres espèces (VAN DEN BELT, 1992b). Une autre partie de l'azote fixé par l'arbre des haies est transférée aux cultures par les litières racinaires (y compris les nodules) et foliaires. Dans le cas de l'expérience conduite au sud du Nigeria, décrite plus haut, la quantité d'azote transféré par cette voie serait sensiblement la même que la quantité apportée par les émondés (SANGINGA *et al.*, 1988).

On peut faire la remarque suivante :

Pour comparer une polyculture (par exemple, le maïs et *L. leucocephala*) et une monoculture (par exemple, le maïs), on utilise souvent un indice appelé ISE (indice de surface équivalente) et en anglais, LER (*Land Equivalent Ratio*). C'est la surface des monocultures qui serait nécessaire pour obtenir un rendement équivalent à celui d'un hectare d'une polyculture. On calcule cet indice en utilisant la formule suivante :

$$ISE = r A p / r A m + r B p / r B m$$

où $r A p$ est le rendement à l'hectare de l'espèce A en polyculture ;

$r A m$ est le rendement à l'hectare de l'espèce A en monoculture ;

$r B p$ est le rendement à l'hectare de l'espèce B en polyculture ;

et $r B m$ est le rendement à l'hectare de l'espèce B en monoculture (MEAD, 1986 ; ANDERSON et SIN-

CLAIR, 1993). Soit, par exemple, une culture de maïs en couloirs entre des haies de *L. leucocephala*. Si le rendement en grain du maïs (r A m) est de 4,5 t/ha en monoculture et de 3,6 t/ha (r A p) en culture en couloirs et si le rendement du *L. leucocephala* en fourrage (r B m) est de 6,5 t/ha en monoculture et 2,6 t/ha en culture en couloirs (r B p), on a alors :

$$ISE = 3,6 / 4,5 + 2,6 / 6,5 = 1,2$$

Le rendement d'un hectare de culture en couloirs équivaut donc au rendement d'une surface de 1,2 hectare de monoculture ; en d'autres termes, la culture en couloirs est 20 % plus productive que les monocultures de maïs ou de *L. leucocephala*. L'interprétation de l'ISE a été discutée récemment par RAO et COE (1992). L'ISE pourrait être utilisé pour comparer l'effet des arbres fixateurs et non fixateurs d'azote.

Parcs à *Faidherbia albida* ou *Prosopis cineraria*

Les parcs à *Faidherbia albida* (Sahel) ou *Prosopis cineraria* (Inde) sont considérés comme d'excellents systèmes agroforestiers. On a depuis longtemps remarqué que les rendements des cultures installées sous ces arbres étaient très significativement plus élevés qu'en dehors de leur couvert (MUTHANA, 1985 ; CTFT, 1988 ; ARYA *et al.*, 1991 ; VAN DEN BELT, 1992a). Mais dans le cas de *Faidherbia albida*, en zone sahélienne (100-500 mm de pluies par an), l'amélioration de la fertilité sous le couvert de cette espèce n'est probablement pas due à la fixation d'azote car on sait maintenant que la FPN de cette espèce est faible, nettement inférieure à celle de plusieurs acacias, tels qu'*A. seyal* (GUEYE, communication personnelle). La FNR de *Faidherbia albida* déterminée en conditions semi-arides en faisant appel à la méthode de l'abondance naturelle, est également faible (SCHULZE *et al.*, 1991), ce qui n'est pas surprenant étant donné que, dans ces conditions, la nodulation est pratiquement inexistante. En revanche, sous des climats plus humides (1 000-1 500 mm de pluies par an), par exemple en Casamance, où la nodulation est abondante (DUPUY et DREYFUS, 1992), la contribution de la fixation d'azote à l'amélioration de la fertilité du sol ne serait pas négligeable. Toutefois, jusqu'à présent, on ne possède pas de données sur le flux d'azote correspondant. Les données sur la FNR de *Prosopis cineraria* sont encore insuffisantes pour permettre d'apprécier la contribution de cet arbre à l'approvisionnement en azote du sol.

Jachères améliorées (jachères forestières)

La jachère forestière améliorée est une plantation d'arbres fixateurs d'azote insérée dans le cycle cultural. C'est probablement un des systèmes agroforestiers les plus réalistes à condition que la phase de culture ne soit pas trop longue et ne conduise pas à

des modifications irréversibles du milieu. Le système suivant aurait été expérimenté en zone sahélienne. *Acacia senegal* est cultivé pendant une dizaine d'années. La végétation est ensuite brûlée pour faire une ou deux cultures de sorgho. Les jeunes semis d'*A. senegal* se réinstallent spontanément sur sol laissé en jachère. Puis le cycle recommence (ANDERSON et SINCLAIR, 1993). Pendant de nombreuses années, à l'île de la Réunion, on a cultivé avec succès le géranium en alternance avec une jachère à *Acacia mollissima*. Une expérimentation a été mise en place tout récemment par le CIRAD en Côte d'Ivoire pour comparer l'effet sur la teneur en azote total du sol et sur le rendement en maïs de quatre types de jachères forestières (*Acacia mangium*, *A. auriculiformis*, *Albizia lebeck* et *Leucaena leucocephala*) et d'une jachère naturelle herbacée (*Chromolaena odorata*, synonyme : *Eupatorium odoratum*).

Les résultats préliminaires sont les suivants :

– l'effet de la jachère sur la teneur en azote total du sol et aussi sur la quantité d'azote absorbée par le maïs (exprimée en g/m²) varie très sensiblement avec l'espèce d'arbre utilisée (tableau IV). *Albizia lebeck* avec *A. mangium* semblent être les espèces les plus performantes alors qu'*Acacia auriculiformis* est décevante ;

– la pratique du brûlis de la jachère forestière présente, par rapport à l'absence de brûlis (mulch des résidus de la jachère forestière), l'avantage de libérer rapidement des quantités relativement importantes d'azote minéral, mais l'inconvénient de minimiser la réponse à la fertilisation minérale lorsque celle-ci est appliquée (OLIVER, communication personnelle).

Tableau IV. Effet de jachères forestières de quatre ans à *Acacia mangium*, *A. auriculiformis*, *Albizia lebeck* et *Leucaena leucocephala* et d'une jachère naturelle à *Eupatorium* sp. du même âge sur la teneur du sol (horizon 0-15 cm) en azote total et sur l'absorption d'azote par le maïs (R. OLIVER, communication personnelle, 1993).

Espèce utilisée	Teneur azote total (N %)	Azote absorbé par le maïs (g/m ²)
Jachères forestières		
<i>Acacia mangium</i>	0,185 b	14,85 a
<i>A. auriculiformis</i>	0,159 b	7,55 b
<i>Albizia lebeck</i>	0,248 a	13,58 ab
<i>Leucaena leucocephala</i>	0,213 ab	11,20 ab
Jachère naturelle		
<i>Eupatorium</i> sp.	0,205 ab	9,99 ab

Dans chaque colonne les chiffres suivis par la même lettre ne diffèrent pas significativement suivant le test de Newman-Keuls (P = 0,05).

Composts

Certains résidus d'arbres (émondés) se décomposent trop rapidement, cette décomposition n'étant pas synchronisée avec les besoins de la plante cultivée. C'est pourquoi le compostage de ces résidus avant leur application au champ pourrait permettre d'améliorer la qualité de la matière organique incorporée au sol et accroître ainsi la fertilité plus durablement. Une tentative a été effectuée dans ce sens pour valoriser les bas-fonds inondés non cultivés au Sahel. Ces bas-fonds ont été plantés en *Sesbania rostrata* qui a été ensuite composté pour être appliqué aux cultures (GANRY et GUEYE, 1992). De tels composts pourraient être enrichis en résidus à décomposition lente provenant d'espèces telles que les casuarinacées, par exemple, ce qui permettrait ainsi d'allonger la phase de minéralisation afin d'obtenir une meilleure synchronisation.

Stratégies d'amélioration de la fertilité par les arbres fixateurs d'azote

Il ressort de nombreux essais au champ que, sauf exception, la fixation d'azote réelle (FNR) est insuffisante pour assurer le maintien de la fertilité du sol, chaque fois qu'on exporte les récoltes, qu'il s'agisse de récoltes forestières ou agricoles. Pour assurer le maintien des réserves azotées du sol, il est donc indispensable d'améliorer la fixation biologique de l'azote, objectif que l'on peut atteindre soit en faisant appel à trois types de stratégies qui ont été fréquemment et clairement définies (DREYFUS *et al.*, 1988 ; DANSO *et al.*, 1992 ; HARDARSON, 1993), mais malheureusement beaucoup plus rarement utilisées. Parmi les différentes stratégies énumérées au tableau V, nous évoquerons ici brièvement celles qui nous paraissent les plus prometteuses ou les plus importantes.

Tableau V. Stratégies pour optimiser la fixation d'azote.

1. Amélioration de la plante hôte

Critères

- potentiel fixateur d'azote élevé
- croissance rapide
- enracinement profond
- compétition réduite vis-à-vis des autres végétaux
- tolérance aux contraintes du milieu, notamment salinité et sécheresse
- nodulation aérienne (dans certains cas particuliers)

Méthodes

- amélioration génétique par les voies classiques (notamment l'hybridation)
- criblage de provenances ou d'individus d'élite suivi de leur multiplication végétative ; identification des combinaisons hôte x rhizobium ou frankia les plus performantes
- transformation (transfert de gènes)

2. Amélioration des souches compatibles de rhizobium ou frankia

Critères

- effectivité élevée
- aptitude compétitive élevée
- tolérance aux contraintes du milieu
- aptitude à modifier favorablement la physiologie de la plante hôte

Méthodes

- criblage de souches sauvages
- construction de nouvelles souches par génie génétique

Inoculation

- culture de rhizobium ou frankia
- préparation et conditionnement des inoculums

3. Elimination des contraintes édaphiques

Sécheresse

- récolte des eaux pluviales
- irrigation

Déficiences nutritionnelles

- fertilisation et mycorhization

Facteurs biologiques défavorables

- pesticides et lutte biologique
- stérilisation y compris solarisation

Amélioration de la plante hôte

On a déjà souligné le fait que l'azote disponible (azote minéral + minéralisable) du sol inhibe la fixation lorsque sa teneur atteint un certain seuil. C'est ainsi qu'une application de 40 kg d'azote par hectare réduit de 50 % la fixation d'azote par *Leucaena leucocephala* (SANGINGA *et al.*, 1987). On sait que de nombreuses plantes cultivées, notamment le soja (HERRIDGE et BETTS, 1988), présentent des variations génotypiques de la tolérance de leur aptitude à fixer l'azote en présence d'azote combiné. Bien que nos connaissances dans ce domaine soient restreintes dans le cas des arbres, il est certain que quelques espèces continuent à fixer l'azote en présence d'azote combiné, par exemple l'aulne (DOMENACH *et al.*, 1989 ; WHEELER, 1991). Les investigations portant sur cette caractéristique particulière mériteraient d'être largement développées afin d'identifier les espèces, les provenances ou les clones les plus tolérants à l'azote disponible. La forme des arbres et surtout leur enracinement sont des caractéristiques essentielles en agroforesterie, la compétition entre les plantes cultivées et les arbres dépendant étroitement de l'architecture des systèmes racinaires des plantes associées. Il est ainsi évident qu'avec son système racinaire pivotant, *Faidherbia albida* est beaucoup moins compétitif pour les cultures qu'*Acacia nilotica* dont le système racinaire est largement traçant (figure 4).

La question de sélectionner la plante hôte pour une plus grande promiscuité, c'est-à-dire pour qu'elle puisse noduler avec un grand nombre de souches natives, ce qui éviterait l'inoculation (HENZELL, 1988), s'est posée. Mais la promiscuité présente l'inconvénient grave d'exposer la plante à l'infection par des souches à faible efficacité. La tendance actuelle est donc de sélectionner la plante hôte pour une plus grande spécificité. Une méthode de criblage simple vient d'être proposée pour obtenir par criblage des génotypes ayant une préférence marquée pour une souche efficace (HARDARSON, 1993).

L'amélioration de l'arbre peut être obtenue en suivant les approches de sélection traditionnelles ou en pratiquant le criblage de génotypes (SOUGOUFARA *et al.*, 1992) ou même en envisageant dans l'avenir des transformations génétiques (DUHOUX *et al.*, 1992).

Amélioration de la bactérie symbiotique et inoculation

L'amélioration de la bactérie symbiotique est obtenue par criblage de souches sauvages que l'on teste *in vitro* ou en serre (figure 4) et au champ de façon à obtenir les meilleures combinaisons « génotype de l'arbre x souche de rhizobium ou frankia » (SOUGOUFARA *et al.*, 1992). Ces souches sélection-

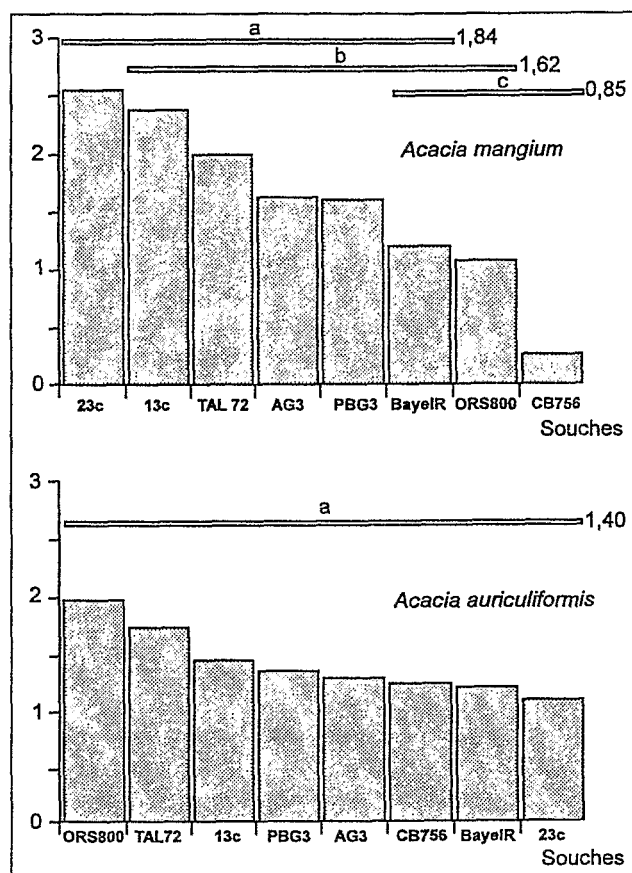


Figure 4. Criblage en serre de l'effectivité de souche de rhizobium (*Bradyrhizobium* sp.) associées à *Acacia mangium* et *A. auriculiformis*. Les valeurs qui ne diffèrent pas significativement (d'après le test de Newman-Keuls, $P = 0,05$) sont regroupées sous la même barre horizontale. Pour chaque groupe de valeurs, la moyenne figure à droite de la barre correspondante (GALIANA *et al.*, 1990).

nées sont utilisées pour l'inoculation des arbres en pépinière, le succès étant assuré dans tous les cas où des facteurs limitants ne font pas obstacle à leur infectivité ou leur efficacité (BRUNCK *et al.*, 1990). On ne reviendra pas sur l'intérêt majeur que revêt la technique de l'inoculation qui a fait l'objet de très nombreuses publications (SOUGOUFARA *et al.*, 1989 ; DIEM *et al.*, 1988).

Les méthodes de biologie moléculaire ont permis les actions suivantes :

- établir une carte génétique des rhizobiums ;
- construire de nouvelles souches ;
- jeter les fondements d'une taxonomie moderne ;
- identifier les souches par des marqueurs génétiques.

Mais jusqu'à présent les souches transformées génétiquement ne se sont pas imposées sur le terrain.

Méthodes agronomiques

L'agronome dispose d'une panoplie de moyens lui permettant d'améliorer la fixation d'azote en réduisant l'impact des facteurs limitants (notamment la maîtrise de l'eau et la fertilisation) ou lui permettant de favoriser les transferts d'azote ou de réduire la compétition entre les différentes composantes des systèmes agroforestiers. Nous évoquerons ci-dessous quelques-uns de ces moyens.

Maîtrise de l'eau et fertilisation

La sécheresse est un facteur limitant majeur étant donné que la fixation d'azote est encore plus sensible au manque d'eau que la plante elle-même. Il convient en premier lieu d'acquiescer autant que possible la maîtrise de l'eau, en faisant appel à l'irrigation ou à toute autre méthode de conservation, de stockage ou de récupération des eaux de ruissellement. Il y a aussi lieu de donner la préférence aux espèces capables d'utiliser l'eau des nappes phréatiques profondes (phréatophytes, tels que *Prosopis juliflora*) ou capables d'absorber l'eau des précipitations occultes comme *Casuarina equisetifolia*, *Prosopis cineraria*, *Acacia tortilis* (GATES et BROWN, 1988). Dans de nombreuses situations, en particulier dans les cultures en couloir installées dans des sols peu fertiles, il est indispensable d'apporter un complément minéral, phosphore et calcium notamment, pour assurer l'installation des arbres et permettre le fonctionnement correct des nodules et ultérieurement le recyclage des nutriments (SANCHEZ, 1987). On a proposé l'élagage des racines (YADAV et KHANNA, 1992) pour réduire la compétition entre les arbres et les cultures pour l'eau et les éléments nutritifs. Mais on ignore dans quelle mesure cette pratique modifie la fixation d'azote par l'arbre.

Maîtrise des transferts

Pour assurer une synchronisation aussi bonne que possible entre le pic de minéralisation des produits d'émondage et les besoins des plantes cultivées, il est en principe indispensable de programmer soigneusement les dates d'émondage et d'application au sol des émondes (SANGINGA *et al.*, 1988). Mais une telle programmation est délicate car on ignore actuellement la cinétique de la minéralisation des feuilles et des rameaux des différentes espèces ligneuses dans les différentes conditions climatiques. Cette minéralisation dépend en particulier de la macrofaune et de la microfaune dont l'activité est mal connue, bien que leur rôle soit considérable (LAVELLE *et al.*, 1990 ; ANDERSON et SINCLAIR, 1993). De plus, la restitution des éléments exportés est une règle essentielle de bonne gestion (GANRY, 1990).

Contrôle des parasites et des maladies

La fixation d'azote est fortement réduite par les maladies et les attaques de parasites notamment celles des nématodes pathogènes. Ces dernières attaques sont particulièrement graves chez la plupart des *Sesbania* sp. ainsi que chez *Acacia holosericea*, *A. saligna*, *Prosopis juliflora*. La prolifération des nématodes dans les systèmes racinaires des arbres présente en outre le danger de contaminer les cultures adjacentes (PROT, 1986 ; D'HONDT-DEFrancq, 1993). Les nématodes peuvent être éradiqués par des pesticides. Mais ces derniers ne sont pas toujours disponibles et sont souvent dangereux à manipuler. Il serait préférable de prévenir les infestations par les nématodes en faisant appel à des espèces résistantes. On sait par exemple que les arbres suivants résistent à *Meloidogyne incognita* : *Acacia senegal*, *Leucaena leucocephala*, *Sesbania tetraptera* et certaines variétés de *Sesbania macrocarpa* (PROT, 1986 ; D'HONDT-DEFrancq, 1993). Il serait en outre souhaitable de disposer de méthodes de lutte biologique efficaces. On pourrait par exemple exploiter le fait que certaines espèces ligneuses, fixatrices d'azote, par exemple *L. leucocephala*, ou non fixatrices d'azote telles que *Azadirachta indica* donnent des litières dont les produits de décomposition sont nématicides (D'HONDT-DEFrancq, 1993). Certaines espèces de jachère naturelle, telles que *Chromolaena odorata*, auraient des propriétés nématicides (SCHROTH, communication personnelle). On signalera enfin que la biologie moléculaire ouvre actuellement de nouvelles voies de lutte contre les nématodes.

Conclusion

Pour assurer la pérennité des rendements agricoles, il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodes tendant à équilibrer le bilan des éléments nutritifs. En ce qui concerne l'azote, cet équilibre peut être atteint par deux voies : la fertilisation azotée ; la fixation d'azote par les plantes cultivées elles-mêmes et par les arbres introduits dans les agrosystèmes. Si l'on considère uniquement le cas des arbres, nous venons de voir que leur contribution à l'équilibre azoté des agrosystèmes peut être importante à condition d'améliorer leur aptitude à fixer l'azote. Bien entendu, on pourra à l'avenir obtenir cette amélioration grâce au développement de méthodes sophistiquées, telles que la transformation génétique des plantes hôtes, avec pour objectif, par exemple, l'obtention de lignées résistantes aux nématodes, donc capables de fixer l'azote même dans des sols infestés par ces pathogènes. Mais dans l'immédiat nous disposons déjà de techniques performantes pour stimuler la fixation d'azote, en particulier : l'inoculation en pépi-

nière et la multiplication végétative de clones à PFN élevé. Malheureusement le transfert de ces techniques à l'application au champ est encore loin d'être réalisé. C'est à ce problème de transfert que les bailleurs de fonds devraient s'intéresser davantage. L'inoculation des jeunes arbres en pépinière est en effet d'un coût très réduit comparée à l'inoculation des légumineuses cultivées puisque, dans le cas des espèces pérennes, il s'agit de traiter 1 000 à 2 000 plantes par hectare alors que, dans le cas des plantes annuelles, il s'agit de traiter 200 000 à 400 000 plantes par hectare. Ce raisonnement s'applique également à la multiplication végétative des clones d'arbres sélectionnés.

Il existe peu d'études économiques sur les systèmes agroforestiers. Toutefois on peut penser que, si ces systèmes sont bien gérés, ils sont rentables. C'est ainsi que PALADA *et al.* (1992) ont montré que la culture de légumes en couloirs entre des haies de *Leucaena leucocephala* était rentable, en particulier lorsqu'on appliquait une fertilisation complémentaire, d'ailleurs minime (30 N-13 P-24 K par hectare). Dans un tel système la rentabilité aurait été probablement supérieure si l'on avait fait appel aux techniques d'inoculation de *L. leucocephala* avec des souches de rhizobium performantes (SANGINGA *et al.*, 1988). Enfin pour accroître l'attrait du paysan pour les arbres fixateurs d'azote, il est recommandé de donner la préférence aux espèces produisant, en plus du bois, du fourrage à haute valeur protéique pour le bétail ou des fruits ou graines comestibles comme c'est le cas de certains acacias australiens (THOMSON, 1992).

Références bibliographiques

- ANDERSON L.S., SINCLAIR F.L., 1993. Ecological interactions in agroforestry systems. *Agroforestry Abstracts* 54 : 57-91.
- ARYA S., TOKY O.P., BISHT R.P., TOMAR R., 1991. *Prosopis cineraria*, arbre à usages multiples prometteur pour les zones arides. *L'agroforesterie aujourd'hui* 3 : 3-14.
- BREWBAKER J.L., 1987. *Leucaena*: a multipurpose tree genus for tropical agroforestry. In: *Agroforestry, a decade of development*. Steppeler H.A., Ramachandran Nair P.K. (Eds), Nairobi, Kenya, ICRAF, p. 289-323.
- BRUNCK F., COLONNA J.P., DOMMERGUES Y.R., DUCOUSSO M., GALIANA A., PRIN Y., ROEDERER Y., SOUGOUFARA B., 1990. La maîtrise de l'inoculation des arbres avec leurs symbioses racinaires : synthèse d'une sélection d'essais au champ en zone tropicale. *Bois et Forêts des Tropiques* 223 : 24-42.
- CAZET M., 1989. Les plantations linéaires denses sur les sols sableux dégradés de la zone Centre-Nord du Sénégal. *Bois et Forêts des Tropiques* 222 : 27-37.
- CTFT (Centre technique forestier tropical), 1988. *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. (Synonyme *Acacia albida* Del.). Nogent-sur-Marne, France, CIRAD-Forêt, 72 p.
- DANSO S.K.A., BOWEN G.D., SANGINGA N., 1992. Biological nitrogen fixation in trees in agroecosystems. *Plant and Soil* 141 : 177-196.
- D'HONDT-DEFRANCQ M., 1993. Nématodes et agroforesterie. *L'Agroforesterie aujourd'hui* 5 : 5-9.
- DIEM H.G., BEN KHALIFA K., NEYRA M., DOMMERGUES Y.R., 1988. Recent advances in the inoculant technology with special emphasis on plant symbiotic microorganisms. In: *Proceedings of International Workshop on Advanced Technologies for Increased Agricultural Production*, Santa Margherita Ligure, Italy Leone U., Rialdi G., R. Vanore R. (Eds), Roma, Italy, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Genova, Italy, Università degli Studi di Genova (USG), p. 196-210.
- DOMENACH A.M., KURDALI F., 1989. Influence des réserves azotées sur la formation des feuilles d'*Alnus glutinosa* et ses conséquences dans l'estimation de la fixation de l'azote. *Can. J. Bot.* 67 : 865-871.
- DOMENACH A.M., KURDALI F., BARDIN R., 1989. Estimation of dinitrogen fixation in alder forest by the method based on natural ¹⁵N abundance. *Plant and Soil* 118 : 51-59.
- DOMMERGUES Y., 1963. Evaluation du taux de fixation de l'azote dans un sol dunaire reboisé en filao (*Casuarina equisetifolia*). *Agrochimica* 7 : 335-340.
- DREYFUS B.L., DIEM H.G., DOMMERGUES Y.R., 1988. Future directions for biological nitrogen fixation. *Plant and Soil* 108 : 191-199.
- DUHOUX E., BOGUSZ D., FRANCHE C., 1992. Transformations chez les plantes fixatrices d'azote. In: *Comptes rendus du colloque sur les interactions plantes-microorganismes*, Sénégal, février 1992. Stockholm, Suède, Fondation internationale pour la science (IFS), p. 462-474.
- DUHOUX E., PRIN Y., DOMMERGUES Y.R., 1993. Comparison of aerial nodulation of *Casuarina* sp. with legume stem nodulation. In: *Symbioses in nitrogen-fixing trees*, Subba Rao N.S., Rodriguez C., Barrueco C. (Eds). New Delhi, India, Oxford and IBH Publishing Co, p. 85-93.
- DUPUY N., DREYFUS B.L., 1992. *Bradyrhizobium* populations occur in deep soil under the leguminous tree *Acacia albida*. *Appl. Environ. Microbiol.* 58 : 2415-2419.

- FELKER P., CLARK P.R., 1982. Position of mesquite (*Prosopis* spp.) nodulation and nitrogen fixation (acetylene reduction) in 3-m long phreatophytically simulated soil communs. *Plant and Soil* 64 : 297-305.
- FUJITA K., OFOSU-BUDU K.G., OGATA S., 1992. Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal cropping systems. *Plant and Soil* 141 : 155-175.
- GALIANA A., CHAUMONT J., DIEM H.G., DOMMERMUES Y.R., 1990. Nitrogen-fixing potential of *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis* seedlings inoculated with *Bradyrhizobium* and *Rhizobium* sp. *Biol. Fertil. Soils* 9 : 261-267.
- GANRY F., 1990. Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse de doctorat, université de Nancy I, France, 355 p.
- GANRY F., GUEYE F., 1992. La mise en valeur des bas-fonds de la zone sahélienne par *Sesbania rostrata* est-elle possible ? *L'agronomie Tropicale* 46 : 155-159.
- GARG V.K., JAIN R.K., 1992. Influence of fuelwood trees on sodic soils. *Can. J. For. Res.* 22 : 729-735.
- GATES P.J., BROWN K., 1988. *Acacia tortilis* and *Prosopis cineraria* : Leguminous trees for arid areas. *Outlook on Agriculture* 17 : 61-64.
- GEIGER S.C., VAN DEN BELDT R.J., MANU A., 1992. Preexisting soil fertility and the variable growth of *Faidherbia albida*. In: *Faidherbia albida* in the West african semi-arid tropics, Van den Belt R.J. (Ed.), Nairobi, Kenya, ICRAF, p. 121-125.
- GILLER K.E., WILSON K.J., 1991. Nitrogen Fixation in tropical cropping systems. Wallingford Oxon, United Kingdom, CAB International.
- HALEND A., 1989. Nutrient content of an *Acacia mangium* plantation. *Nitrogen-Fixing Tree Research Reports* 7 : 46-48.
- HARDARSON G., 1993. Methods for enhancing symbiotic nitrogen fixation. *Plant and Soil* 152 : 1-17.
- HENZELL E.F., 1988. The role of biological nitrogen fixation research in solving problems in tropical agriculture. *Plant and Soil* 108 : 15-21.
- HERRIDGE D.F., BETTS J.H., 1988. Field evaluation of soybean genotypes selected for enhanced capacity to nodulate and fix nitrogen in the presence of nitrate. *Plant and Soil* 110 : 129-135.
- JENKINS M.B., VIRGINIA R.A., JARRELL W.M., 1988. Depth distribution and seasonal populations of mesquite-nodulating rhizobia in warm desert ecosystems. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 52 : 1644-1650.
- LAL R., 1989. Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol. *Agroforestry Systems* 8 : 7-29, 97-111, 113-132, 197-215.
- LANGKAMP P.J., FARNELL G.K., DALLING M.J., 1982. Nutrient cycling in a stand of *Acacia holosericea* I. Measurements of precipitation, interception, seasonal acetylene reduction, plant growth and nitrogen requirement. *Aust. J. Bot.* 30 : 87-106.
- LAVELLE P., MARTIN A., BLANCHART E., GILOT C., MELENDEZ G., PASHANASI B., 1990. Conservation de la fertilité des sols de savane par la gestion de l'activité de la macrofaune du sol. In: *Actes des rencontres internationales Savanes d'Afrique, terres fertiles ?* Montpellier, France, 10-14 décembre 1990. Paris, France, La Documentation Française, p. 371-397.
- LUNDGREN B., 1978. Soil conditions and nutrient cycling under natural plantation forests in Tanzanian Highlands. Report in forest ecology and forest soils n° 31. Uppsala, Sweden, Swedish University of Agricultural Science, 420 p.
- MAILLY D., MARGOLIS H.K., 1992. Forest floor and mineral soil development in *Casuarina equisetifolia* plantations on the coastal sand dunes of Senegal. *Forest Ecology and Management* 55 : 259-278.
- MARIOTTI A., SOUGOUFARA B., DOMMERMUES Y.R., 1992. Estimation de la fixation d'azote atmosphérique par le traçage isotopique naturel dans une plantation de *Casuarina equisetifolia* (Forst). *Soil Biol. Biochem.* 24 : 647-653.
- MEAD R., 1986. Statistical methods for multiple cropping. In: *Proceedings of Multiple cropping systems*, Francis C.A. (Ed.). New York, USA, MacMillan, p. 317-350.
- MULONGOY K., 1983. Leaf decomposition. In: *Annual report for 1982*. Ibadan, Nigeria, International Institute of Tropical Agriculture, p. 126-128.
- MUTHANA K.D., 1985. *Prosopis* species development programmes in India. In: *Proceedings of the current stage of knowledge on Prosopis tamarugo*, Habit M.A. (Ed.). Roma, Italy, FAO, p. 181-191.
- ORCHARD E.R., DARBY G.D., 1956. Fertility changes under continued wattle culture with special reference to nitrogen fixation and base status of the soil. In: *comptes rendus du sixième congrès international science du sol*, volume D. Paris, France, Société internationale de science du sol, p. 305-310.
- PALADA C., KANG B.T., CLAASSEN S.L., 1992. Effect of alley cropping with *Leucaena leucocephala* and fertilizer application on yield of vegetable crops. *Agroforestry Systems* 19 : 139-147.
- PEOPLES M.B., FAIZAH A.W., RERKASEM B., HERRIDGE D.F., 1989. Methods for evaluating nitrogen fixation by nodulated legumes in the field. Canberra, Australia, Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), 76 p.
- PROT J.C., 1986. Sensibilité de sept légumineuses arborescentes aux nématodes *Meloidogyne javanica*, *Meloidogyne incognita*, *Scutellonema cavenessi* et *Dolichorhynchus elegans*. *Revue Nématol.* 9 : 416-418.

- RAO M.R., COE R., 1992. Evaluation des résultats de la recherche agroforestière. L'Agroforesterie aujourd'hui 4 : 4-9.
- REDDELL P., 1993. Soil constraints to the growth of nitrogen-fixing trees in tropical environments. In: Proceedings of Symbioses in nitrogen-fixing trees, Subba Rao N.S., Rodriguez Barrueco C. (Eds). New Delhi, India, Oxford and IBH Publishing Co, p. 65-83.
- SANCHEZ P.A., 1987. Soil productivity and sustainability in agroforestry systems. In: Proceedings of Agroforestry, a decade of development, Steppler H.A., Ramachandran Nair P.K. (Eds). Nairobi, Kenya, ICRAF, p. 65-83.
- SANGINGA N., MULONGOY K., AYANABA A., 1987. Evaluation of indigenous strains of *Rhizobium* for *Leucaena* de Wit in Nigeria. In: comptes rendus les arbres fixateurs d'azote et l'amélioration biologique de la fertilité des sols. Collection colloques et séminaires. Bondy, France, éditions de l'ORSTOM, p. 416-436.
- SANGINGA N., MULONGOY K., AYANABA A., 1988. Nitrogen contribution of *Leucaena/Rhizobium* symbiosis to soil and subsequent maize crop. Plant and Soil 112 : 137-141.
- SCHULZE E.D., GEBAUER G., ZIEGLER H., LANGE O.L., 1991. Estimates of nitrogen fixation by trees on an aridity gradient in Namibia. Oecologia 88 : 451-459.
- SOUGOUFARA B., DIEM H.G., DOMMERMUES Y.R., 1989. Response of field-grown *Casuarina equisetifolia* to inoculation with Frankia strain ORS021001 entrapped in alginate beads. Plant and Soil 118 : 133-137.
- SOUGOUFARA B., MAGGIA L., DUHOUX E., DOMMERMUES Y.R., 1992. Nodulation and N₂ fixation in nine *Casuarina* clone-Frankia strain combinations. Acta Oecologica 13 : 497-503.
- SUTHERLAND J.M., SPRENT J.I., 1993. Nitrogen fixation by legume trees. In: Proceedings of Symbioses in nitrogen-fixing trees, Subba Rao N.S., Rodriguez Barrueco C. (Eds). New Delhi, India, Oxford and IBH Publishing Co, p. 32-63.
- THOMSON L., 1992. Australia's subtropical dry-zone *Acacia* species with human food potential. In: Proceedings of Australian dry-zone Acacias for human food, House A.P.N. and Harwood C.E. (Eds). Canberra, Australia, Australian Tree Seed Centre, p. 3-36.
- VAN DEN BELT R.J. Ed., 1992a. *Faidherbia albida* in the West African semi-arid tropics. Nairobi, Kenya, ICRAF, 206 p.
- VAN DEN BELT R.J., 1992b. Le psylle du *Leucaena* sp. arrive en Afrique. L'Agroforesterie aujourd'hui 4 : 11-12.
- VAN KESSEL C., FARRELL R.E., ROSKOSKI J.P. KEANE K.M., 1994. Recycling of the naturally occurring ¹⁵N in an established stand of *Leucaena leucocephala*. Soil Biol. Biochem. 26 : 757-762.
- VON CARLOWITZ P.G., 1989. Agroforestry technologies and fodder production, concepts and examples. Agroforestry Systems 9 : 1-16.
- WETSELAAR R., GANRY F., 1982. Nitrogen balance in tropical agrosystems. In: Proceedings of Microbiology of tropical soils and plant productivity, Dommergues Y.R. Diem H.G. (Eds). The Hague, the Netherlands, Martinus Nijhoff/Junk, p. 1-36.
- WHEELER C.T., 1991. Symbiotic Nitrogen Fixation. In: Proceedings of Physiology of trees, Raghavendra AS (Ed.). London, United Kingdom, Wiley, p. 111-135.
- XU Z.H., SAFFIGNA P.G., MYERS R.J.K., CHAPMAN A.L., 1993. Nitrogen cycling in *Leucaena* sp. (*Leucaena leucocephala*) alley cropping in semi-arid tropics. Plant and Soil 148 : 63-72 ; 73-82.
- YADAV J.P., KHANNA P., 1992. La taille des racines améliore la production de cultures sous *Prosopis cineraria*. L'Agroforesterie aujourd'hui 4 : 13-14.
- YOUNG A., 1986a. Effect of trees on soils. In: Proceedings of Amelioration of soil by trees, Prinsley R.T., Swift M.J. (Eds). London, United Kingdom, Commonwealth Science Council, p. 10-19.
- YOUNG A., 1986b. The potential of agroforestry as a practical means of sustaining soil fertility. In: Proceedings of Amelioration of soil by trees, Prinsley R.T. and Swift M.J. (Eds), London, United Kingdom, Commonwealth Science Council, p. 121-144.

Sustainable land management in African semi-arid and subhumid regions

Francis GANRY and Bruce CAMPBELL
Editors



SCOPE ■ UNEP ■ CIRAD
Ministère de la coopération (France)


Proceedings of the SCOPE workshop
15-19 November 1993, Dakar, Senegal

Sustainable land management in African semi-arid and subhumid regions


Maintaining the natural resource base over time in dryland areas of the tropics (which cover the arid, semi-arid, and subhumid regions) requires that desertification and land degradation be controlled. Because of their areal importance, on a global scale, their potential for food and wood production, and their vulnerability, the semi-arid regions, in particular of Africa, are of special importance. In this book, thirty papers bring together experiences of physical and social scientists from Francophone, Anglophone and Lusophone countries who have been working on land-use issues in Africa. They review and synthesize the biophysical, economic and social information on sustainable land use in the various parts of Africa. Four discussion groups make policy recommendations and determine the research priorities for sustainable land management systems.


Gestion durable des terres dans les régions semi-arides et subhumides d'Afrique

Le maintien durable des ressources naturelles dans les zones sèches des tropiques (qui couvrent les régions arides, semi-arides et subhumides) nécessite le contrôle de la désertification et de la dégradation des terres. Leur vaste étendue, leur potentiel en matière de production de nourriture ou de bois, et leur vulnérabilité rendent les régions semi-arides, surtout en Afrique, particulièrement importantes à considérer. Cet ouvrage rassemble trente communications de scientifiques de pays francophones, anglophones et lusophones ayant travaillé dans le domaine de l'utilisation des sols en Afrique. Ils présentent et synthétisent l'information sur l'utilisation durable des terres en Afrique, du point de vue biophysique, économique ou social. Quatre groupes thématiques émettent des recommandations en matière de politiques et de priorités de recherche pour développer des systèmes de gestion des terres durables.

 Scientific Committee on Problems of the Environment

 United Nations Environment Programme

 Centre de coopération internationale en recherche agronomique
pour le développement

 Ministère de la coopération (France)

Diffusion : CIRAD-CA
BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

ISBN 2-87614-184-1
ISSN 1264-112X

Contents

<i>Executive summary</i>	9
<i>Résumé</i>	11
<i>Introduction</i> – Sustainable dryland development or desertification control. T. MAUKONEN	15
Theme 1. I Sustainable management of the biological, physical and chemical fertility	
<i>Gestion durable de la fertilité biologique, physique et chimique</i>	
NOAA satellite data applications in resource survey and assessment of savanna rangeland I.P. ANDERSON	21
Land use practices in dambos and policy implications for their sustainable utilization in southern Africa M. KOKWE	29
Réflexions sur le rôle des arbres dans les systèmes de culture traditionnels et dans les systèmes agroforestiers potentiels en cours d'élaboration au Fouta-Djalón (République de Guinée) L. MATHIEU, L. BOCK, D. BALDE, M. DETRAUX, B. HENQUIN, A. TERNEUS	37
Rôle des arbres fixateurs d'azote dans le maintien de la fertilité azotée des sols F. GANRY, Y. DOMMERGUES	53
La fertilité entre forêt et savane en Afrique de l'Ouest J. GIGOU	69
Gestion durable des terres en milieu tropical. Régulation biologique des processus de décomposition de la matière organique J.-L. CHOTTE, E. BLANCHART, P. LAVELLE	89
Recent achievement on agronomic evaluation of phosphorus fertilizer sources and management in the West Africa semi-arid tropics A. BATIONO, M.P. SEGODO, A. BUERKERT, E. AYUK	99
Recherche d'indicateurs de fertilité azotée des terres L. RUIZ, F. GANRY, V. WANEUKEM, R. OLIVER, P. SIBAND	111
La matière organique du sol et la recherche d'indicateurs de la durabilité des systèmes de culture dans les régions tropicales semi-arides et subhumides d'Afrique de l'Ouest C. FELLER	123
Conception de systèmes de culture durables. Expérimentation et enquête dans l'étude de la fertilité des sols M. CRÉTENET	131
Sustainability and peasant farming systems: some observations from Zimbabwe B.M. CAMPBELL, P.N. BRADLEY, S.E. CARTER	141
SYNTHESIS: THEME 1	153
SYNTHÈSE DU THÈME 1	157

