Les plantations forestières mixtes et pures dans les régions tropicales et subtropicales

ÉTUDE FAO FORÊTS
103

Etude fondée sur les travaux de
T.J. Wormald

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

Rome, 1995

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

M-30
ISBN 92-5-203216-9

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, mise en mémoire dans un système de recherche documentaire ni transmise sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit: électronique, mécanique, par photocopie ou autre, sans autorisation préalable du détenteur des droits d'auteur. Toute demande d'autorisation devra être adressée au Directeur de la Division des publications, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie, et comporter des indications précises relatives à l'objet et à l'étendue de la reproduction.

© FAO 1995

AVANT-PROPOS

"Les plantations forestières correspondent à environ 3 pour cent des surfaces boisées actuelles mais contribuent à la production mondiale annuelle de bois dans une proportion très supérieure à leur importance en surface".[1] Dans plusieurs pays des tropiques ces plantations ont été la principale source de produits ligneux et dans d'autres, elles ont même été considérées comme des sources d'approvisionnement remplaçant la forêt naturelle, qu'elles protègent ainsi de la surexploitation. Des plantations sont aussi établies pour fournir un abri au bétail, pour prévenir l'érosion due au vent ou à l'eau et pour procurer une gamme de produits non ligneux. Récemment, certains ont proposé de créer des plantations faisant office de "réceptacles à carbone" en vue de réduire le réchauffement de la planète dû à l'effet de serre. Les objectifs des plantations ont été résumés dans l'une des recommandations du dixième Congrès forestier mondial: "Une augmentation importante des surfaces forestières plantées est une nécessité absolue pour satisfaire une demande croissante de produits ligneux, pour diminuer la pression sur les écosystèmes forestiers naturels et pour fixer le gaz carbonique".

Pourtant, malgré les avantages qu'elles peuvent apporter, les plantations forestières ont suscité des critiques. L'expansion rapide des plantations industrielles au cours des quarante dernières années a parfois entraîné des réactions nettement hostiles. La très grande majorité d'entre elles comportaient un petit nombre d'essences seulement, et généralement une seule espèce équienne par parcelle. Parfois, à la suite de la création de ces plantations, les populations locales ont perdu leur droit d'accès au site, ou bien des espèces qui leur étaient indispensables pour certains aspects de leur vie quotidienne, ont été remplacées par d'autres; souvent, le défrichement des terres et le brûlage des débris ont entraîné une érosion du site. Aux yeux de nombreuses personnes, ces plantations ont un aspect artificiel, même lorsqu'elles sont arrivées à l'âge d'exploitabilité. Dans quelques pays tempérés, on considère qu'il existe des cas où les cours d'eau sont acidifiés; dans d'autres, on soupçonne que la productivité du site a diminué au cours de la seconde révolution ou des suivantes. Ces problèmes semblent venir du fait que la composition et la structure de ces forêts - constituées de grands blocs d'arbres du même âge et d'une ou d'un petit nombre d'essences - sont considérées comme non naturelles; à première vue, la solution semblerait donc être de planter des arbres de nombreuses essences et sur plusieurs années.

De même, l'utilisation croissante d'espèces du genre *Eucalyptus* a suscité des critiques, malgré les avantages potentiels importants qu'elle offre. L'Agence suédoise d'aide au développement international (ASDI) a chargé la FAO en 1985 de préparer une étude[2] afin d'analyser les informations disponibles sur les effets écologiques des plantations d'*Eucalyptus*. La FAO a présenté un rapport faisant autorité sur l'état des connaissances à cette époque. La présente étude et la vaste bibliographie annotée qui

---

[1] Déclaration de Paris. Dixième Congrès forestier mondial, Paris. 17-26 septembre, 1991.

[2] "Les effets écologiques des eucalyptus", par M.E.D. Poore et C. Fries. Etude FAO: Forêts 59.

l'accompagne ont été réalisées à la demande de la SAREC - Agence suédoise pour la coopération à la recherche dans les pays en développement - dans le but d'analyser objectivement les éléments qui permettent de se prononcer pour ou contre la création de plantations plurispécifiques plutôt que monospécifiques.

La FAO remercie M. T.J. Wormald, qui a eu la responsabilité globale de la rédaction de l'étude, et M. J. Cedergreen et Mme F. Goulet qui ont effectué la plus grande partie des recherches bibliographiques; MM. G.B. Applegate, C. Cossalter, R. Delmastro, S.T. Mok, F. Owino, A. Persson et J.L. Whitmore qui, avec beaucoup d'autres spécialistes du monde entier, ont formulé des commentaires utiles sur la première version; le Directeur, le bibliothécaire et le personnel de l'Oxford Forestry Institute (OFI, Royaume-Uni) et le Directeur et le personnel du Centre technique forestier tropical (CIRAD-Forêt, France), pour l'assistance précieuse qu'ils ont fournie dans la recherche des références bibliographiques. A la FAO même, l'étude a été coordonnée par J.B. Ball, et a bénéficié de la contribution de G.S. Child, W.M. Ciesla, S. Darroze, K. Janz, C. Palmberg-Lerche, W.A. Rogers, P. Vantomme et P.A. Wardle.

Le présent document devrait être utile aux forestiers et aux autres personnes qui travaillent au développement forestier dans les zones tropicales et subtropicales, et les aider à décider, en se fondant sur des données techniques et économiques rationnelles, de la composition spécifique des plantations forestières et à examiner dans une juste perspective les prises de position pour ou contre les plantations mono ou plurispécifiques.

J.P. Lanly
Directeur
Division des ressources forestières
Département des forêts

TABLE DES MATIERES

		Page
1.	**INTRODUCTION**	
	Généralités	1
	Objectifs de l'étude	2
	Etendue de l'étude	2
	Importance des objectifs d'aménagement	3
	Bonne pratique sylvicole	4
	Définition du terme "mélange"	6
	Importance des plantations monospécifiques	6
2.	**LES ECOSYSTEMES FORESTIERS**	9
3.	**IMPACT ECOLOGIQUE**	12
	3.1 SOLS	**12**
	Caractéristiques des sols	12
	Les modifications des paramètres du site se traduisent par un déclin de la productivité de la deuxième révolution	14
	Rôle des mélanges dans l'aménagement des sols	19
	Conclusions sur les sols	20
	3.2 CLIMAT ET POLLUTION	**21**
	Changements climatiques	21
	Réservoirs de CO_2	24
	Microclimat	24
	Pollution	25
	3.3 INCENDIES	**26**
	3.4 CONSERVATION DES RESSOURCES GENETIQUES ANIMALES ET VEGETALES	**26**
	Généralités	26
	Conservation de la biodiversité	28
	Aménagement de la faune et de la flore sauvages	30
	Conclusions sur la conservation des ressources génétiques animales et végétales	33

		Page
	3.5 INSECTES ET MALADIES	**34**
	Stabilité des écosystèmes forestiers	34
	Quelques points de vues opposés	36
	Rôle des plantations mixtes	39
	Conclusions sur les insectes et les maladies	41
	3.6 CONCLUSIONS SUR L'IMPACT ECOLOGIQUE	**43**
4.	**PRODUITS ET SERVICES NON INDUSTRIELS**	**45**
	Utilisations non commerciales	45
	Bois de feu et perches	46
	Fourrage	46
	Régénération des sites dégradés	47
	Rideaux protecteurs et brise-vents	48
	Plantations urbaines et péri-urbaines	48
	Quelques exemples de plantations non industrielles	48
	Conclusions sur les produits et services non industriels	51
5.	**L'AMENAGEMENT DES MELANGES**	**52**
	Classification des mélanges	52
	Critères sylviculturaux pour réussir les mélanges	57
	Méthodes d'établissement des mélanges	58
	Qualités requises pour l'aménagement	59
	Quelques expériences de plantations en mélange	60
	Conclusions sur l'aménagement des mélanges	64
6.	**RENDEMENTS**	**65**
	Amérique du Nord et Asie tempérée	65
	Europe	66
	Zones tropicales	69
	Conclusions sur les rendements	70
7.	**ECONOMIE**	**72**
	Aspects économiques des mélanges	73
	Expérience dans les pays tempérés	74
	Expérience tropicale	75
	Gains et pertes à long terme	76
	Evaluations des risques	77
	Conclusions sur l'économie	78

		Page
8.	**CONCLUSIONS PRINCIPALES**	80
	Les plantations des régions tropicales et subtropicales	80
	Baisse des rendements en bois	81
	Importance du site et des objectifs	81
	Risques	81
	Synergie	82
	Types de plantations	82
	Conservation de la faune et de la flore sauvages	84
9.	**RECOMMANDATIONS**	85
	Objectifs des plantations	85
	Bien adapter les essences et les pratiques d'aménagement au site	85
	Situations où les mélanges sont appropriés	85
	Suivi de la croissance	86
	Recherche	86
	Analyse économique	87
ANNEXES		
1.	Bibliographie annotée	89
2.	Sols	140
3.	Mélanges d'essences	152
4.	Santal	171
5.	Photographies	175

1. INTRODUCTION

Généralités

La superficie totale couverte par des forêts artificielles dans le monde a été estimée en 1980 à environ 100 millions d'hectares, dont quelque 35 millions d'hectares dans les pays en développement; environ 10 millions d'hectares se trouvaient dans les pays tropicaux qui créaient de nouvelles plantations au rythme d'environ 1,1 million d'hectares par an (Lanly, 1982, FAO, 1988). Ce rythme de boisement et de reboisement était très inférieur à celui des zones subtropicales et tempérées, mais il devrait s'accélérer car de nombreux pays cherchent à compenser la perte des forêts naturelles. Les plantations des zones tropicales (et subtropicales) ayant un rendement potentiel élevé, leur contribution à la production ligneuse devrait être proportionnellement bien supérieure à leur superficie. Environ 40 pour cent des plantations existantes ou projetées sont destinées à la production de bois de feu ou à d'autres fins non industrielles (Lanly, 1982), le restant étant destiné à la production de bois ronds industriels. Ces dernières plantations sont caractérisées par la simplicité de leur structure et de leur composition spécifique; on a fait remarquer (Evans, 1982) que des espèces pionnières comme les *Eucalyptus,* le pin et le teck représentent 85 pour cent de toutes les plantations forestières des zones tropicales.

Malgré les avantages indéniables qu'offrent les plantations de bois ronds industriels, ces forêts monospécifiques et en particulier les monocultures - succession d'un peuplement pur et d'un autre de la même espèce - sont particulièrement vulnérables aux catastrophes, telles que ouragans, pertes dues aux ravageurs et aux maladies; en outre elles sont particulièrement exposées à la dégradation des sols et à la baisse des rendements. Compte tenu de l'accélération de la destruction des forêts naturelles dans les tropiques, on craint de plus en plus que le programme de plantations forestières ne renforce le processus de dégradation de l'environnement. Néanmoins, dans les pays en développement, l'investissement massif dans les forêts artificielles, qui a débuté dans les premières années du siècle pour augmenter de façon spectaculaire dans les années 50, a concerné dans une large mesure des plantations monospécifiques à révolution courte. L'investissement a été important si on le compare au passé, mais les réalisations totales sont restées bien en-deçà de la demande projetée de bois ronds industriels. Les révolutions durent généralement entre 20 et 30 ans, rarement plus de 60 ans et parfois 5 ou 6 ans à peine (par exemple taillis d'*Eucalyptus globulus* en Ethiopie; *Albizia falcataria*[1] à Sabah, Malaisie orientale, espèces d'*Eucalyptus* au Brésil). Les plantations de deuxième révolution sont courantes et, sur quelques stations, des peuplements de troisième révolution ont été mis en place. Grâce aux progrès réalisés en matière d'amélioration génétique des arbres et de techniques sylviculturales, il est tout à fait possible d'augmenter les rendements; grâce aux techniques de multiplication des végétaux, ces résultats peuvent être consolidés rapidement. Mais si des précautions ne sont pas prises, ces techniques risquent aussi d'entraîner une réduction de la diversité génétique existante qui peut être utilisée et améliorée. La question est de savoir si cette évolution vers des systèmes d'aménagement plus intensifs comporte des risques inacceptables.

---

[1] Précédemment dénommé *Albizia falcata* et *A. moluccana* et aujourd'hui appelé *Paraserianthes falcataria*. Le nom d'*Albizia falcataria*, mieux connu des forestiers, est utilisé dans toute la présente étude.

Objectifs de l'étude

La présente étude a les objectifs suivants:

- étudier et analyser les avantages et les inconvénients des plantations mixtes et pures dans les régions tropicales et subtropicales,
- rassembler les expériences pratiques de plantations mélangées ou pures,
- déterminer, dans la mesure du possible, les principes à suivre lorsque l'on crée des plantations,
- suggérer des principes directeurs aux forestiers et aux décideurs, au niveau local.

La présente étude se fonde sur un long examen de la bibliographie existante et sur des contacts avec des forestiers du monde entier. Toutefois, les références bien documentées sur les plantations mélangées dans les tropiques sont dispersées et inégales, aussi bien du point de vue de la distribution géographique que de la qualité. C'est pourquoi les expériences effectuées dans les zones tempérées ont été utilisées lorsqu'elles ont semblé pertinentes.

Ce document s'adresse en premier lieu aux forestiers qui sont chargés de la planification des projets de plantation et aux cadres de terrain et aux décideurs qui sont chargés de déterminer dans les détails l'aménagement des plantations. En second lieu, il s'adresse aux décideurs qui doivent eux aussi être conscients des limites des plantations pures et du rôle des plantations mixtes.

Etendue de l'étude

Les tropiques constituent une bande assez clairement définie située de part et d'autre de l'Equateur. Que les limites soient définies par la latitude - tropiques du Cancer et du Capricorne - par la température moyenne du mois le plus froid (18°C), ou par l'écart de température entre le mois le plus froid et le mois le plus chaud (5°C), les pays couverts sont à peu près les mêmes. Toutefois, dans ces pays, les conditions de végétation peuvent être très variables - forêts ombrophiles humides, déserts, savanes et climats frais de montagne. L'étude porte aussi sur les zones subtropicales, dont la définition géographique est beaucoup plus vague. Elle englobe des cas enregistrés dans l'Himalaya, en Afrique australe et au Chili; les expériences réalisées dans le sud de l'Australie ont été analysées de façon assez détaillée, car une très grande partie des éléments qui permettent de se prononcer pour ou contre la baisse de rendement de la deuxième révolution ont été rassemblés dans cette région. Les documents concernant l'Afrique du Nord n'ont pas été étudiés en détail, ni ceux du sud des Etats-Unis, bien que l'on ait retenu certaines informations provenant de ces régions, lorsque l'on ne disposait d'aucune donnée sur le problème dans les régions tropicales. On s'est également référé à des expériences de zones tempérées, lorsqu'elles ont semblé pertinentes, pour suppléer à l'insuffisance des informations sur les tropiques. Dans la mesure du possible, on a choisi des textes concernant les pays en développement; la disponibilité de documents publiés a eu une influence majeure sur le choix des pays inclus dans l'étude.

Des limites techniques ont été imposées à la présente étude. Les cultures arbustives qui sont habituellement considérées comme faisant partie du secteur agricole, comme l'hévéa ou le palmier à huile, ou même celles qui poussent à l'ombre d'autres arbres, comme le thé, le café ou le cacao, ont été exclues. Les mélanges comprenant des cultures à dominante agricole comme ceux que l'on trouve dans les systèmes agroforestiers ont été exclus, car ils sont déjà couverts par de nombreux documents sur l'agroforesterie.

La présente étude concerne les plantations forestières; aussi les mélanges issus d'une régénération naturelle n'ont-ils pas été considérés, sauf dans la mesure où des espèces indigènes régénérées naturellement peuvent contribuer à la diversité dans les peuplements artificiels. La plantation d'enrichissement est une technique qui vise à améliorer les peuplements naturels et, en tant que telle, elle devrait être exclue de cette étude, mais la distinction entre plantation d'enrichissement et plantation de conversion est souvent ténue. La plantation d'enrichissement est utilisée pour établir des essences recherchées dans une matrice d'arbres poussant spontanément; grâce à l'abattage sélectif de certains arbres du peuplement naturel, ces plantations peuvent éventuellement être converties en plantation pure. Cette technique a été utilisée pour établir certaines espèces de la famille des meliacées. La plantation d'enrichissement sera donc brièvement étudiée ici.

On a considéré que la régénération naturelle des herbes et arbrisseaux dans les forêts artificielles, qu'elles soient mono ou plurispécifiques, offrait certains avantages des mélanges; cependant ces mêmes herbes et arbrisseaux peuvent devenir indésirables lorsqu'ils interfèrent avec les arbres plantés, en particulier durant la phase d'établissement.

Importance des objectifs d'aménagement

Lorsque l'on crée des plantations, il est primordial de définir clairement les objectifs, comme on le souligne tout au long de l'étude. Les objectifs déterminent dans une large mesure la façon d'établir et d'aménager une plantation, de même que les espèces utilisées. Si l'objectif premier est d'obtenir un produit uniforme - ce qui est habituellement le cas lorsque le produit est destiné à l'industrie - les plantations mixtes ont un champ d'application limité. A l'inverse, si l'objectif premier est de protéger un site vulnérable, les mélanges peuvent être plus appropriés, et nombre de techniques adaptées à la production industrielle peuvent devenir inacceptables. Lorsque le site n'est pas un facteur limitant, le ou les produits finaux et la biologie des essences sélectionnées détermineront s'il convient d'établir des plantations mixtes ou pures.

La plupart des ouvrages existants étudient les mélanges en rapport avec les plantations industrielles. Or, dans les pays en développement, une grande partie des plantations ont une vocation "non industrielle" (essentiellement bois de feu et perches) (FAO 1988). Au Moyen-Orient, toutes les plantations ont été qualifiées de non industrielles; en Afrique sahélienne occidentale, plus de 80 pour cent ont une vocation non industrielle; dans plusieurs régions, dont l'Afrique de l'Est, l'Afrique insulaire (Madagascar et autres îles), l'Asie du Sud-Est, du Myanmar au Viet Nam, plus de 50 pour cent des plantations avaient une vocation non industrielle en 1980.

Tableau 1: Superficie (milliers d'hectares) couverte par des forêts artificielles, en 1980

	Industrielles				Non industrielles		Total
	Feuillus		Conifères				
Afrique	642	(21%)	659	(22%)	1 686	(56%)	2 987
Asie (Chine exclue)	2 891	(55%)	592	(11%)	1 759	(34%)	5 242
Amérique du Sud	1 085	(28%)	2 322	(37%)	2 170	(35%)	5 877
Océan Pacifique	5		78	(89%)	5	(6%)	88
Total	4 623	(33%)	3 651	(26%)	5 620	(41%)	13 894

Source: FAO 1988

Une grande partie de l'effort forestier réalisé dans les régions tropicales et subtropicales est axé sur l'obtention de produits comme le bois de feu, pour lesquels l'uniformité de la taille ou des propriétés techniques n'a pas une importance majeure, et les mélanges peuvent donc être appropriés.

Les projets de plantations ont habituellement plus d'un objectif. On admet sans difficulté que dans les projets de plantations à vocation industrielle, l'un des objectifs doit être de maintenir la fertilité du site. On reconnaît sans doute moins facilement que l'aménagement d'une forêt de protection procurera aussi des produits forestiers et des revenus financiers et que, lorsque la terre est rare, il est extrêmement difficile de protéger les forêts à moins qu'elles ne soient visiblement aménagées et productives. La production, sous réserve d'une bonne pratique sylvicole, est un élément essentiel de l'aménagement actif et peut aider à satisfaire les besoins des villageois vivant aux environs de la forêt; en outre dans de nombreux pays en développement, les forêts doivent rapporter un revenu afin que l'effort de protection puisse être maintenu.

Bonne pratique sylvicole

On a déjà fait mention du concept de bonne pratique sylvicole et son importance sera soulignée tout au long de l'étude. Une bonne pratique sylvicole consiste à conduire les opérations forestières de façon, non seulement à maintenir la plantation vigoureuse et en bonne santé, mais aussi à conserver la fertilité du site au cours des révolutions successives. La bonne pratique sylvicole représente la contribution technique au développement forestier durable; les considérations sociales et économiques revêtent aussi une importance majeure. La nécessité d'une bonne pratique sylvicole se fait particulièrement sentir à quatre stades d'une même révolution.

1. Sélection des essences

Les essences doivent être bien adaptées au site, en particulier au climat et au sol; si l'on plante une essence ou une provenance dans des conditions différentes de celles de son aire d'extension naturelle, ou "hors site", des problèmes surgissent généralement tôt ou tard.

2. Défrichement et établissement de la station

Les techniques de défrichement et d'établissement de la station doivent être appropriées au site, en particulier aux essences utilisées, mais aussi au type de terrain, à la pente et à la pluviométrie. Toute pratique sylvicole entraînant un risque sérieux d'érosion ou de perte de fertilité est irrationnelle; il est conseillé de conserver la couverture vivante et de limiter au minimum l'utilisation du feu ou du matériel de terrassement pendant la préparation du site.

3. Entretien et aménagement

Pendant la phase d'établissement, il est important que les arbres prennent un bon départ. Pour ce faire, on permet habituellement aux arbres cultivés de dominer le site le plus rapidement possible, en éliminant la végétation adventice et en assurant une teneur adéquate en éléments nutritifs et en humidité, par exemple en ajoutant des engrais et du paillis ou en conservant la couverture vivante.

Pendant les phases ultérieures de croissance, tout au moins pour la production ligneuse, il est important de prévenir la stagnation. On y parvient en pratiquant des éclaircies en temps voulu, lorsque l'accroissement annuel courant de la surface terrière se ralentit. Le maintien d'un matériel sur pied excessif, dans des plantations âgées, caractérise souvent les plantations mal aménagées et entraîne une absence presque totale de sous-étage et de tapis herbacé.

4. Protection

Une bonne hygiène forestière permet de maîtriser les sources potentielles de ravageurs et de maladies.

Il n'est pas toujours facile de concilier les méthodes recommandées; par exemple la meilleure façon d'assurer une bonne hygiène forestière ou de lutter contre les adventices peut être d'allumer un feu pendant la préparation du site, mais on risque ainsi de favoriser l'érosion. Les décisions dépendent des circonstances locales et si les essences proposées sont incompatibles avec une bonne pratique sylvicole, il y a tout lieu de penser que ces essences ne sont pas adaptées.

Les bonnes pratiques sylvicoles s'appliquent aussi bien aux plantations mixtes qu'aux plantations pures, mais parfois, la promotion de l'établissement de mélanges - pour couvrir le terrain, ou pour améliorer la qualité du sol en influant sur la microfaune et la flore - est un élément fondamental d'une bonne pratique, en particulier sur des sites écologiquement vulnérables.

Définition du terme "mélange"

On trouvera au chapitre 5 une classification dans laquelle les mélanges son classés en premier lieu en fonction de leur structure (mélange monostrate, c'est-à-dire mélange de dominants ou mélange bi ou pluristrate) et en deuxième lieu en fonction de la durée (mélange permanent ou temporaire). C'est là une classification pratique pour décrire les besoins de foresterie. Il faut également rappeler qu'il existe toute une gamme de degrés de mélanges: elle part des plantations monoclonales (qui représentent le degré de pureté le plus extrême), en passant par les plantations pluriclonales, monospécifiques (provenances uniques ou multiples), les plantations d'un petit nombre d'essences cultivées en blocs équiennes pour arriver aux plantations plurispécifiques de tous âges, à l'autre extrême. Cette gamme existe aussi dans la nature car les forêts naturelles ne sont pas toujours composées de nombreuses essences, ni même de plus d'une essence. On considère généralement qu'une plantation pure est une culture monospécifique constituée d'une ou de plusieurs provenances; dans les zones tropicales, une plantation industrielle mixte se compose habituellement de deux essences, mais le type de mélange peut être très varié - par exemple mono ou pluristrate, taillis, temporaire ou permanent. Les mélanges ne sont pas toujours le fruit d'une politique de plantation délibérée; ils résultent parfois de la régénération naturelle d'espèces adventices du sous-étage dans des plantations où un espacement relativement large a été maintenu. Les plantations industrielles plurispécifiques jardinées ne sont pas courantes, bien que celles d'acajou/teck/jacquier de Sundapola (Sri Lanka) (Tisseverasinghe et Satchihananthan 1957; Muttiah 1965, 1991) puissent être considérées comme un modèle de petite taille de ce type de plantation. Le mélange très complexe qui se rapproche de la forêt naturelle mixte tropicale décrite ci-dessus, pourrait cependant convenir pour des plantations à bois de feu et serait certainement bien adapté pour des plantations de protection sur des sites vulnérables.

Les définitions données ci-dessus correspondent à un mélange intime, pied par pied ou ligne par ligne ou éventuellement des mélanges de petits groupes. Mais on peut aussi obtenir un mélange, au sens large, en établissant des essences différentes sur des parcelles ou des blocs adjacents ou réaliser un autre type de mélange en pratiquant une rotation des espèces. Dans ce document, tous les degrés des mélanges sont étudiés; les techniques visant à réaliser des mélanges clonaux sont tout aussi intéressantes que les mélanges d'espèces ou de genres. L'attention est en particulier attirée sur les possibilités qu'offrent les mélanges "au sens large", par blocs, par opposition aux mélanges "au sens étroit", pied par pied. L'un des objectifs de la présente étude est d'examiner les méthodes qui permettent d'obtenir les effets désirables des mélanges avec les systèmes d'aménagement les moins complexes.

Importance des plantations monospécifiques

D'après une évaluation récente des superficies couvertes par des forêts artificielles dans les zones tropicales, l'eucalyptus, le pin, le teck et l'acacia sont les essences les plus communes. En Afrique et en Amérique latine tropicale, les eucalyptus et les pins représentent respectivement environ 50 et 80 pour cent de la superficie plantée, alors qu'en Asie tropicale, on trouve un grand nombre d'essences, dont 32 pour cent d'eucalyptus, de teck et de diverses variétés d'acacia (Pandey, 1992).

On ne connaît pas l'importance des plantations pures dans les régions tropicales, mais la liste ci-après des principales essences plantées dans les zones tropicales, qui est relativement brève, peut en donner une idée (Evans 1987):

Pins		34%
	P. patula, P. caribaea, P. elliottii, P. kesiya, P.merkusii, P. cocarpa & autres	
Autres conifères		3%
	Araucaria cunninghamii, A. angustifolia, Cupressus lusitanica & autres	
Eucalyptus		37%
	E. grandis, E. camaldulensis, E. globulus, E. saligna, E. deglupta, E. tereticornis, E. robusta, E. citriodora, E. urophylla & autres	
Teck	*Tectona grandis*	14%
Autres feuillus		12%
	Acacia, Gmelina arborea, Meliaceaea, Terminalia spp., Albizia spp., Triplochiton scleroxylon & autres	

Cette liste comprend dix espèces de conifères, neuf espèces d'eucalyptus et sept familles ou genres d'autres feuillus. Compte tenu des nombreux types de sols et de climats qui existent sous les tropiques, il y a tout lieu de penser que l'éventail d'espèces est encore plus restreint dans un pays ou une zone relativement homogène comme un district. Toutefois, quelques-unes de ces essences, comme *Eucalyptus camaldulensis*, poussent spontanément sur une très grande surface et comprennent un certain nombre de provenances différentes.

Les mélanges au sens étroit, qui consistent à établir plus d'une espèce sur une parcelle, sont peu fréquents dans les plantations industrielles. En ce qui concerne les mélanges au sens plus large - qui consistent à planter des essences différentes dans des parcelles voisines - il est difficile d'estimer d'après les statistiques publiées, leur fréquence actuelle d'implantation. En Nouvelle-Zélande, où *Pinus radiata* représente 85 pour cent des plantations forestières (Burdon 1982), il est clair que les mélanges sont très peu pratiqués. Dans quelques Etats d'Australie, la proportion est encore plus élevée (Fergusson 1983).

Quelques-une des plantations d'espèces papetières d'Afrique australe comprennent peut-être de grands blocs de *Pinus patula* ou d'eucalyptus. Les plantations d'Usutu au Swaziland, qui couvrent 52 000 ha, sont essentiellement composées de *P. patula*, comme celles du plateau de Viphya, au Malawi; il en est de même pour les plantations d'espèces papetières de Sao Hill (Tanzanie) et de Turbo (Kenya), en Afrique de l'Est.

Dans de nombreux districts forestiers des zones montagneuses d'Afrique de l'Est, on plantait autrefois habituellement un assortiment d'essences à croissance rapide, telles que *P. radiata, P. patula, Cupressus lusitanica* et quelques espèces d'*Eucalyptus*, mais cet assortiment a régulièrement perdu du terrain. La superficie sous eucalyptus a fortement diminué lorsque les chemins de fer ont adopté le mazout comme carburant. On a complètement cessé de planter *P. radiata* dans les années 60 à cause de la flétrissure

due au *Dothistroma* et à présent *C. lusitanica* et d'autres cyprès sont exposés à de graves infestations de pucerons *Cinara cupressi*, et risquent ainsi d'être exclus des programmes futurs de plantation en Afrique de l'Est. Dans les montagnes du Kenya, les plantations de conifères sont à présent à peu près limitées à une espèce, *Pinus patula*.

Les plantations industrielles monospécifiques sont nombreuses, mais il semble exister de vastes plantations mélangées (*Eucalyptus tereticornis* et *Acacia auriculiformis*) au Viet Nam (Cossalter 1991) et ailleurs; toutefois on ne sait pas au juste s'il s'agit de plantations à vocation industrielle ni si elles ont réussi à atteindre les objectifs fixés.

2. LES ECOSYSTEMES FORESTIERS

Les écosystèmes des forêts naturelles sont différents les uns des autres car les associations d'essences peuvent être très complexes ou relativement simples. La simplification de l'écosystème est associée à la spécialisation et tend à s'instaurer en réponse à des conditions climatiques, édaphiques ou abiotiques extrêmes. Ainsi les forêts à structures simplifiées qui contiennent un petit nombre d'essences spécialisées sont plus courantes dans le climat rude des régions les plus froides du monde: forêts de bouleaux de l'hémisphère boréal nord, *Pinus mugo* et *P. cembra* à des altitudes élevées en Europe, *Cupressus sempervirens* sur les pentes calcaires exposées au midi en Crète, *Alnus glutinosa* dans les vallées tourbières de Grande-Bretagne (Rackham 1990). Dans le sud de l'Australie, la forêt claire indigène est caractérisée par des peuplements pratiquement monospécifiques (Boardman 1990).

Bien que dans les zones tropicales humides, les forêts ombrophiles soient normalement plurispécifiques et multistrates, on trouve aussi des peuplements où la diversité des essences est réduite; c'est notamment le cas des peuplements naturels d'eucalyptus et de pins tropicaux, ainsi que des mangroves et des savanes arborées à pluviosité faible et incendies fréquents, deux types de forêts relativement pauvres en essences. En Ouganda, les peuplements dominés par *Cynometra alexandri* et *Parinari excelsa* constituent deux exemples de peuplements naturels contenant un nombre limité d'essences. Ailleurs en Afrique, les peuplements purs d'*Acacia tortilis, A. nilotica* et *Colophospermum mopane* ne sont pas rares. En Amérique latine de vastes superficies de terres sèches peuvent être couvertes d'une seule espèce de *Prosopis* spp. La forêt de Kemahang, dans la presqu'île malaise, contenait, avant son exploitation dans les années 60, un nombre réduit de diptérocarpacées et d'autres essences des familles des burseracées, lauracées, myristacées, myrtacées et sapotacées qui semblent avoir poussé spontanément après une tempête exceptionnelle survenue en novembre 1988 (Whitmore 1984). Dans le sud du Kalimantan, des *Agathis* ont poussé, avant la coupe, en peuplements atteignant jusqu'à 5 000 ha, et sont devenues l'essence principale ou unique de la plus haute strate (Whitmore 1984). Souvent, les peuplements plurispécifiques comprennent des groupes d'une seule espèce, ou même des bouquets d'un clone unique. Ainsi, lorsque certaines conditions sont réunies (teneur suffisante en éléments nutritifs, humidité abondante et rayonnement solaire important), même si les écosystèmes plurispécifiques complexes sont tout à fait fréquents, les peuplements monospécifiques n'ont rien d'anti-naturel en eux-mêmes; par ailleurs lorsque des mélanges se forment spontanément, ils sont souvent temporaires.

Tous les écosystèmes naturels sont dynamiques et sont caractérisés par des séries de végétation successives. Des perturbations se produisent à intervalles irréguliers dans les forêts naturelles, parfois au bout de plusieurs siècles, mais sur certains sites - par exemple dans les savanes qui sont exposées aux incendies - à intervalles fréquents. Les stades de la succession secondaire, après que l'écosystème forestier ait subi une perturbation, sont caractérisés par l'invasion précoce de quelques espèces pionnières de lumière, agressives mais peu longèves; cette invasion se produit fréquemment dans des peuplements monospécifiques et est suivie d'une colonisation par des espèces qui supportent mieux l'ombre et poussent sous le couvert de la série de végétation précédente, finissant parfois par devenir dominantes. Enfin, dans certains écosystèmes, au cours du

dernier stade de la succession, on obtient un mélange d'essences relativement constant, qui durera jusqu'à la prochaine perturbation (Whitehead 1982); en revanche, dans d'autres, surtout dans les zones tempérées, mais aussi dans les régimes de hautes futaies humides (voir les exemples de l'Ouganda cités plus haut), les forêts climax sont souvent plus ou moins monospécifiques.

Lorsque l'écosystème a subi une perturbation importante, les vitesses de croissance initiales tendent ensuite à être élevées et, pour quelques essences pionnières, elles peuvent être très fortes pendant les premiers termes de la série de végétation; ces essences pionnières sont mieux adaptées à la fertilité du site, mais relativement vulnérables au stress. De ce fait, au cours des stades plus tardifs de la série de végétation, au fur et à mesure que la biomasse augmente, les essences pionnières sont remplacées par des espèces qui supportent mieux l'ombre, ont une croissance plus lente, mais sont plus résistantes. Ainsi, il arrive qu'au cours des derniers termes de la série de végétation, la biomasse soit très élevée, mais les vitesses de croissance insignifiantes.

Certains écologistes ont fait valoir que cette situation finale représente le climax idéal: la forêt est alors stable et autonome - même si, comme on l'a noté plus haut, les essences ne sont pas toujours très diversifiées. D'autres ont fait remarquer qu'il est peu probable qu'un véritable climax soit jamais atteint (Jones 1945), car tôt ou tard des perturbations surviennent. Ce qu'il faut souligner, c'est que, dans un écosystème, on considère que la stabilité est atteinte quand la diversité des fonctions est suffisante. Or, une espèce peut remplir plus d'une fonction et une fonction peut être remplie par plus d'une espèce. Dans les plantations à vocation industrielle, la stabilité est atteinte lorsque les rendements ou la production ne subissent pas de changements importants imprévus et quand la fertilité de la station et la structure du sol sont maintenues. Même si la stabilité dépend parfois dans une certaine mesure de la diversité spécifique, il ne s'ensuit pas nécessairement qu'en foresterie de plantation l'objectif doit être d'obtenir le plus grand nombre d'essences possible afin d'atteindre une stabilité maximale, ni même que plus la diversité spécifique est importante, plus la stabilité est grande. Pour atteindre la stabilité, l'essentiel est que l'écosystème contienne suffisamment d'essences pour qu'une diversité des fonctions adéquate soit assurée (Zwolinski 1990) et le nombre d'essences requises pour atteindre la stabilité dans les plantations à vocation industrielle dépend de la station.

Lorsque les plantations sont cultivées à des fins commerciales, l'objectif est souvent de tirer profit des vitesses de croissance élevées pendant les premiers stades de la série de végétation; dans les régions tropicales et subtropicales, les essences des forêts artificielles s'accroissent de trois à sept fois plus vite que les espèces commercialisables que l'on rencontre au cours des stades tardifs de la succession dans la forêt naturelle (Evans 1990), toutefois cette accélération résulte tout autant de la sélection et de l'amélioration génétique des arbres, du faible intervalle et de l'aménagement, que de l'exploitation des vitesses de croissance initiales élevées. Le bois est récolté quand la croissance commence à se ralentir, ou peu de temps après. La coupe perturbe de façon importante l'écosystème, ce qui permet au cycle de recommencer en phase de croissance rapide. En foresterie artificielle commerciale, l'objectif est de maintenir l'écosystème dans un état d'instabilité contrôlée, bloqué dans un stade précis de la successsion, mais

l'expérience a montré que généralement les rendements ne peuvent être maintenus de façon durable qu'en ajoutant des intrants artificiels, tels qu'engrais, insecticides, fongicides etc. et en adoptant une pratique sylvicole rationnelle.

Si, au contraire, l'objectif est de protéger le site sans considérations de profit, il faut un écosystème qui puisse remplir cette fonction, et pour ce faire, il faut si possible, mais pas obligatoirement, lui permettre de progresser jusqu'à un stade tardif de la succession. L'objectif sera pleinement atteint si l'on parvient à rendre l'écosystème autonome, de préférence en conservant une vaste gamme d'essences.

Lorsque l'aménagement vise principalement à conserver la diversité biologique, il faut chercher à conserver le plus grand nombre d'essences possible ainsi que la diversité intraspécifique; il faut en outre maintenir tous les stades de la série de végétation dans l'écosystème. Toutefois, le maintien d'un écosystème n'entraîne pas nécessairement la conservation de toutes les essences qui le composent, et il est possible de conserver une espèce et de perdre des populations génétiquement distinctes ou des gènes qui peuvent être précieux pour l'adaptation et l'amélioration future de l'espèce (Wilcox, 1982).

En foresterie de plantation, surtout lorsque les révolutions sont courtes, quelques compromis s'imposent. Les gains de rendement peuvent être annulés par des facteurs négatifs tels que l'exportation d'éléments nutritifs au moment de la coupe, la baisse de la capacité de recyclage des éléments nutritifs, les dégâts à la structure du sol ou un affaiblissement éventuel de la résistance aux ravageurs et aux maladies. Tous ces inconvénients doivent être corrigés si l'on veut maintenir des rendements durables. Il faut des connaissances techniques pour réussir à minimiser ces pertes en choisissant des essences bien adaptées au site et en adoptant des pratiques sylvicoles rationnelles mais aussi pour déterminer où, comment et quand des processus naturels (comme la régénération d'un sous-étage) peuvent et doivent être utilisés, et dans quelle mesure ils doivent être complétés artificiellement. Les plantations mixtes jouent là un rôle et leur aménagement doit être basé sur l'observation attentive de la série de végétation locale, lorsque l'on dispose d'informations à ce sujet. Cependant, si les systèmes à révolution courte peuvent se justifier sur un site donné, les peuplements mélangés en eux-mêmes ne sont pas la panacée pour résoudre les problèmes associés à la foresterie commerciale. Plus la révolution est courte, plus la situation se rapproche de celle d'une culture agricole et plus la fertilité du sol devient importante (Lundgren 1980), et plus il est probable qu'il faudra ajouter des engrais.

3. IMPACT ECOLOGIQUE

3.1 SOLS

La création de plantations monospécifiques inquiète particulièrement parce qu'elles risquent d'entraîner une perte de fertilité et une dégradation des sols. Les caractéristiques principales des sols qui sont le plus souvent boisés dans les régions tropicales et subtropicales, de même que l'interaction entre les cultures arbustives et le sol sont étudiées en détail dans l'annexe 2.

Caractéristiques des sols

Les sols disponibles à boiser dans les régions tropicales et subtropicales sont souvent très altérés et pauvres en éléments nutritifs, mais même lorsqu'ils sont peu altérés, ils sont exposés à des pertes de minéraux par lessivage. Dans les zones tropicales humides, ces sols peuvent supporter une biomasse importante, grâce à la décomposition rapide de la litière et à la minéralisation des éléments nutritifs dans les couches superficielles. Lorsque l'on enlève la végétation pour pratiquer des cultures agricoles ou planter des arbres, il y a un risque élevé de perte de matière organique, de lessivage et de perte de fertilité. Il est important que de tels sites vulnérables ne soient pas défrichés; sur des sites déjà fortement dégradés, la première priorité doit être de reconstituer la teneur en matière organique du sol. Dans les zones arides et semi-arides, la litière et la teneur organique du sol peuvent être encore diminuées par des incendies; de ce fait, l'espèce climacique naturelle tend à être résistante au feu, mais les sites ne tolèrent qu'une faible densité de peuplement car ils sont peu fertiles.

La capacité qu'ont les arbres d'absorber les éléments nutritifs dépend non seulement des ressources disponibles dans la couche superficielle fertile, mais aussi des réserves en humidité et de la structure du sol. Les besoins en chaque élément nutritif varient en fonction du stade de développement du peuplement; ils tendent à être à leur maximum immédiatement après la fermeture du couvert. Certains éléments nutritifs, en particulier le phosphate, sont libérés lentement par les sols minéraux. La quantité en solution dont peuvent disposer les arbres à un moment donné est très faible par rapport à leurs besoins annuels et aux quantités qui sont emprisonnées dans la biomasse des arbres et dans la litière. Ainsi, la croissance saine et vigoureuse des arbres est subordonnée à la décomposition rapide de la litière qui permet de maintenir le cycle nutritif.

Le processus de décomposition est étroitement lié aux activités de la microfaune et de la flore du sol. La fonction de celles-ci dans les régions tropicales et subtropicales n'a pas été étudiée aussi attentivement que pour les zones tempérées. Cependant il est certain que la microfaune fragmente et, dans certains cas (par exemple les termites), minéralise la litière; ce processus est complété par des champignons et plus particulièrement par des bactéries. Le mélange d'essences composant un peuplement, qui influence à la fois l'acidité du sol et la proportion de cellulose et de protéines que contient la litière, peut avoir un impact important sur les populations de la microfaune et de la flore du sol et sur leur action; en outre une modification de la composition de la litière feuillue peut favoriser une composante de la microflore au détriment d'une autre.

Non seulement certains champignons symbiotiques vivent en association avec une essence présente dans un mélange, mais ils peuvent aussi être bénéfiques pour d'autres composantes d'un peuplement; ainsi, en Grande-Bretagne, les *Suillus variegatus* présents sur *Pinus silvestris* peuvent apporter des éléments nutritifs qui peuvent être absorbés par *Picea abies* (Ryan et Alexander 1990). Au Swaziland on a constaté qu'à des altitudes élevées, une litière d'aiguilles très abondante peut s'accumuler sous des *Pinus patula* maintenus à un écartement réduit (Morris 1986); la forme et le nombre des mycorrhyzes peuvent alors se modifier (Robinson 1973). On peut observer que, dans les régions tropicales et subtropicales, le problème d'accumulation de la litière est particulièrement aigu dans les peuplements de conifères à couvert serré, mais est moins grave dans les peuplements ouverts ayant un sous-étage de feuillus; en effet le mélange d'essences fourni par le sous-étage favorise la décomposition de la litière.

L'impact sur le sol des plantations serrées de peuplements purs de tecks a suscité des préoccupations. En effet, le teck est une espèce décidue dont les feuilles ne se décomposent pas facilement et sont hautement inflammables; en conséquence, les incendies sont fréquents dans les teckeraies sur les sites où la saison sèche est marquée, de sorte que le sol forestier est souvent nu au début de la saison des pluies. En outre, le teck a de grandes feuilles et les gouttes d'eau qui tombent des feuilles intensifient l'érosion. En plantant le teck à un écartement plus grand et en établissant un mélange d'autres essences cadufoliées dont les feuilles se décomposent plus facilement et sont moins inflammables, ou encore en laissant pousser des arbrisseaux ou des herbes qui feront office de sous-étage, on réduit l'incidence des incendies et de l'érosion (Bell 1963).

Bien que la plupart des éléments nutritifs présents dans la couche superficielle fertile proviennent des minéraux contenus dans le sous-sol ou de la litière, certains nutriments d'origine atmosphérique s'accumulent aussi dans la couche arable. La fixation d'azote dans les racines de certaines plantes est un exemple de ce processus, qui intéresse surtout les légumineuses; toutefois l'azote peut être fixé par plus de 200 espèces appartenant à 20 genres (Bond 1983), dont *Casuarina*, qui est probablement la plus importante des espèces tropicales non légumineuses. La fixation de l'azote peut s'effectuer par transfert direct des nodules racinaires vers le sol, mais elle passe le plus souvent par la litière feuillue (Ewel 1986). A Hawaï la fixation d'azote par *Albizia falcataria* a beaucoup plus accru les concentrations d'azote dans le sol que ne l'ont fait les *Acacia melanoxylon* (De Bell et al. 1985), sans doute parce que les feuilles d'*A. falcataria* sont beaucoup plus petites et se décomposent plus facilement. Toutefois on notera que des mélanges d' *Albizia falcataria* et d' *Eucalyptus saligna* à Hawaï (DeBell et al. 1985; 1987; 1989) ont donné des résultats très favorables sur d'anciens champs de canne à sucre, où en raison des apports d'engrais passés et des besoins en nutriments de cette culture, ces sols avaient sans doute une teneur exceptionnelle en nutriments.

Pour que les plantes fixatrices d'azote puissent améliorer la croissance d'un peuplement, les conditions du site doivent être adaptées; en d'autres termes, le sol doit être pauvre en azote, mais avoir une teneur suffisante en autres éléments nutritifs, en particulier en phosphate, et en humidité (Sprent 1985). Sur les sites dont la teneur en azote est adéquate, il a été démontré qu'un mélange d'espèces fixatrices d'azote ne favorise pas la croissance des essences principales et peut même l'inhiber en raison de la concurrence pour la lumière, l'humidité et les autres nutriments (Binkley 1983; 1984;

1990). Il est possible que les espèces fixatrices d'azote ne soient efficaces que si elles sont dominantes ou co-dominantes (Binkley 1990); aussi peut-on douter de leur efficacité lorsqu'elles sont cultivées en sous-étage. Il semble donc que les plantes fixatrices d'azote ne peuvent renforcer la croissance d'un peuplement que dans des conditions relativement limitées. Les effets bénéfiques des mélanges contenant des espèces fixatrices d'azote, comme les acacias dans des peuplements de pins, ne sont pas toujours visibles (Turvey et al. 1984).

Les modifications des paramètres du site se traduisent par un déclin de la productivité de la deuxième révolution

La composition spécifique d'un peuplement naturel ou d'une plantation exerce une forte influence sur le site, et en particulier sur les propriétés édaphiques. Une plantation monospécifique peut altérer l'équilibre nutritif ou les propriétés physiques qui caractérisaient ce même sol sous forêt naturelle; ce changement peut réduire la productivité réelle et potentielle du site, ainsi que la composition du sous-étage ou sous-bois. En revanche, une plantation monospécifique peut améliorer les qualités du sol si elle a été établie là où il n'y n'avait pas de couverture. Ainsi, lorsque les propriétés du site sont modifiées, on constatera souvent des différences de croissance et de rendement de la deuxième génération et des suivantes; toutefois ces changements peuvent aussi bien résulter de l'adoption de pratiques d'aménagement ou de semences différentes que d'une modification de la composition par essences ou du passage à une essence unique.

Si l'on craint une baisse de la production de la deuxième révolution (et des suivantes), c'est essentiellement à la suite de deux expériences: les plantations d'épicéa (*Picea abies)* en Europe centrale et en particulier en Saxe, qui ont débuté au milieu du XIXe siècle, et celles de *Pinus radiata,* en Australie méridionale qui ont été créées au milieu du XXe siècle. En outre, on a enregistré des données de croissance détaillées sur des placettes d'échantillonnage permanentes qui couvrent à présent trois révolutions, dans les plantations d'Usutu (Swaziland). Une étude assez détaillée de ces expériences permet de mieux comprendre le phénomène du déclin de productivité de la deuxième révolution.

a) Les épicéas en Saxe

Au milieu du XVIIIe siècle, on a commencé à planter massivement des épicéas en blocs purs en Europe centrale, en partie parce que l'on croyait avoir détecté un déclin de production dans les forêts de hêtres et de chênes. Les monocultures d'épicéas avaient toujours donné de bons résultats sur les podsols de haute altitude et on trouve d'ailleurs naturellement cette espèce en peuplements purs, mais vers le milieu du XIXe siècle, on a constaté une baisse des rendements, en particulier sur les sols de plaine argileux. Ce déclin a été attribué à l'établissement répété de peuplements purs d'épicéas. Dans les années 20, Wiedemann a effectué de vastes enquêtes sur ce problème en Saxe (voir résumé dans Jones 1965). Mais, en partie parce que les méthodes d'analyse dont on disposait à l'époque étaient insuffisantes, il n'est jamais parvenu à dégager exactement la cause du problème. Il avait bien remarqué que toutes les plantations d'épicéas n'étaient pas affectées, que dans certaines la croissance s'arrêtait mais reprenait ensuite et que ce phénomène était lié d'une certaine façon aux étés secs. Grâce à ses travaux et aux

enquêtes ultérieures, certains des facteurs exerçant une influence ont été identifiés et des causes possibles du problème ont été indiquées:

- sur les sols argileux, les racines de l'épicéa sont très peu profondes; pendant la première révolution, l'épicéa peut s'appuyer sur d'anciennes lignes racinaires, mais au moment de la deuxième révolution celles-ci sont embourbées et l'épicéa est presque complètement enraciné dans la couche humifère qui se dessèche en période de sécheresse et peut être engorgée d'eau en hiver;

- bon nombre des plantations ont été établies sur d'anciennes terres arables ou sur d'anciennes parcelles cultivées en forêt (*waldfeldbau)*; on le sait que dans ces circonstances, l'épicéa est sujet au pourridié *Fomes annosus*[1], mais il faut jusqu'à une révolution pour que les effets du champignon deviennent apparents car celui-ci pénètre par les souches fraîchement coupées, puis par les greffes racinaires pour arriver aux arbres vivants. Ainsi, ce qui était en réalité un problème de la première révolution ne se manifestait que pendant la deuxième;

- sur de nombreux sites, les sols avaient déjà été appauvris avant l'établissement des épicéas, car on avait coutume de ramasser toute la litière qui se trouvait sous les peuplements précédents;

- à l'époque, les pratiques d'aménagement favorisaient les peuplements très denses; la litière avait donc tendance à s'accumuler, ce qui compromettait la minéralisation de l'azote.

Ainsi, il y a plusieurs causes possibles qui, réunies, pourraient expliquer dans une large mesure l'arrêt de la croissance. Point important, le problème était plus apparent lorsque l'épicéa était planté hors de son aire d'extension naturelle, sur des sols argileux de plaine. Malheureusement on a eu tendance à accepter sans discussion l'explication initiale qui attribuait l'arrêt de croissance de l'épicéa à la pratique de la monoculture. En réalité, cette explication établissait une relation de cause à effet entre des phénomènes sans rapport entre eux et les peuplements purs d'épicéas ont souvent été assimilés à une monoculture de n'importe quel conifère et même de n'importe quelle essence (Jones 1965).

Plus récemment, on a fait valoir que dans les classes d'âge moyennes de *Picea abies* en Allemagne, malgré des pertes d'aiguilles et un affaiblissement des cimes, les rendements dépassent les prévisions de 20 à 40 pour cent; ce phénomène a été attribué à l'augmentation de la température, des précipitations et du CO_2 et à une minéralisation plus élevée (Kenk 1990b).

---

[1] L'appellation *Heterobasidion annosum* est plus correcte, mais les forestiers connaissent généralement mieux l'ancien nom.

b) *Pinus radiata* en Australie méridionale

P. radiata avait été planté sur des sols sableux peu fertiles en Australie méridionale. La première révolution a été abattue à environ 25 ans et les rendements obtenus ont été acceptables. Quand la deuxième révolution a atteint l'âge de 10 ans environ, l'analyse des placettes d'échantillonnage permanentes a montré que les plantations avaient chuté d'une, deux ou même parfois trois Classes de fertilité stationnelle (SQ) (Keeves 1966). Chaque classe de fertilité représentait 140 m^3/ha à l'âge d'exploitabilité; la classe VII avait un volume sur pied d'environ 5 000 pieds3/ac (350 m^3/ha) et la classe IV de 11 000 pieds^3/ac (770 m^3/ha). Il s'agissait donc d'une perte importante. Les rendements n'avaient, semblait-il, pas diminué dans les peuplements où les rémanents surgis après une coupe rase n'avaient pas été brûlés et où une régénération naturelle s'était produite. Or, on pratiquait normalement le brûlis avant de replanter.

Pendant les deux décennies suivantes, la recherche a été axée sur la baisse du rendement. Les sols sont constitués de sables grossiers qui ont une faible capacité de rétention de l'eau et dont les éléments nutritifs sont facilement lessivés. On a constaté qu'il fallait s'intéresser de près à l'interaction entre les disponibilités en eau et les ressources en éléments nutritifs. Il était fondamental de maintenir la teneur en matière organique de la couche superficielle fertile pour que cette relation soit favorable (Sands 1983). Non seulement la matière organique augmentait les ressources en azote et la capacité d'échange de cations mais elle réduisait la densité apparente et accroissait la capacité au champ; s'il n'y avait pas suffisamment d'eau, les arbres étaient incapables d'absorber les éléments nutritifs, même si le sol en contenait (Boardman 1982). La baisse du rendement de la deuxième révolution a ainsi été associée à un équilibre nutritif médiocre, à de faibles réserves d'humidité, à la perte de matière organique et à la compaction du sol ainsi qu'à la concurrence des adventices (Turner 1983; Squire 1983).

Pour résoudre le problème, il faut adopter une bonne pratique sylvicole, à savoir: préparation plus soigneuse du site, suppression du brûlis, conservation de branches faisant office de mulch après la coupe et réduction de la concurrence d'autres espèces. L'application progressive d'engrais a été introduite afin de lutter contre la tendance au lessivage des sols sableux et de maintenir les ressources en éléments nutritifs au moment où la demande est la plus forte; on a constaté que cette pratique convenait bien au mode d'enracinement de *P. radiata* (Boardman 1982). Grâce à ces pratiques, associées à une sélection génétique visant à accroître la vigueur des arbres, les rendements de la deuxième révolution se sont généralement améliorés.

On a fait valoir qu'aucune étude n'a démontré que l'exportation d'éléments nutritifs lors de la coupe ou de la conversion en pins avait entraîné un déclin de productivité en Australie méridionale (Turner 1983). Dans ce pays, le rendement de la deuxième révolution ne diminue que sur les sols dont l'équilibre nutritif est précaire. Sur les sols argileux lourds relativement fertiles de la Nouvelle-Galles du Sud, *P. radiata* aurait fait passer l'indice de fertilité de $H_{dom(20)}$ de 60 m pendant la première révolution à $H_{dom\ (20)}$ de 70 ou 80 m pendant la deuxième révolution (Muir 1970).

Les points à retenir semblent être les suivants:

- le problème a été remarqué grâce à des placettes d'échantillonnage permanentes, qui ont été créées pour la première fois en 1935 (Boardman 1988);

- le problème apparaît sur des sols difficiles dont l'équilibre nutritif est précaire au départ et dont la capacité de rétention d'eau est faible;

- des ressources suffisantes étaient disponibles pour permettre d'étudier le problème et de trouver une solution;

- sur les sols peu fertiles, le risque d'une baisse du rendement de la deuxième révolution est réel; la solution consiste dans une large mesure à adopter une bonne pratique sylvicole permettant de conserver la teneur en humidité du sol et de maintenir la teneur en matière organique, et à effectuer des applications répétées d'engrais adaptées aux besoins de la culture à chaque stade de son développement.

c) Plantations d'Usutu, Swaziland

Le suivi des forêts artificielles d'Usutu, qui sont essentiellement constituées de *Pinus patula,* et de quelques *P. elliottii* et *P. taeda,* a commencé à la fin des années 60. Au début de la deuxième révolution, des placettes d'échantillonnage permanentes ont été créées et depuis, leur évolution a constamment été contrôlée. Quelques stations portent à présent leur troisième révolution de pins (Evans 1975, 1988). En 1983, une étude pédologique intensive a été entreprise (Morris 1986).

Les résultats de l'étude pédologique sont analysés de façon plus détaillée dans l'annexe 2. Il est intéressant de noter qu'alors que la plus grande partie des plantations poussent sur un fond de granit, 15 pour cent de la surface plantée a été établie sur les sols du complexe Ushushwana qui recouvrent du gabbro, or ces sols sont extrêmement pauvres en phosphate. Si des mesures correctives ne sont pas prises, il est très probable que les rendements baisseront sur les sols du complexe Ushushwana.

Les plantations d'Usutu se trouvent à une altitude comprise entre 1 000 et 1 450 m; au-dessus d'environ 1 350 m, la litière s'accumule sous les arbres, aussi bien sur les sols granitiques que sur ceux du complexe Ushushwana. L'immobilisation d'éléments nutritifs dans la litière, à laquelle s'ajoute l'exportation de nutriments au moment de la coupe, pourrait entraîner une carence en nutriments, en particulier en azote, phosphate et potassium. Il était autrefois habituel de brûler les branches, les cimes et même la litière d'aiguilles après une coupe rase, mais cette pratique a été abandonnée en 1973, car elle a été considérée comme responsable des attaques du virus pathogène *Rhizina undulata* qui sont survenues par la suite. Toutefois, il est démontré que lorsque l'on ne pratique pas le brûlage, l'accumulation de litière sous les arbres de la deuxième révolution est beaucoup plus abondante, bien que la perte d'azote et de soufre au profit de l'atmosphère soit réduite. L'analyse des statistiques de croissance et des placettes d'échantillonnage permanentes d'Usutu a confirmé que, sur les sols du complexe Ushushwana, les rendements baissent d'environ 30 pour cent au cours de la troisième révolution, mais d'après les tests effectués, les plantations établies sur ces sites devraient bien réagir à l'engrais P, ce qui pourrait résoudre le problème.

L'analyse des statistiques de croissance provenant des plantations établies sur des sols granitiques s'est avérée plus compliquée. D'après les premiers chiffres disponibles, la croissance de la deuxième révolution serait plus rapide pendant les deux premières années qu'au cours de la première révolution, puis se ralentirait pendant les quatre années suivantes à peu près. Ce phénomène a été expliqué par deux facteurs: premièrement, les arbres de la deuxième révolution ont été établis sur des sites exempts de végétation adventice; ensuite, la deuxième révolution a été plantée après plusieurs années consécutives de faibles précipitations; comme Usutu reçoit juste assez de pluies pour soutenir *P. patula*, les années de sécheresse ont des effets négatifs importants sur les rendements (Evans 1975).

On dispose à présent de résultats sur les cultures de la deuxième révolution, à l'âge de douze ans, et sur celles de la troisième révolution jusqu'à l'âge de six ans. Dans les placettes de la deuxième révolution, les baisses de rendement ont été insignifiantes - 8 pour cent sur le complexe Usushwana et 4 pour cent sur les sols granitiques. Sur la deuxième révolution de *P. elliottii*, on a constaté une baisse minime de la hauteur de 0,36 m (hauteur normale: 15,57 m) à l'âge de douze ans. Pendant la troisième révolution, malgré la nette baisse de rendement qui a été notée précédemment sur les sols du complexe Usushwana, sur un ensemble de placettes établies sur une petite zone sur des sols granitiques, les rendements ont été sensiblement meilleurs (+21 pour cent) que ceux de la deuxième révolution, alors que sur la surface la plus importante, l'amélioration des rendements a été insignifiante (4 pour cent). D'une manière générale, on peut conclure de ces résultats que, sur sols granitiques, même si l'on prend en compte des circonstances atténuant les augmentations de rendement dérivées de l'utilisation de matériel génétique et de techniques d'implantation améliorés, aucune baisse de rendement n'a été constatée (Evans 1988).

Les points à retenir semblent être les suivants:

- un système de placettes d'échantillonnage permanentes a été mis en place, de sorte qu'il est possible de contrôler avec précision la croissance;

- alors que, comme on l'a indiqué, la teneur en éléments nutritifs devrait généralement diminuer avec le temps, ce qui devrait entraîner une baisse des rendements (Morris 1986), il n'a pas été possible de détecter cette baisse d'après les données sur la croissance, sauf sur un site difficile;

- le problème de l'accumulation de la litière, à des altitudes élevées, n'a pas encore été résolu et pourrait être une cause d'épuisement des nutriments dans les peuplements de *P. patula*.

d) Conclusion sur la baisse de rendement de la deuxième révolution

Les mélanges peuvent jouer un rôle dans l'aménagement des sols, mais, dans la mesure où la baisse de rendement de la deuxième révolution s'explique par des modifications des propriétés du site, il semble évident que le problème peut se poser sur les sols peu fertiles et sur quelques autres sites; toutefois, la diminution des rendements peut être corrigée grâce à de bonnes pratiques sylvicoles, en particulier le choix

d'essences adaptées au site et l'application d'engrais pour compenser les carences en nutriments. Bien que sur les sols fertiles, il ne soit pas encore toujours possible d'obtenir une preuve significative sur le plan statistique de la diminution des rendements, des pédologues ont fourni des preuves suffisantes de la probabilité d'une perte de nutriments (Lundgren 1980; Morris 1986; Young 1976) que les forestiers ne peuvent pas se permettre d'ignorer. Il est évident qu'il faut chercher à conserver les propriétés des sols, notamment en évitant leur tassement par des engins lourds ou en évitant de les exposer en pratiquant le brûlage. Ces problèmes ne viennent pas nécessairement du fait que les plantations sont constituées d'une seule essence ou d'un mélange.

L'importance des placettes d'échantillonnage permanentes pour détecter les variations du rendement a été soulignée dans cette étude. Mais il arrive que les baisses de rendement ne soient pas découvertes avant que la révolution ne soit bien avancée ou même avant la révolution successive en raison de problèmes d'échantillonnage et d'interprétation (Ryan 1985). Les pratiques sylvicoles qui risquent d'épuiser les réserves en nutriments, en humidité ou en matière organique de la couche superficielle fertile doivent être évitées quel que soit le site.

Rôle des mélanges dans l'aménagement des sols

Les mélanges peuvent être recommandés dans les conditions suivantes:

a) Couverture vivante

L'introduction d'une matrice d'arbres ou d'arbustes, qui fournira rapidement une couverture vivante, est souvent souhaitable sur les sites où il est important que les sols ne restent pas exposés longtemps, durant la phase d'établissement, en raison des risques d'érosion. Mais souvent, on peut obtenir le même effet en plantant des espèces légumineuses non ligneuses, comme les lupins, ou en permettant à des herbes ou arbustes adaptés de coloniser temporairement le site. C'est surtout sur les sites des forêts ombrophiles qu'il est important que le sol ne soit pas exposé. Si la protection et la conservation du sol sont des objectifs fondamentaux, il est probable que le site ne se prête pas au défrichement et il faut envisager le recours à une plantation d'enrichissement. Sur quelques sites, comme les sables grossiers, la meilleure façon d'obtenir une couverture vivante peut être d'utiliser les résidus végétaux comme le mulch après le défrichement ou après une coupe rase; pour trouver un équilibre entre la nécessité de protéger le sol en encourageant la couverture vivante, d'une part, et celle de réduire la concurrence des adventices d'autre part, il est nécessaire de bien connaître la station.

Indépendamment de la composition spécifique, certains systèmes d'aménagement, qui impliquent la destruction ou la suppression de la litière - par exemple défrichement au bulldozer, brûlage des rémanents ou enlèvement de la litière afin de l'utiliser comme litière pour le bétail ou comme combustible - risquent d'entraîner une baisse importante de la teneur en matière organique dans la couche arable. Cette réduction a des effets négatifs sur la capacité d'échange de cations, sur les disponibilités en eau et sur la structure du sol, qui se trouve ainsi exposé à l'érosion. Les plantations de teck en Inde, en Indonésie et à Trinidad ou les plantations d'eucalyptus établies sur des pentes abruptes en Ethiopie offrent des exemples de ce phénomène. Il s'agit-là de problèmes d'administration et de protection plutôt que de sélection ou de composition spécifique.

b) Encouragement de la décomposition de la litière

Sur les sites où il y a un risque d'accumulation de la litière, il peut être utile d'introduire un mélange d'essences dont on sait que les feuilles sont appréciées par les agents biologiques du sol de façon à accélérer la décomposition de la litière et la minéralisation des nutriments. Les feuilles de *Cordia alliodora* se sont décomposées plus rapidement quand les arbres étaient cultivés en mélange avec d'autres espèces plutôt qu'en peuplements purs (Babbar et Ewel 1989). On obtient le même effet en alternant les révolutions d'essences qui tendent à accroître l'accumulation de litière (par exemple les conifères sur certains sites) et d'espèces qui au contraire favorisent sa décomposition (par exemple quelques espèces de feuillus). Parfois une réduction du volume sur pied encouragera la régénération naturelle d'un sous-étage bénéfique de petits arbres, arbustes et herbes, qui remplira la même fonction.

Fixation de l'azote

L'introduction d'espèces fixatrices d'azote peut améliorer le rendement global sur des sites pauvres en azote. Des augmentations des concentrations d'azote dans le sol ont été constatées à Hawaï (DeBell et al. 1985) et en Inde (Samraj et al. 1977), mais il n'est pas certain que les espèces fixatrices d'azote cultivées en demi-ombre, en tant qu'essences de sous-étage, fixent réellement une grande quantité d'azote.

Conclusions sur les sols

1. Une grande partie des sols qui sont disponibles pour établir des plantations forestières dans les régions tropicales et subtropicales sont naturellement peu fertiles et se dégradent facilement.

2. Certaines méthodes utilisées pour défricher les sites en vue d'y planter des forêts sont extrêmement destructrices pour les sols. C'est notamment le cas lorsque l'on emploie des engins lourds et lorsque l'on pratique le brûlage sans discernement, car on supprime ainsi la couche superficielle fertile et le sol se trouve exposé à l'érosion. Les sols des forêts ombrophiles sont endommagés si l'on utilise ces techniques. Toutefois on notera que, dans la zone des forêts humides, presque toutes les plantations forestières sont actuellement établies sur des sites déjà dégradés; du reste, dans les Tropiques, le boisement est plus fréquemment pratiqué dans les prairies, les forêts sèches basses, la savane arborée, ou les terres à végétation altérée que dans des forêts denses plurispécifiques (Wood & Dawkins 1971).

3. La conservation de la teneur organique de la couche arable et le recyclage rapide des éléments nutritifs, grâce à la décomposition de la litière, contribuent de façon importante au maintien de la fertilité du sol.

4. Les pertes d'éléments nutritifs sont inévitables dans les forêts exploitées (à cause de la suppression de la biomasse au moment de la récolte), mais le déclin de productivité de la deuxième révolution ne devrait se produire que sur les sites pauvres en éléments nutritifs et peut être corrigé. Le déclin de la deuxième révolution n'est pas inévitable dans les plantations monospécifiques. Bon nombre des problèmes associés aux forêts

artificielles monospécifiques peuvent être surmontés, ou tout au moins grandement atténués, grâce à une bonne pratique sylvicole, qui consistera par exemple à choisir des techniques de défrichement non agressives, en particulier en ce qui concerne l'emploi d'engins lourds et le brûlage, à maintenir un équilibre entre la mise à nu du sol et le contrôle de la concurrence d'autres espèces, à éviter le surpeuplement (de façon à ce que les strates de petits arbres, d'arbustes et d'herbes puissent se développer) et à apporter des engrais complémentaires. Ces pratiques sont appropriées, qu'il s'agisse de plantations mixtes ou de plantations pures.

5. Les plantations mélangées peuvent contribuer à améliorer la fertilité du sol dans certaines conditions:

- pour fournir une litière feuillue hétérogène afin de faciliter la décomposition de la litière et d'empêcher que celle-ci ne s'accumule sur le sol forestier, de façon à maintenir la teneur en matière organique des couches superficielles;

- pour fournir une couverture vivante afin de réduire le risque d'érosion par le vent ou la pluie et d'empêcher l'insolation de la couche superficielle fertile, qui endommagerait la microfaune et la microflore du sol; cet avantage est particulièrement important pendant la phase d'établissement.

On peut souvent obtenir ces deux effets en encourageant et en contrôlant la croissance de la végétation naturelle sous des plantations pures:

- adjonction d'arbres et d'arbustes fixateurs d'azote; cependant ils n'ont sans doute une action bénéfique que sur les sols pauvres en azote, mais leur teneur en autres nutriments et en humidité est suffisante; en outre, comme on l'a déjà indiqué, ces espèces ne soit pas toujours efficaces lorsqu'elles sont cultivées en sous-étage. Le nombre de sites adaptés est probablement limité;

- les mélanges présentent d'autres avantages potentiels pour l'aménagement des sols, mais ils n'ont pas été démontrés dans les zones tropicales: il s'agit notamment de l'"effet de pompage des nutriments", grâce auquel les espèces à enracinement profond pompent des éléments nutritifs dans le sous-sol et les déposent à la surface dans leur litière, et des interactions bénéfiques avec les mycorrhyzes.

3.2 CLIMAT ET POLLUTION

Changements climatiques

Les changements climatiques que l'on prévoit à court ou à moyen terme peuvent avoir des effets positifs ou négatifs sur la croissance des arbres et des forêts. L'accroissement des taux de CO_2 et le réchauffement des températures peuvent augmenter les vitesses de croissance, mais la diminution de l'insolation et la sécheresse peuvent les réduire. Certains climats peuvent devenir plus variables. Les gammes d'essences ou de provenances qui existent actuellement et qui ne sont pas suffisamment protégées contre les changements écologiques, comme les modifications climatiques, seront réduites et

quelques espèces ou provenances risquent de disparaître. La présente section étudie la réaction probable des plantations mono ou plurispécifiques face aux variations climatiques.

On sait que les concentrations de certains gaz, comme l'anhydride carbonique (CO_2), le méthane (CH_4), et le protoxyde d'azote (NO_2), ont augmenté depuis le début de la révolution industrielle au milieu du XVIIIe siècle, et on a prédit que cela entraînerait un réchauffement de la planète (effet de serre). D'après une estimation, depuis 1765, les concentrations de CO_2 ont augmenté de 25 pour cent, celles de CH_4 de 100 pour cent et celles de NO_2 de 10 pour cent (Jones & Wigley 1990); selon une autre estimation, ces mêmes concentrations auraient augmenté respectivement de 26 pour cent, de 143 pour cent et de 17 pour cent depuis 1850 (Andrasko 1990). Les concentrations de CO_2 ont varié tout au long de l'ère géologique, mais elles sont aujourd'hui plus élevées qu'elles ne l'ont jamais été depuis 160 000 ans (Andrasko 1990). Les estimations concernant les accroissements annuels de CO_2 sont peu précises; une seule source donne une fourchette comprise entre 0,25 pour cent et 0,7 pour cent (Andrasko 1990); ainsi, par rapport aux taux antérieurs à la révolution industrielle, les taux de CO_2 pourraient doubler dès le milieu du XXIe siècle ou seulement au XXIIIe siècle.

On admet généralement que les températures mondiales ont augmenté de 0,5°C par rapport au siècle dernier (Andrasko 1990, Jones & Wigley 1990). Toutefois le réchauffement de la température n'est pas uniquement lié à l'augmentation des concentrations de CO_2. Il y a d'autres facteurs qui provoquent une élévation des températures, comme les éruptions volcaniques, les éruptions solaires et les mouvements des courants océaniques, qui sont généralement imprévisibles. L'augmentation des taux de $C0_2$ pourrait être responsable d'une élévation de température de 0,8°C au maximum ou de 0,2°C au minimum, par rapport au siècle dernier (Jones & Wigley 1990).

Si la concentration de $C0_2$ dans l'atmosphère double, les températures mondiales pourraient monter de 3 à 5°C et les moyennes régionales pourraient varier de -3°C à +10°C; les précipitations mondiales pourraient augmenter de 7 à 15 pour cent et les moyennes régionales varier de -20 à +20 pour cent; l'humidité régionale des sols pourrait varier de -30 à +30 pour cent (Andrasko 1990). D'après certains calculs, si le CO_2 atmosphérique double, l'augmentation générale de la température sera de 3 pour cent en Asie du Sud-Est et de 4,5 pour cent en Afrique de l'Ouest; les modifications des précipitations sont une accentuation significative des variations saisonnières - plus de pluies pendant les moussons et moins de pluies pendant les saisons sèches entre les moussons - en Asie du Sud-Est et une légère augmentation (0,1 mm/jour) en Afrique de l'Ouest.

L'impact de ces modifications des températures et de la pluviométrie sur la végétation est encore plus difficile à prévoir que les modifications elles-mêmes. Alors que les forêts tempérées et subtropicales risquent de s'étendre vers les poles, les forêts subtropicales humides risquent d'être remplacées par des forêts tropicales sèches et les prairies, les savanes arborées et les déserts risquent de s'étendre (Andrasko 1990, Calabri 1991). La fréquence et la gravité des incendies de forêts et des infestations de

ravageurs risquent d'augmenter en raison de l'accumulation de litière et de bois mort qui résultera de l'accélération de la croissance de la végétation, due à l'enrichissement en CO_2.

Il est possible que le réchauffement provoque, entre autres effets, une extension générale des zones sèches plus loin de l'Equateur. Toutefois, l'effet de réchauffement et de dessèchement ne sera pas uniforme dans le monde; dans certains endroits les températures risquent de baisser et la pluviométrie d'augmenter et dans de nombreuses régions les précipitations seront plus irrégulières. Aux extrêmes de la zone de convergence intertropicale en Afrique, les pluies sont déjà irrégulières et elles le deviendront certainement encore plus.

Il est probable que le premier effet sur les cultures arbustives sera que le manque de pluies à la période de plantation sera plus fréquent, ce qui rendra la régénération plus difficile. Dans ce cas, il faudra sélectionner des espèces résistant mieux à la sécheresse. Celles qui seront considérées comme étant à la limite de leur aire d'extension naturelle devront être remplacées par des essences résistant mieux à la sécheresse, ou s'être montré capables de maintenir leur croissance. Il faudra sans doute plus de temps pour que la mortalité induite par la sécheresse des arbres arrivés à l'âge d'exploitabilité devienne apparente; mais comme ces arbres seront sous stress, il est probable que l'incidence des ravageurs et des maladies augmentera et que les risques d'incendie s'aggraveront. Les changements climatiques pourraient aussi provoquer une modification de l'aire d'extension des ravageurs et des maladies. Le champignon *Guignardia aesculi* qui attaque le marronnier d'Inde (*Aesculus hippocastaneum)* a, ces dernières années, progressé au nord des Alpes et on le trouve maintenant jusque dans le sud de la Scandinavie; *Ceratocystis fimbriata*, une maladie des platanes (*Platanus spp)* et son insecte vecteur se déplacent de la Méditerranée vers le nord. Bien que le rapport avec le réchauffement climatique n'ait pas été prouvé, ces exemples donnent une idée des tendances qui pourraient apparaître (Donnabauer 1991).

Une politique de plantations mixtes sera justifiée sur des sites où les précipitations actuelles sont suffisantes mais variables et où l'on espère réussir à établir une nouvelle espèce précieuse de moyenne à longue révolution mais qui manque de résistance à la sécheresse. Dans des cas de ce genre, un mélange d'essences moins prisées, mais plus résistantes à la sécheresse permettra d'éviter l'échec biologique total. Rien n'indique que les mélanges renforceront la capacité de survie des essences les moins robustes.

Bruenig (1991) considère qu'un changement climatique est en cours et fait remarquer que "... ce changement affectera les fonctions des forêts et donc leur rôle dans la biosphère et leur utilité pour l'humanité". Il souligne la nécessité que les forestiers organisent les forêts artificielles de façon à ce qu'elles répondent mieux aux variations et aux extrêmes climatiques, maintiennent une diversité biologique élevée et choisissent des essences et conçoivent des mélanges d'espèces qui s'adaptent non seulement aux changements futurs du climat mais aussi à ceux de l'environnement économique et social.

Il existe aujourd'hui des techniques qui permettent de sélectionner et de reproduire des arbres adaptés à des sites et à des conditions spécifiques. Il est donc possible d'établir des plantations qui s'adaptent relativement bien à une modification du climat, mais pour

obtenir un effet positif, il faut prévoir avec soin les changements. Moins il y a de variations, plus le risque augmente et les plantations les plus vulnérables seront les plantations monoclonales. Les plantations mixtes pourraient être un élément de la stratégie. Toutefois, les provenances et les clones qui sont hautement spécifiques à un site sont acceptables dans les projets à révolution courte, à condition que l'on dispose d'un ensemble de matériel génétique adapté à diverses conditions climatiques qui puisse être utilisé pour remplacer rapidement le matériel génétique inadapté. L'intensification des recherches sur la variation génétique ou sur le mélange d'essences à utiliser dans une plantation peut constituer une sorte d'"assurance". Ce point est étudié plus à fond dans le chapitre 7. Le choix est largement conditionné par les objectifs d'aménagement et les ressources financières.

Réservoirs de CO_2

Les arbres en croissance prélèvent du CO_2 dans l'atmosphère et l'emmagasinent sous forme de cellulose. Cependant, quand les arbres plantés sont utilisés (par exemple pour faire du bois de feu) ou quand ils arrivent à maturité, la mort de certains sujets et les processus naturels de putréfaction restituent à l'atmosphère le CO_2 qui lui avait été enlevé, si bien que l'accroissement net des quantités stockées est nul. Les plantations sont plus efficaces pour capter le CO_2 quand elles sont utilisées comme solution à court terme ou quand elles ont comme produit final le bois d'oeuvre à transformer en produits durables. Dans ce cas, le CO_2 est immobilisé sous forme de cellulose longtemps après la coupe. Les plantations à bois de feu contribuent à emmagasiner le CO_2 quand les arbres sont en cours de croissance et elles pourraient aider à réduire le taux d'accroissement du CO_2 atmosphérique, surtout si le bois de feu est par la suite utilisé de façon efficace. En plantant des essences à croissance rapide qui ont besoin de beaucoup de lumière, on peut obtenir précocement un effet, mais si l'adjonction d'espèces d'arbres, d'arbustes et d'herbes demandant de l'ombre peut améliorer le rendement total d'un site, un mélange permettra de capter davantage de CO_2.

Microclimat

Les forêts améliorent le climat local, en abaissant les températures et en augmentant l'humidité. Les plantations mixtes qui produisent des forêts pluristrates sont particulièrement efficaces à cet égard. Il existe un contraste marqué entre les microclimats plus uniformes, que l'on rencontre dans les plantations mixtes (de tous âges) d'acajou/teck/ jacquier, et les fluctuations climatiques plus extrêmes que l'on trouve dans les plantations pures de teck à Sundapola, Sri Lanka.(Ng 1991).

Un brise-vent modère le microclimat jusqu'à une distance représentant 20 fois sa hauteur sous le vent ou plus. Pour obtenir une protection maximale, il est préférable que, au lieu d'agir comme un mur qui provoque un vent arrière de turbulence, la haie d'arbres filtre le vent et lui permette de passer doucement au-dessus. Un brise-vent composé d'arbres hauts au centre et d'arbres plus petits aux extrémités a le profil voulu. On peut utiliser un mélange de petites et de grandes essences pour l'obtenir.

Pollution

Les dommages aux forêts dus à la pollution de l'air provoquée par l'homme (anhydride sulfureux, pluies acides, métaux lourds) sont surtout un problème dans les pays où il existe des industries lourdes, des centrales de production d'énergie électrique et un grand nombre de véhicules à moteur, tous éléments consommant des combustibles fossiles. Ces problèmes sont particulièrement aigus dans les pays développés, mais quelques pays tropicaux, comme l'Inde et le Brésil, ont des industries lourdes et des dégâts sont possibles, bien qu'aucun rapport n'en ait fait état. Il est probable que, dans les pays en développement, où le secteur industriel est soumis à de fortes pressions économiques, mais où les pressions sociales et politiques sont faibles, la pollution continuera et même s'aggravera. Certaines essences supportent mieux que d'autres la pollution; ainsi, en URSS, on a constaté, dans les contreforts des Carpathes, qu'un mélange de chênes et de sapins argentés était plus résistant à la poussière de kaïnite, à l'acide chlorhydrique et aux matières grasses organiques provenant d'une usine de potasse que l'une de ces essences isolée ou que toute autre essence. Une jeune plantation de chênes et d'aulnes a mieux supporté que d'autres espèces la suie et le monoxyde de carbone provenant d'une usine de charbon actif (Voron 1979). Dans les collines entourant Mexico, l'une des villes les plus polluées du monde, des forêts naturelles pures d'*Abies religiosa* ont été presque entièrement détruites à cause de la forte pollution par l'ozone, alors que d'autres essences ont survécu (Ciesla et Macias 1987, Whitmore 1991), notamment *Pinus hartwegii* qui pousse à des altitudes plus élevées. Dans les montagnes de San Bernardino (Californie) *Pinus jeffreyi* et *P. ponderosa* ont souffert de la pollution de l'air, alors que *Calocedrus decurrens* (arbre à encens) et *Abies concolor* (sapin du Colorado) ont été relativement épargnés (Miller et Elderman 1977). Ces exemples montrent que certaines essences particulières tolèrent diverses formes de pollution mais rien n'indique que les mélanges composés d'essences qui se sont avérées plus résistantes à la pollution ont donné de meilleurs résultats que ces mêmes essences cultivées en peuplements purs. Un mélange d'essences résistantes à différents types de pollution constituerait sans doute une "assurance" contre un échec complet lorsque que l'on prévoit que le degré ou le type de pollution évoluera dans le temps.

L'utilisation des eaux usées des villes pour irriguer des plantations situées sur des champs d'épandage se développe dans les zones tropicales. En Australie méridionale, on a constaté qu'un mélange de *Casuarina glauca* et d'*Eucalyptus occidentalis* utilise efficacement les effluents salins; dans des conditions moins salines, *C. cunninghamiana* peut être introduit dans le mélange. Des mélanges de *E. camaldulensis* et *E. occidentalis* devraient aussi tolérer les inondations et la salinité. On met actuellement au point un système d'évacuation dans des plantations à deux niveaux; dans ce système, une essence vigoureuse pouvant avoir une valeur commerciale élevée est établie et l'irrigation à l'eau de ville traitée est adaptée au déficit de saturation; d'autres essences sont cultivées sur un site simulant un système de plaine inondable d'hiver-printemps durant la saison des pluies. Ce système est conçu pour utiliser des mélanges de deux ou trois essences (Boardman 1990). Ces exemples ne permettent cependant pas la comparaison avec les résultats d'une esssence particulière cultivée en peuplement pur.

3.3 INCENDIES

On ne dispose pas de statistiques mondiales sur l'incidence des incendies de forêts et sur les superficies brûlées, mais, entre 1980 et 1988, il y a eu en Europe (ex-URSS exclue) et en Amérique du Nord en moyenne environ 20 000 incendies de forêts par an, la plupart étant d'origine humaine (négligence ou intention criminelle). La superficie brûlée chaque année a atteint environ 4 millions d'hectares, d'où d'énormes pertes - non quantifiées - en termes de bois, avantages écologiques, qualité de l'environnement, valeurs culturelles et même en biens et vies humaines (Calabri 1991). On ne sait pas combien d'incendies se sont déclarés dans des forêts artificielles, mais au Brésil plus de 200 000 ha de plantations forestières ont brûlé entre 1983 et 1988, pour une superficie totale plantée de 6 millions d'hectares. Cette proportion peut sembler infime par rapport à la superficie totale, mais le coût financier pour le pays a été estimé à 199,6 millions de dollars E.-U. (Soares 1991).

Diverses interventions permettent de réduire les risques d'incendie, par exemple des procédés mécaniques comme les coupe-feux ou les routes (qui sont coûteux et peuvent entraîner une perte de qualité du paysage), l'utilisation d'herbicides (à la fois coûteux et nocifs pour l'environnement) et des procédés biologiques, tels que le pâturage en forêt, qui est difficile à contrôler et à concilier avec les impératifs de conservation des forêts et des sols. Le brûlage dirigé a été proposé, mais le feu risque de s'étendre et en Europe et en Amérique du Nord, cette pratique n'est pas toujours bien acceptée par le public (Calabri 1991).

L'incidence des feux de forêts (forêts artificielles comprises) s'accroît rapidement dans le monde, mais il est difficile de combattre ou de prévenir ces incendies par des moyens acceptables du point de vue écologique et social. Il est donc surprenant que l'influence des plantations mixtes sur la gravité des dégâts par le feu n'ait pas été plus largement étudiée. Velez (1991) a attiré l'attention sur la nécessité de ménager des intervalles dans les plantations et de modifier les modèles d'inflammabilité (qui sont liés à la teneur en humidité du combustible et à la structure de la végétation), pour ralentir la propagation du feu. L'incorporation d'autres essences, en particulier de feuillus, en mélanges intimes ou discontinus, permettra d'atteindre ces objectifs.

3.4 CONSERVATION DES RESSOURCES GENETIQUES ANIMALES ET VEGETALES

Généralités

Les plantations sont des écosystèmes spécialisés mais généralement simplifiés, dans lesquels la diversité végétale a été réduite afin de maximiser la production d'une unique composante de valeur. La composante la plus précieuse est généralement la tige ligneuse des essences d'arbres plantées. Quand des communautés végétales indigènes (forêts, bois ou prairies) sont transformées en plantations mono ou plurispécifiques d'essences indigènes ou exotiques, principalement en vue de produire du bois, la diversité de l'habitat et des espèces est généralement réduite au niveau de la station. Cette réduction peut modifier les besoins de nourriture et/ou d'abri de la faune sauvage.

La diversité biologique sur un site donné est associée en premier lieu à la diversité structurelle des habitats ou des communautés caractérisant ce site (forêts, habitats de prairies), et en second lieu à la diversité spécifique au sein de chaque habitat ou communauté. La diversité de l'habitat varie à plusieurs niveaux - des arbres individuels jusqu'à des blocs de plusieurs hectares (voir Clout 1985, Gepp 1985, à propos de la diversité des oiseaux dans les plantations, respectivement en Nouvelle-Zélande et en Australie). Des ouvrages de plus en plus abondants sur la "biologie de conservation" traitent la question de la diversité (Wilson 1988, Soule 1986).

Ainsi, divers procédés permettent d'accroître la diversité dans l'étage d'arbres d'une plantation:

- plantations plurispécifiques;
- plantations inéquiennes en peuplements mélangés ou en blocs adjacents de petite taille;
- conservation d'une certaine quantité de végétation naturelle, sous forme de parcelles ou sous forme d'arbres ou arbustes isolés à l'intérieur de la plantation.

Il est probablement impossible de maximiser le rendement rentable de bois par unité de superficie tout en maintenant des degrés élevés de biodiversité "naturelle" ou des densités importantes d'espèces sauvages recherchées. Mais les plantations forestières ne desservent pas toujours pour autant les intérêts de la faune et de la flore sauvages. Les forêts artificielles peuvent jouer un rôle important dans la conservation et l'aménagement de la faune et de la flore sauvages, au niveau national comme au niveau local. Ce rôle peut être direct - elles fournissent un habitat aux espèces recherchées, ou indirect - elles allégent la pression sur d'autres habitats de la faune et de la flore.

Toute forme d'aménagement forestier, y compris la plantation d'arbres, modifie non seulement la structure de la biodiversité, mais aussi les paramètres de la faune et de la flore sauvages, comme les densités de la biomasse et des espèces. Alors que le remplacement d'une broussaille forestière dégradée par une plantation plurispécifique productive peut considérablement accroître la richesse de la faune sauvage et sa biomasse, ce changement peut être considéré comme négatif si la faune et la flore originales des broussailles sont menacées de disparition au niveau mondial.

Rehmani (1989) décrit la perte des communautés naturelles de prairies sèches, dans le centre de l'Inde, ainsi que les menaces qui pèsent sur la faune d'outardes, de gazelles et de renards associée à ce type d'habitat. Le remplacement de ces prairies par des plantations d'eucalyptus, qui peut accroître les densités de cerfs *axis*, ne constitue pas une amélioration du point de vue de la conservation si l'objectif est de conserver le plus grand nombre possible d'espèces d'animaux sauvages.

En raison de ce changement de la biodiversité naturelle, la conception et l'aménagement des plantations, dont l'objectif est la conservation et l'aménagement des ressources naturelles, doivent avoir deux impératifs, à savoir:

- conservation de la biodiversité totale - c'est-à-dire de tout l'éventail de diversité génétique, spécifique et communautaire de tous les végétaux et animaux présents sur le site;

- aménagement de l'habitat forestier afin de produire des espèces animales présentant des avantages potentiels (par exemple cerfs pour la chasse), ou afin de réduire la densité des espèces présentant des inconvénients potentiels (par exemple ravageurs qui font baisser la production de bois).

Ces deux impératifs et les activités d'aménagement qui en découlent sont si différents qu'ils doivent être étudier séparément.

Conservation de la biodiversité

Généralités

La nécessité de ralentir la perte de la diversité biologique totale, surtout celle qui est contenue dans les écosystèmes forestiers tropicaux, est bien exposée dans les ouvrages parus récemment et la foresterie de plantation a un rôle important à jouer dans la planification et l'aménagement de la conservation (Poore & Sayer 1987, par exemple). Trois activités sont importantes:

- Développer la couverture forestière, en boisant ou en reboisant, afin d'accroître la superficie effective des forêts ou des aires protégées. On devrait ainsi d'une manière générale porter les populations d'espèces animales importantes au-dessus des seuils minimaux de viabilité, en augmentant la superficie boisée ou, plus particulièrement, en créant un couvert le long des voies ou "couloirs" de dispersion empruntés par ces espèces.

- Développer les plantations périphériques qui feront office de "zones tampons" dont les ressources pourront être utilisées, afin de protéger les surfaces boisées des alentours qui sont menacées par l'exploitation intensive sans l'aménagement requis.

- Développer des plantations à usages multiples pour les communautés rurales, afin que celles-ci aient moins besoin d'exploiter les aires protégées des alentours, qui sont importantes du point de vue de la conservation. Ces plantations ne sont pas nécessairement limitrophes de l'aire protégée.

La première catégorie de plantation et, dans une moindre mesure la deuxième, rempliront mieux leur fonction de conservation si leur structure et leur composition ressemblent à celles de la communauté forestière naturelle. Les plantations plurispécifiques, qui comportent un sous-étage et sont structurellement diversifiées grâce à la plantation en groupes inéquiennes, au maintien de vides, etc. sont plus efficaces que les blocs monospécifiques structurellement homogènes. Il existe une vaste bibliographie sur la conception des forêts à vocation de conservation et de production créées (et aménagées) par l'homme, aux Etats-Unis (Thomas 1979, Harris 1984, Hoover & Wills 1987, McTaggart-Cowan 1985, Salwasser 1985, 1990) et ailleurs (Ratcliffe & Petty 1988;

Hobbs, Saunders & Hussey 1990; et de façon générale Poore & Sayer 1987; Kemp, 1992).

Pour remplir leur fonction de conservation, les mélanges d'essences doivent assurer des différences écologiques réelles; deux essences différentes de conifères n'offriront pas forcément plus d'avantages qu'une seule espèce. Les mélanges d'une espèce décidue et d'une espèce sempervirente ou l'adjonction d'arbres à fruits comestibles ou d'espèces fourragères à une essence principale de haute futaie peuvent assurer des différences réelles, car ils créent des niches diverses et permettent donc de diversifier l'habitat. En Inde, les forestiers envisagent d'utiliser dans les plantations des mélanges d'essences, comprenant environ 10 à 20 pour cent d'arbres qui présentent un intérêt pour les populations ou la faune et la flore locales (Wildlife Institute of India - forest management guidelines). Il convient de noter que les spécialistes de la conservation moderne considèrent que les deux objectifs de satisfaction des besoins des populations et de conservation durable sont étroitement liés.

Les mélanges d'essences peuvent aussi consister à mélanger l'essence principale de la plantation avec des essences déjà *in situ*. Ceci peut être fait sous forme de blocs ou bandes de végétation naturelle ou en conservant des arbres individuels, par exemple des figuiers ou des arbres "pièges" ayant dépassé la maturité, où les oiseaux peuvent faire leur nid et les insectes trouver de la nourriture (Rodgers 1992). Les clairières naturelles, comme les zones rocailleuses ou marécageuses, doivent être conservées.

L'aménagement de la plantation et la conception initiale sont importants. L'éclaircie et la coupe peuvent être organisées de façon à favoriser la diversité des espèces végétales et animales. On peut, par exemple, conserver quelques vieux arbres et laisser quelques bois tombés sur place. Les pratiques spécifiques d'aménagement sont fonction des objectifs de la plantation prise dans son ensemble et des objectifs de chaque zone particulière de la plantation. On étudie mieux les plantations à fins multiples si on les divise en zones internes, ce qui permet d'assigner des priorités différentes aux divers objectifs à l'intérieur de chaque zone.

Lorsque des plantations doivent être établies à côté de forêts naturelles importantes du point de vue biologique, il est essentiel de s'assurer que les mélanges qui composeront la plantation ne contiennent pas d'essences envahissantes. Pour développer des plantations commerciales de feuillus dans les montagnes de l'Est de l'Usumbara, en Tanzanie, on a utilisé *Maesopsis eminii*, exotique à la zone considérée, comme peuplement de protection pour *Cephalosphaera usambarensis* qui est une espèce endémique précieuse. La première est à présent considérée comme une espèce parasite importante, qui envahit agressivement la forêt naturelle et entre en compétition avec les essences locales (Hamilton & Bensted-Smith 1990).

Mesures visant à accroître la diversité spécifique dans les plantations

Il est possible de formuler quelques principes généraux qui permettront d'accroître la diversité totale dans les plantations, à condition que les objectifs fixés indiquent qu'il faut chercher à conserver le plus grand nombre possible d'espèces végétales et animales indigènes. Ces principes directeurs sont les suivants:

- maintien de zones d'habitat naturel à l'intérieur de la superficie plantée ou à proximité de celle-ci; on peut se demander s'il doit s'agir de grandes parcelles ou s'il faut préférer des groupes de zones plus réduites (Clout 1985); le choix dépendra des objectifs précis, tels que la conservation de la diversité intraspécifique des végétaux (de petites parcelles seraient alors appropriées) ou la conservation de grands mammifères (de grandes surfaces sont alors nécessaires). Dans le Queensland, on conserve habituellement 500 ha de forêts indigènes pour 4 000 ha de plantations; au moins 200 ha de la réserve forestière sont constitués d'un bloc d'un seul tenant. Ces surfaces s'ajoutent à celles qui sont exclues car elles ne se prêtent pas à la plantation (forte pente, roches, salinité, etc.) (Francis et Shea 1987);

- conservation de bandes de forêts naturelles, surtout le long des cours d'eau, qui relieront la plantation aux réserves naturelles plus grandes et serviront de couloirs à la faune pour se déplacer;

- le programme de plantation devra, dans la mesure du possible, juxtaposer des parcelles d'essences différentes et des parcelles inéquiennes;

- le maintien d'arbres ou d'arbrisseaux indigènes à l'intérieur des plantations peut être justifié pour encourager des espèces animales spécifiques; par exemple on conservera des arbres à fleurs pour attirer les insectes qui se nourrissent de nectar ou les oiseaux insectivores, ou des arbres fruitiers pour les chauves-souris, ou encore du feuillage vert pour les primates etc.;

- planification soigneuse des opérations de coupe de façon à garder un couvert de refuge et à réduire au minimum la durée de la perturbation.

Aménagement de la faune et de la flore sauvages

Faune et flore exploitables

Dans de nombreuses zones plantées en forêts, la conservation ou le soutien du niveau naturel de la diversité végétale et animale totale ne sont pas des nécessités premières. Dans ce cas, l'objectif de la plantation peut être, par exemple, de maximiser la production ligneuse. Toutefois, d'autres produits de la forêt peuvent avoir une importance accessoire, par exemple des essences d'une valeur commerciale secondaire comme le bambou ou le rotin, ou des produits importants pour la subsistance comme les fruits ou le feuillage vert. Les produits animaux sauvages rentrent dans ces deux catégories: par exemple, au niveau commercial, la chasse d'agrément au tigre et à d'autres espèces, et l'exploitation de populations comme les porte-muscs, les papillons etc.; sur le plan de la subsistance, la chasse organisée d'animaux à viande comestible et des autres espèces alimentaires peut être très importante pour les populations rurales et favorise souvent la création de plantations au niveau local.

La présente section décrit les facteurs qui permettent d'accroître la production de ces types d'espèces animales et végétales sauvages et qui affectent la conception et l'aménagement d'une plantation. La phase de planification est très importante et doit

comprendre l'identification des produits qui sont considérés comme importants par les communautés locales. La plantation en grands blocs comporterait probablement plusieurs zones correspondant à différents niveaux de priorités pour les divers objectifs et produits.

Les plantations en tant qu'habitat de la faune sauvage

Les plantations peuvent fournir un habitat idéal à certains genres et espèces à un stade particulier du cycle de plantation. C'est par exemple le cas aux stades où l'enherbement est le plus grand, après le défrichement, et à celui de la mise en place des plants, pour les espèces brouteuses, ou lorsque le peuplement a atteint un stade plus avancé, surtout s'il y a un sous-étage de végétation, pour les abroutisseurs vivant dans les forêts. Ainsi, l'établissement de plantations n'entraîne pas nécessairement un exode de la faune sauvage hors de la zone, car certaines espèces généralistes resteront, et les plantations peuvent attirer ou entretenir des espèces différentes de celles qui existaient dans les conditions antérieures. Le mode d'utilisation des espèces changera pendant toute la durée de la plantation. L'introduction d'espèces recherchées peut être nécessaire ou bénéfique à différents stades.

On a constaté que les grands blocs de pins exotiques au stade du perchis étaient particulièrement pauvres en faune, en Nouvelle-Zélande - par exemple en oiseaux (Clout 1985) - mais lorsque l'on a étudié toutes les classes d'âge de la plantation, on a vu que celle-ci contenait pratiquement autant d'espèces d'animaux sauvages que les forêts naturelles de l'Australie méridionale (Gepp 1976). Les densités d'insectivores, de macropodes et de certains granivores sont parfois plus élevées dans les plantations que dans les communautés naturelles (Gepp, 1985). A Knysna (Afrique du Sud), alors que les forêts naturelles sempervirentes de feuillus satisfaisaient mieux les besoins totaux des guibs (*Tragelaphus scriptus*), les zones coupées à blanc ont été utilisées la nuit, et les forêts artificielles denses de *Pinus radiata* et de *P. elliottii* le jour (Odendaal et Bigalke 1979). Les plantations de *P. radiata* établies sur les pentes Kikuyu (Kenya) ont été moins favorables aux espèces d'oiseaux qui ont besoin d'un habitat particulier, mais plusieurs espèces généralistes ayant des exigences moins strictes en matière d'habitat se sont bien adaptées à ces forêts, et les migrateurs paléarctiques ont utilisé les forêts artificielles plus que la forêt naturelle (Carlson 1986).

L'établissement d'un peuplement mélangé peut même être néfaste pour certains animaux sauvages. En Grande-Bretagne, on sait que l'introduction de chênes dans une communauté de pins est catastrophique pour les écureuils roux; en effet les écureuils du Canada (gris) vivent beaucoup mieux dans les mélanges de feuillus et de conifères, et les écureuils roux indigènes ne peuvent pas co-exister avec les écureuils gris exotiques (Kenward 1990).

La limite entre deux habitats - qu'il s'agisse de la limite entre une zone forestière et une zone agricole ou de la limite entre deux types structurels de forêts ou de plantations, contient souvent une plus grande quantité d'espèces et de biomasse que l'une des communautés (Moss 1979; Friend 1980). Ceci en raison de l'"effet-lisière" bien connu sur la biologie de la faune. Une intensification des "lisières" peut accroître les densités de plusieurs herbivores généralistes, notamment des cerfs. Toutefois les lisières ne sont pas bénéfiques lorsque l'objectif de conservation est de favoriser une espèce

spécialiste d'un habitat qui a besoin de grandes surfaces forestières. On s'interroge de plus en plus sur l'importance des lisières en biologie de conservation (Reese et Ratti 1988).

Les grands mammifères utilisent beaucoup plus largement les plantations lorsqu'elle contiennent un sous-étage de végétation naturelle qui leur fournit un abri et de la nourriture (Gepp 1985). Si la production de ces mammifères est un objectif recherché, il faut éviter que le couvert de la plantation ne devienne trop dense. Dans le sud de l'Inde, dans une plantation de teck située à l'intérieur d'une zone peuplée d'animaux sauvages, les éclaircies ont été associées à des opérations d'entretien et de désherbage, ce qui a permis d'obtenir un tapis herbacé homogène. On a ainsi attiré le cerf *axis* qui est une espèce généraliste. Mais les densités d'éléphants, de cerfs rusa (*Cervus unicolor)* et d'ours lippus ont diminué car toutes ces espèces ont besoin pour survivre d'une couverture plus dense d'essences forestières et d'arbustes. On a conseillé aux responsables de laisser deux rangs sur dix sans entretien (Rodgers 1992).

Au Swaziland, l'établissement de plantations bien protégées de pins exotiques sur des prairies du haut-veld où l'on avait élevé des moutons et où la chasse avait régulièrement été pratiquée, a fait augmenter les effectifs de quelques espèces d'animaux sauvages. Les guibs, les léopards et de nombreux autres mammifères sont à présent nombreux (Evans 1988). Dans ce cas, l'augmentation de la faune sauvage a été due en partie à la protection fournie par les plantations, alors qu'elle n'existait pas dans la prairie ouverte, mais elle résulte aussi de la création de nouveaux habitats et de conditions favorables aux lisières des plantations et des prairies ou chemins forestiers. Les densités des espèces généralistes sont nettement plus élevées dans les plantations de la réserve forestière de Bori, dans le centre de l'Inde, que dans la forêt naturelle décidue humide de teck adjacente. La réserve est constituée d'un mélange de tecks cultivés en peuplements purs, dont les manques ont été convertis en plantation de bambous, clairières herbeuses et îlots de forêt naturelle. Cette zone, où des tigres et plusieurs autres grands herbivores sont fréquemment observés, est devenue celle que préfèrent les touristes (Rodgers 1992). Les plantations mixtes, composées d'essences indigènes d'acacias, de *Bombax* spp. et de *Dalbergia sissoo* qui ont été établies il y a trente ans sur les zones de prairies du Parc national de Dudhwa, dans le nord de l'Inde, sont une importante source d'abri et de nourriture pour les grands mammifères et contribuent à la valorisation globale de la faune. Cette zone contraste avec les peuplements voisins de tecks et de pins peu appétents qui sont peu utilisés par les animaux sauvages (Rodgers 1992).

Cet accroissement général du nombre d'animaux sauvages peut comporter des inconvénients, car certaines formes de vie, qu'il s'agisse d'insectes ou de mammifères, comme les éléphants, les cerfs, les sangliers ou les singes, peuvent faire des dégâts considérables dans les plantations. On peut parfois réduire ces dégâts en plantant des essences peu appétentes à la limite entre les plantations et les forêts naturelles. Au Sabah, on a constaté que les dégâts faits par les cerfs dans les plantations de *Gmelina arborea* devenaient insignifiants à 1 km de la forêt indigène (Duff et al. 1984). Il est possible qu'une "barrière" d'essences peu appréciées par les animaux, comme *Acacia mangium*, établie à proximité de la limite de la forêt naturelle, réduise les dégâts causés par les mammifères brouteurs. Des essences morphologiquement différentes, comme celles que contient le sous-étage d'une plantation forestière, peuvent aussi servir de barrière

naturelle. Par ailleurs, quelques oiseaux insectivores sont utiles pour lutter contre les attaques d'insectes dans les plantations et il est possible de les attirer en conservant des bandes et des mosaïques de forêt naturelle (Aracruz 1988). Les bandes de forêts naturelles abriteront aussi un plus grand nombre d'arthropodes qui favorisent la lutte contre les ravageurs (par l'intermédiaire d'hyménoptères parasites et prédateurs par exemple). Certaines dispositions peuvent être prises avant l'établissement de la plantation et pendant l'aménagement pour accroître la biomasse des espèces animales recherchées, notamment:

- maintien de bandes de couverture naturelle, surtout le long des cours d'eau et des lignes de drainage;

- programme de plantation juxtaposant, dans la mesure du possible, des parcelles d'essences différentes, des blocs inéquiens, et des zones de clairières herbeuses et d'autres végétations naturelles;

- prudence extrême dans l'utilisation du feu qui peut avoir des effets positifs et négatifs. Beaucoup d'animaux brouteurs tirent profit d'un brûlage occasionnel, mais non les espèces spécialistes de la forêt.

- éclaircies importantes au cours des stades intermédiaires et tardifs du développement de la plantation, pour encourager le sous-étage et la couverture vivante naturels dans les plantations;

- le maintien d'arbres et d'arbrisseaux indigènes dans les plantations peut être justifié pour encourager des espèces animales particulières; on peut, par exemple conserver des arbres à fleurs pour attirer les insectes se nourrissant de nectar ou les oiseaux insectivores, des arbres fruitiers pour les chauves-souris ou des feuilles pour les orang-outans.

Conclusions sur la conservation des ressources génétiques animales et végétales

Tout changement naturel ou toute intervention humaine dans un écosystème affecte la faune et la flore locales; la simplification et la spécialisation de l'étage d'arbres dans l'écosystème s'accompagnent d'une réduction de la diversité de la faune et de la flore par rapport à celle que l'on trouve dans une communauté naturelle, mais l'appauvrissement n'est pas uniforme. Accuser systématiquement les plantations monospécifiques d'être des "déserts biologiques" (formule notée dans Friend 1980), c'est exprimer une émotion plutôt qu'analyser rationnellement le problème. L'aménagement des plantations peut contribuer dans une large mesure à améliorer les niveaux de diversité naturelle et la valeur de la faune pour les loisirs.

Une bonne planification est essentielle et doit commencer par définir les priorités et les objectifs spécifiques à poursuivre pour assurer la conservation de la biodiversité ou la production d'animaux sauvages. Diverses stratégies sont possibles; on peut notamment établir des mélanges d'essences au sens large (sur des parcelles voisines), qui encourageront la faune sauvage dans les plantations industrielles, sans avoir recours à des mélanges au sens étroit (parcelles composées de plusieurs essences). Lorsque les plantations mixtes sont appropriées, soit pour obtenir des produits spécifiques, soit pour

remettre en état le site, la diversité de la structure et des classes d'âge contribue tout autant que la diversité spécifique à encourager la faune sauvage.

3.5 INSECTES ET MALADIES

Dans la documentation forestière, peu d'études comparent les effets des mélanges artificiels sur l'incidence des insectes et des maladies ou, vice-versa, les effets des insectes et des maladies sur les peuplements mélangés. De ce fait, il est difficile de comparer les peuplements mixtes et les peuplements purs. Il n'est pas toujours possible d'extrapoler à partir des informations provenant des agrosystèmes car les délais sont plus longs en foresterie; toutefois la tendance à établir des plantations à révolution courte, par exemple *Albizia falcataria* dont la rotation dure de cinq à huit ans en Malaisie, ou des espèces d'eucalyptus dont les rotations sont de cinq ans seulement au Brésil, rend cette comparaison plus valable. Les comparaisons ont généralement porté sur des peuplements artificiels purs et des peuplements naturels mixtes, de sorte que d'autres facteurs d'ordre stationnel et écologique ont-ils compliqué les choses.

Stabilité des écosystèmes forestiers

L'un des principaux facteurs de régulation des populations de ravageurs est la présence de matériel hôte adapté. Les forêts naturelles qui contiennent un mélange d'essences atteignent un degré de complexité qui assure un équilibre approximatif entre la végétation et les ravageurs et les maladies. Ces écosystèmes comprennent une vaste gamme d'insectes, de champignons et de bactéries qui vivent sur les arbres et dans la végétation herbacée. L'augmentation de la proportion d'un végétal hôte quelconque dans un écosytème s'accompagne généralement d'un accroissement correspondant de la population de ravageurs ou de pathogènes, dont les activités font retomber la population hôte à son ancien niveau bas. Les insectes et les maladies contribuent à limiter l'effectif des populations de chaque espèce et maintiennent ainsi la diversité spécifique dans l'écosystème; par la suite, les populations de ces organismes sont elles-mêmes contrôlées en raison de la diminution des ressources alimentaires disponibles et de l'activité de leurs ennemis naturels. Way (1977) a montré comment la tordeuse des bourgeons de l'épinette *Choristoneura lumiferana*, que l'on trouve dans l'est de l'Amérique du Nord est un ravageur déstabilisant pour une essence mais stabilisant pour la communauté. Les insectes et les maladies ont ainsi tendance à empêcher une composante végétale de l'écosystème, quelle qu'elle soit, de dominer celui-ci. Ainsi, la réduction d'un écosystème à une seule essence d'arbre, que l'on réalise par exemple dans une plantation monospécifique, semblerait augmenter le risque d'une grave attaque d'un insecte ou d'une maladie, sauf s'il est possible d'agir sur d'autres exigences d'habitat de l'organisme attaquant (Way 1977).

C'est à l'interface entre deux types d'habitats que la diversité est la plus grande, de sorte que les parasites dont la survie dépend d'éléments présents dans les deux habitats peuvent poser des problèmes. Les infestations dans les cultures de sorgho, au Soudan, en sont un bon exemple car un grand nombre de ravageurs, comme les queleas, les sauterelles etc. vivent dans la brousse naturelle. Au Bangladesh, l'invasion des plantations de *Gmelina arborea* par le gui *Loranthus parasitica,* venant des forêts naturelles voisines,

est un autre exemple à plus petite échelle (Gibson et Jones 1977). On peut résoudre ce problème en poursuivant rigoureusement le processus de simplification jusqu'à ce qu'il n'y ait plus qu'une seule espèce sur une vaste surface (Way 1977). La pratique de la monoculture extensive, comme la culture de blé dans les prairies, a pour effet de faire disparaître les zones d'interface, mais même si elle était appropriée, cette solution devrait être écartée sur les sites marginaux et hautement variables qui sont généralement utilisés pour la sylviculture à grande échelle, où la première priorité est de bien adapter les essences à la station. Il existe de nombreux cas, en agriculture et en foresterie, où les interfaces entre deux écosystèmes fournissent l'habitat dont ont besoin les ennemis naturels de certains ravageurs.

On pourrait penser que les communautés naturelles, surtout si elles sont diversifiées, sont moins exposées que les cultures monospécifiques à des attaques catastrophiques, bien qu'elles puissent abriter des espèces parasites, mais la diversité en soi n'empêche pas les catastrophes, surtout si elles viennent de ravageurs introduits. Certaines pertes catastrophiques causées par des maladies introduites en Europe et en Amérique du Nord - maladie de l'orme subéreux, *Ophiostroma (=Ceratocystis) ulmi,* dépérissement du châtaignier, *Endothia parasitica,* et rouille du sapin blanc, *Cronartium ribicola,* ont sévi dans des communautés naturelles plurispécifiques. L'équilibre qui a mis de nombreuses années à s'instaurer dans les forêts naturelles est rompu lorsque de nouveaux ravageurs, qui n'ont pas évolué en même temps que leur nouvel hôte, sont introduits dans des écosystèmes qui ne contiennent pas d'ennemis naturels ou quand de nouvelles essences sont établies dans un écosystème. Dans ce dernier cas, l'avantage relatif d'une culture exotique est fréquemment imputable à l'absence de ravageurs dans son nouvel environnement. Cet avantage se réduit à mesure que les ravageurs et les maladies locaux s'adaptent au nouvel hôte et il disparaît totalement si un ravageur ou une maladie exotique est introduit (Gibson et Jones 1977). De vastes plantations pures ont été établies et, bien qu'il y ait eu des épidémies et des échecs, la majorité des plantations se développe assez bien. Citons l'exemple frappant de l'hévéa (*Hevea brasiliensis),* qui est cultivé en tant qu'espèce exotique en peuplements purs en Malaisie depuis plus d'un siècle, et a connu exceptionnellement peu d'infestations de ravageurs et de maladies (Ng 1991). Les infestations de ravageurs et de maladies dans les plantations, qu'elles soient pures ou mixtes, sont souvent un problème secondaire dû au choix d'essences mal adaptées à la station, à un aménagement médiocre ou à d'autres formes de stress.

Les mécanismes et les ruses qu'emploient les insectes pour trouver un arbre hôte et les mécanismes grâce auxquels les ennemis de ces insectes trouvent leurs hôtes sont variés et complexes. L'augmentation de la diversité spécifique dans les plantations peut contribuer à éviter que les arbres ne soient attaqués en fournissant un camouflage pour les cultures vulnérables, en créant des barrières ou en offrant de la nourriture et un refuge aux ennemis naturels des insectes à la recherche de nourriture. En Pologne, on a développé l'utilisation du système des "places complexes" (Birot 1991); ce système consiste à interrompre des peuplements monospécifiques de *Pinus sylvestris*, en y insérant de petits blocs hautement plurispécifiques (quelques hectares), en vue de diversifier l'habitat de la faune et d'attirer les oiseaux en particulier, pour lutter contre les populations d'insectes ravageurs (il s'agit-là d'un exemple des effets bénéfiques des zones d'interface étudiés dans la section sur la conservation). Un mélange d'essences risque de fournir des hôtes alternants, ce qui aura un effet nuisible si l'hôte alternant est essentiel

pour le cycle de vie du ravageur, mais bénéfique si l'hôte alternant détourne le ravageur d'une essence plus précieuse. Par ailleurs, la réduction de la diversité peut bouleverser le cycle de vie du ravageur de plusieurs manières, par exemple en le privant de sources alimentaires de remplacement en cas de besoin, en réduisant la diversité des habitats contigus dans lesquels prolifèrent de nombreux ravageurs, ou en diluant l'effet du ravageur en raison du volume de matériau produit. Toutefois, de nombreuses espèces de ravageurs ont un potentiel de reproduction élevé et sont capables de se multiplier s'il existe une proportion importante de matériel hôte adapté. La réduction de la diversité peut aussi favoriser les ennemis des ravageurs en diminuant l'incidence de leurs prédateurs. On sait cependant peu de choses sur la diversité spatiale qui gêne les ravageurs (Way 1977).

Quelques points de vue opposés

L'opportunité d'établir des peuplements purs pour réduire l'abondance des ravageurs, est extrêmement controversée. Boyce (1954) a exprimé nombre des vues des partisans des forêts mixtes. Il a préconisé les espèces indigènes de préférence aux essences exotiques, la régénération naturelle de préférence à la plantation, et les peuplements mélangés de préférence aux peuplements purs. Il a fait valoir qu'un peuplement pur offre les conditions idéales pour qu'un pathogène se reproduise jusqu'à atteindre des proportions épidémiques, en citant l'échec des plantations d'hévéa en Amérique du Sud, dû à une grave épidémie de flétrissure sud américaine des feuilles de l'hévéa (SALB). L'hévéa pousse spontanément en tant qu'arbre isolé, dans certaines forêts d'Amérique du Sud où le pathogène est lui aussi présent. La maladie fait peu de dégâts sur l'hévéa sauvage, mais les plantations pures ont été attaquées et ont été détruites; c'est pourquoi on a soutenu que les monocultures, qui fournissaient un volume important de matériel hôte, étaient responsables de cet échec. Toutefois, on a remarqué que les plantations en question avaient été établies au moyen de jeunes plants réintroduits de Malaisie. Or, le SALB ne sévit pas encore en Malaisie et tous les hévéas de ce pays sont issus de l'introduction initiale de 22 jeunes plants (Chou 1981). Il n'est pas surprenant qu'un matériel végétal ayant une base génétique aussi étroite et ayant été reproduit en l'absence de toute sélection naturelle en ce qui concerne la résistance au SALB n'ait pas donné de bons résultats.

Perry et Maghembe (1989), traitant des concepts de foresterie, de plantation et d'écosystème, ont noté que la diversité est un mécanisme de défense important contre les ravageurs et les maladies. Ils affirment que "les chances qu'une monoculture génétique s'avère résistante aux ravageurs et aux maladies jusqu'à ce que les arbres arrivant à maturité semblent faibles ... la capacité d'évolution des ravageurs et des pathogènes vivant peu longtemps est énorme", attirant à juste titre l'attention sur les risques d'épidémies dans les plantations monoclonales et sur le fait qu'en une année, plusieurs générations de ravageurs se reproduisent et plusieurs sélections naturelles interviennent (alors que pour la plupart des arbres, il faut plusieurs années ou même plusieurs décennies); ainsi, les ravageurs peuvent surmonter assez facilement les divers types de résistance aux maladies qu'offre à l'origine l'espèce hôte. Il est possible de minimiser les risques en raccourcissant la durée des révolutions (en prenant des risques calculés), en alternant les clônes dans l'espace et dans le temps, et en optant pour des utilisations finales de substitution lorsque des maladies surviennent, ceci grâce à une récolte précoce et au remplacement des clones atteints. De vastes plantations clonales, comme celles du

Congo (voir Delwaulle 1989) et du Brésil (Burley et Ikemori 1988; Campinhos et Ikemori 1986), ont été établies compte tenu de ces précautions, et bien qu'elles aient rencontré des problèmes, elles ont généralement échappé aux infestations massives de ravageurs. Ainsi, à condition de maintenir une large base génétique dans des populations à base distincte, qui seront utilisées comme "relais" pour les plantations à base génétique étroite ou pour celles qui ont été établies par blocs d'un seul clone; et à condition d'élaborer constamment de nouveaux clones à haut rendement destinés à l'arboriculture intensive, l'utilisation de plantations pures, même monoclonales, est possible, aussi bien du point de vue biologique que du point de vue économique.

Perry et Maghembe (1988) citent également, pour plaider contre les plantations en peuplements purs, l'échec des *Pinus radiata* en Afrique, après l'introduction du dépérissement dû à *Dothistroma*, les attaques du foreur cérambycidé indigène *Oemida gahani* sur *Cupressus lusitanica* en Afrique de l'Est, et les graves dégâts causés par *Diplodia pinea* sur plusieurs pins en Afrique australe. Mais il n'est pas du tout certain que les peuplements purs soient la cause première de ces problèmes. *Pinus radiata* isolé est tout aussi vulnérable au dépérissement dû à *Dothistroma* que les plantations pures (Gibson et Jones 1977). Le dépérissement par *Dothistroma* est peu fréquent dans le sud de l'Australie. En revanche cette maladie a fait des dégâts considérables en Afrique, où *P. radiata* a été planté hors de son aire d'extension naturelle, dans des zones pluvieuses l'été. *Oemida gahani* pénètre par les blessures, par exemple par les cicatrices d'élagage, mais il a été largement éliminé grâce à une meilleure hygiène forestière qui a consisté à supprimer les foyers de reproduction dans les rémanents et les détritus (Gibson et Jones 1977). *Diplodia pinea* est une maladie aussi grave sur les arbres isolés que dans les plantations et elle sévit dans les endroits où les pins sont plantés hors de leur aire d'extension naturelle en Afrique australe (Barnes et Mullin 1976).

Il existe d'autres ravageurs et maladies qui font de graves dégâts dans les plantations, mais ce n'est pas essentiellement parce que les plantations sont monospécifiques. Le champignon responsable du pourridié *Heterobasidion (= Fomes) annosus* est un basidiomycète destructeur du bois qui colonise les résidus ligneux, par exemple les souches laissées en terre lors du défrichement du terrain ou à la suite d'éclaircies. Il peut sévir aussi bien dans les plantations pures que dans les plantations mixtes, mais comme il se transmet par les greffes racinaires, les plantations pures favorisent la propagation de la maladie. On pense cependant que *H. annosus* est aussi favorisé par des sites d'où d'autres champignons antagonistes ont été éliminés, ce qui se produit quand des plantations sont établies sur des terres agricoles abandonnées (Gibson et Jones 1977). Pour cette raison, la maladie peut être considérée aussi bien comme une conséquence de l'emploi d'essences mal adaptées au site que comme une maladie des cultures monospécifiques.

L'infection des pins *Rhizina undulata* est associée à l'utilisation du feu; il s'agit donc là encore d'une maladie qui résulte plus de l'histoire antérieure du site que du fait que la plantation est monospécifique. En raison des nombreux dégâts dus à *R. undulata*, la pratique qui consistait à brûler les résidus de plantation après une coupe rase a été largement abandonnée sur les sites plantés en pins, en Afrique australe comme dans le nord de l'Europe.

Au Ghana, les coléoptères scolytidés *Xyleborus mascarensis, X. sharpae et X. semiopacus* ont provoqué des dommages étendus et des morts d'arbres dans des plantations en layons de *Khaya ivorensis* et *Aucoumea klaineana*. Le problème a été attribué aux abondantes quantités de débris ligneux qui avaient été laissés sur place après des opérations de nettoiement visant à pratiquer une trouée dans la forêt pour planter les layons. Ces débris ont offert un terrain de reproduction idéal aux insectes, et lorsque les ressources des débris ont été épuisées, les coléoptères se sont attaqués aux plants repiqués (Gibson et Jones 1977).

Pineus pini, un puceron introduit en Afrique, est un insecte qui a été autant attiré par les peuplements plurispécifiques naturels que par les plantations monospécifiques. On l'a vu attaquer aussi gravement des *P. patula* isolés que des plantations (Gibson et Jones 1977).

Le point de vue opposé, selon lequel l'établissement à grande échelle de peuplements équiens n'augmenterait pas le risque de ravageurs et de maladies, a été soutenu par Chou (1981). Chou défendait les plantations de *P. radiata* en Nouvelle-Zélande, où des plantations monospécifiques avaient donné d'excellents résultats dans des conditions écologiques assez peu variées. Il a présenté les arguments suivants:

- aucune épidémie généralisée ou typique n'a été constatée, il n'y a donc aucune raison de penser qu'une recommandation généralisée en faveur des plantations mixtes serait efficace pour prévenir les épidémies;

- dans certaines conditions, les mélanges pratiqués sans discernement peuvent accroître les risques, par exemple lorsque l'on introduit des hôtes alternants pour les ravageurs et les maladies ou lorsque l'on mélange une espèce légèrement vulnérable et une espèce très vulnérable. Cet argument est aussi formulé par Perry et Maghembe (1989);

- certains pathogènes attaquent de nombreux hôtes. Ainsi, on sait que *Phytophtora cinnamoni* affecte 444 espèces appartenant à 131 genres et à 48 familles, dont les angiospermes et les gymnospermes. *Armillaria* spp. contient un grand nombre de souches qui sont relativement spécifiques à certains hôtes, mais comme la liste d'hôtes comprend 677 espèces appartenant à 276 genres, il est peu probable que les mélanges puissent constituer une barrière totalement efficace pour empêcher la propagation de ces pathogènes, à moins que l'on ne dispose d'informations fiables sur la vulnérabilité relative des essences que l'on compte introduire dans le mélange;

- lorsque l'on diversifie les essences, on doit aussi diversifier la lutte contre les maladies et les ravageurs et atténuer l'effort contre une espèce particulière quelle qu'elle soit, ce qui augmente le risque pour cette espèce. Dans tous les cas où, en raison d'une politique de diversification, les matériaux de plantation doivent être importés, on risque d'introduire ainsi des maladies et des ravageurs;

- les peuplements équiens purs facilitent les opérations de lutte contre les ravageurs et les maladies. En revanche, dans les peuplements mélangés, en particulier dans

les peuplements inéquiens, où la coupe d'écrémage est un outil d'aménagement, les arbres sur pied ont des chances d'être endommagés, ce qui augmente les risques de pénétration de pathogènes par les blessures.

Rôle des plantations mixtes

Bien que la diversité des essences puisse favoriser la stabilité dans les peuplements naturels, il ne s'ensuit pas nécessairement que la diversité spécifique assure la stabilité dans tous les peuplements artificiels. L'aménagement des plantations, qu'elles soient industrielles ou non industrielles, vise naturellement à maximiser la croissance - ou la production d'autres produits déterminés - de l'espèce la plus intéressante pour atteindre les objectifs spécifiés. Ainsi, pour plusieurs raisons d'ordre économique et industriel, le nombre d'espèces que l'on peut envisager de planter est réduit. On admet généralement que, bien qu'une réduction de la diversité puisse accroître les risques de dégâts dus aux ravageurs et aux agents pathogènes, les mécanismes grâce auxquels la diversité engendre la stabilité sont encore mal connus (Boyce 1954; Chou 1981; Perry et Maghembe 1989). En conséquence, les connaissances actuelles ne permettent pas de déterminer les mélanges d'essences qu'il est souhaitable d'établir pour lutter contre les attaques de ravageurs et d'agents pathogènes, en particulier dans les plantations exotiques.

Il est intéressant de noter quelques cas dans lesquels les mélanges se sont avérés utiles pour lutter contre les attaques de ravageurs et de maladies. Le foreur cérambycidé *Phryneta leprosa* attaque *Milicia (= Chlorophora) excelsa* à travers les cloques dues aux brûlures solaires, dans les plantations équiennes. Il a causé des pertes dans des placettes expérimentales en Tanzanie et des pertes très graves et étendues au Zaïre (Gibson et Jones 1977). L'ombre évitera les brûlures solaires et l'adjonction d'autres essences fournira de l'ombre lorsque les plantations de *M. excelsa* seront établies.

Phytolyma lata provoque la galle des feuilles sur *M. excelsa* et peut causer des dégâts considérables, mais a un rayon de propagation limité. Toutefois, on ne parvient à lutter contre cet insecte que quand l'arbre hôte est dispersé dans une matrice d'autres essences, si bien qu'il faut examiner l'argumentation émise lors de la Conférence de Dehra Dun de 1939: si l'essence-abri doit constituer la plus grande partie du peuplement et a une faible valeur, il faut envisager un autre peuplement; si l'essence-abri a la même valeur que l'essence principale, il n'y a pas grand intérêt à planter l'essence principale (Indian Forest Service 1939).

Les foreurs des tiges *Hypsipyla grandella* (dans le Nouveau Monde) et *H. robusta* (dans l'Ancien Monde) sont des ravageurs dangereux des pousses maîtresses des jeunes arbres de la sous-famille des swietenioidées des méliacées, qui sont pour la plupart des arbres de haute futaie précieux.

Tableau 2: Genres hôtes des foreurs des tiges *Hypsipyla*

Afrique	Asie	Amérique du Sud
Lovoa	*Toona*	*Swietenia*
Khaya	*Chukrasia*	*Cedrela*
Entandrophragma	*Soymida*	*Carapa*
Carapa		
Pseudocedrela		
Guarea (attaque enregistrée, bien que sur Melioidées, Styles 1991).		

D'après les rapports, les *Xylocarpus* qui appartiennent à la sous-famille des swietenioidées n'ont pas été attaqués (Styles 1991) et en Amérique du Sud, *Guarea* n'aurait pas été touché (Whitmore 1976). Dans une certaine mesure, les deux espèces d'*Hypsipyla* sont spécifiques aux essences de leurs propres zones d'extension. Par exemple, *Toona ciliata*, qui est massivement attaqué par *H. robusta* en Australie, n'est pas touché, ou ne l'est que légèrement, par *H. grandella* au Costa Rica, où l'essence indigène *Cedrela odorata*, au contraire, est massivement attaquée par *H. grandella* (Grijpma et Ramallo 1973). *H. robusta* attaque *Swietenia macrophylla* en Inde et à Sri Lanka et *H. grandella* attaque *Khaya senegalensis* à la Martinique (Grijpma 1973).

L'ombre est efficace pour réduire les attaques de *Hypsipyla,* mais ne permet pas de les éliminer totalement (Whitmore 1976). Elle est normalement fournie par d'autres essences plantées en même temps que les méliacées ou présentes sous forme de peuplements résiduels, dans lesquels les méliacées sont introduits et plantés en lignes. Des mélanges adaptés ont été étudiés avec soin en Afrique de l'Ouest (Dupuy et Mille 1991); cette question est traitée de façon plus complète dans le chapitre 5 sur l'aménagement. Mais il n'est pas toujours nécessaire d'introduire une autre essence pour fournir de l'ombre; *S. macrophylla* se régénère actuellement bien à Sundapola (Sri Lanka) à l'ombre d'arbres adultes, qui sont pour la plupart de la même essence (Muttiah 1991).

L'établissement de méliacées vulnérables à *Hypsipyla,* sous un peuplement de protection qui donne de l'ombre, est un exemple éloquent de l'utilisation de mélanges dans les plantations industrielles, mais on notera qu'en Afrique de l'Ouest francophone, où a été effectuée l'étude la plus récente sur l'aménagement sylvicole des méliacées, on a pris la décision de ne pas planter d'arbres appartenant à cette famille (Cossalter 1991). En revanche, les plantations d'acajou de Sundapola ont été établies avec un grand succès en peuplements mélangés et dans les îles Salomon, on se propose d'introduire *S. macrophylla* dans une matrice de *Securinega flexuosa* (Iles Salomon 1988 a et b).

Au Kenya, un chancre du cyprès (*Cupressus macrocarpa)* est provoqué par *Seridium unicornis* (état imparfait de *Rhyncosphaeria cupressi)*. Ce champignon pénètre par les blessures et les cicatrices d'élagage, mais comme il a un rayon de propagation limité, on suppose que la proximité d'arbres plantés en peuplements purs contribue à diffuser la maladie. Des plantations mélangées de *Cupressus macrocarpa* et *Grevillea robusta* ont été établies à titre expérimental au Kenya (Graham 1945 et 1949), mais l'aménagement de tels mélanges s'est avéré difficile, car la forme des arbres des deux

espèces laissait à désirer (fût courbé et maigre). Il n'est pas prouvé que le mélange a permis de lutter contre la maladie. En fin de compte, on a décidé de remplacer *C. macrocarpa* par *C. lusitanica*, espèce moins vigoureuse, mais moins vulnérable au chancre des cyprès et dont la forme est meilleure.

En Inde et au Pakistan, l'insecte *Hoplocerambyx spinicornis,* qui proliférait sur les bois abattus et les *Shorea robusta* moribonds dans les forêts naturelles, attaque à présent les arbres sains matures lorsque cette essence a été établie sur de grandes surfaces en peuplements purs; ce changement d'habitudes a été attribué aux conditions de reproduction plus favorables offertes par les plantations (Gibson et Jones 1977), mais il s'explique sans doute en partie aussi par l'augmentation des ressources en aliments et par le fait que l'essence était stressée car elle avait été plantée sur un site mal adapté. Au Nigéria, *Hecophora testator,* ravageur des forêts naturelles dont l'incidence est normalement insignifiante, a causé des dégâts étendus dans des plantations pures de *Nauclea diderrichii* Gibson et Jones 1977). Des mélanges de *Nauclea diderrichii*, *Lovoa trichilioides* et *Entandrophragma utile* ont toutefois donné de bons résultats (Lamb 1991; Lowe 1991).

En Afrique, au moins, les infestations les plus importantes et les plus nombreuses d'insectes ravageurs imputables à l'établissement de plantations monospécifiques sont le fait des défoliateurs et, dans une moindre mesure, des foreurs (Gibson et Jones 1977). Ainsi, *Nudaurelia cytherea, Orgya mixta et Pachypasa capensis*, défoliateurs des forêts claires de *Brachystegia;* se sont adaptés avec le temps aux plantations de pins auxquelles ils ont infligé des dégâts considérables; *Buzura edwardsi* offre un autre exemple. Mais rien n'indique que les plantations en mélange permettront de réduire les attaques. Au Malawi, une attaque de *Plagiotriptus pinivora* a suffisamment endommagé des plantations de pins pour justifier des pulvérisations aériennes (Gibson et Jones 1977).

Conclusions sur les insectes et les maladies

Il est difficile de dire si l'établissement de plantations monospécifiques entraîne des pertes importantes dues aux ravageurs et aux maladies. Gibson et Jones (1977), tout en affirmant que les prévisions les plus pessimistes des forestiers traditionnels sur les dangers liés aux monocultures forestières ont été pleinement justifiées, ont déclaré que les dégâts dus aux ravageurs et aux maladies, et engendrés par les monocultures forestières, ont rarement été aussi catastrophiques que ceux qu'ont provoqué certains ravageurs et maladies dans des forêts naturelles ou dans des arbres exploités à des fins non commerciales. La situation peut évoluer au fur et à mesure que de nouvelles espèces de ravageurs sont introduites; par exemple, trois espèces introduites de pucerons des conifères ont dévasté les pins et les cyprès en Afrique de l'Est et en Afrique australe. Le chermès cortical du sapin pectiné *Pineus pini* et le puceron des aiguilles de pin *Eulachnus rileyi* ont été observés pour la première fois en 1968, alors que le puceron des cyprès *Cinara cupressi* a été découvert en 1986; ces ravageurs risquent fort d'exclure les conifères des programmes à venir de plantation dans la région, et le puceron des cyprès attaque aussi les conifères indigènes *Juniperus procera* et *Widdringtonia nodiflora* (Ciesla 1991; FAO 1991a).

On notera aussi que, bien que la plupart des études sur la pathologie et l'entomologie forestières portent sur les peuplements aménagés intensivement (ligniculture) et que l'on ait peu étudié le rôle des ravageurs et des pathogènes dans les écosystèmes de la plupart des forêts tropicales naturelles, les connaissances actuelles sur les plantations forestières sont encore inférieures à celles que l'on possède sur ces problèmes dans les agrosystèmes (Gibson et Jones 1977). L'aménagement basé sur une politique "Intrants élevés/production élevée" exigera des solutions qui n'abaissent pas significativement la production et des fonds seront trouvés pour étudier de telles solutions. On décidera probablement d'avoir recours à des traitements biologiques ou chimiques ou de sélectionner les arbres afin de créer des souches résistantes, ou encore de modifier les essences. Fait intéressant, Peace (1957) a écarté la possibilité d'avoir recours aux pulvérisations dans les forêts pour lutter contre les maladies, mais moins de trente ans plus tard, les pulvérisations aériennes pour lutter contre le dépérissement par *Dothistroma* étaient couramment pratiquées dans de nombreuses jeunes plantations de *P. radiata* en Nouvelle-Zélande (Chou 1981). Il est aussi à noter que la solution à bas niveau technologique, qui consiste à établir des plantations mélangées pour lutter contre les dégâts de *Hypsipyla*, a apparemment été abandonnée en Afrique de l'Ouest francophone.

Lorsque l'uniformité des produits est moins importante et lorsque l'on pratique un système d'aménagement moins intensif, comme c'est le cas dans de nombreuses plantations à bois de feu, une politique d'aménagement "faibles intrants/faible production" sera plus appropriée et l'on pourra éventuellement choisir la solution des plantations mixtes. Dans ce cas, l'établissement de plantations mélangées peut servir "d'assurance contre les risques", alors que l'on possède surtout des connaissances sur les mélanges appropriés d'essences indigènes. Dans des conditions de bas niveau technologique où le maintien de la couverture vivante est aussi important, sinon plus, que la rentabilité économique, les mélanges peuvent constituer une assurance contre un échec total.

Il est admis que tant que l'on ne connaîtra pas mieux les mécanismes et les stratégies des ravageurs et des maladies et de leurs prédateurs dans la forêt naturelle, on retirera sans doute peu ou pas d'avantages des plantations en peuplements mélangés pour prévenir la propagation des insectes et des maladies ou lutter contre elle; ces peuplements mélangés peuvent même avoir des inconvénients, par exemple, parce qu'ils fournissent ainsi des hôtes alternants ou peuvent servir de barrière contre les prédateurs (Chou 1981; Perry et Maghembe 1989).

Les communications modernes facilitent la diffusion des ravageurs et des maladies dans le monde, ce qui pose un problème important. Les systèmes de protection qui se sont élaborés dans les forêts naturelles sont très vulnérables aux organismes exotiques. Il est peu probable que les mélanges permettent de lutter efficacement contre les épidémies d'origine exotique, c'est pourquoi on aura davantage de chances de lutter contre les maladies en ayant recours à l'introduction d'ennemis naturels, à l'amélioration génétique pour augmenter la résistance des espèces, ou aux traitements chimiques - ou à une combinaison de ces méthodes. Les produits chimiques sont plus faciles à appliquer dans les plantations pures mais en raison de la nécessité de protéger l'environnement de la pollution, et en raison du coût élevé des produits, ils ne doivent être utilisés qu'en dernier ressort.

3.6 CONCLUSIONS SUR L'IMPACT ECOLOGIQUE

L'impact des forêts sur l'environnement a été étudié sous des rubriques distinctes: sol, climat, incendie, faune et flore, ravageurs et maladies. L'interaction de ces facteurs, et d'autres, constitue l'écosystème forestier et les forestiers doivent veiller à ce que l'écosystème puisse résister aux agents du changement tout en permettant à la station de conserver son potentiel productif. Lorsque de graves infestations de ravageurs et de maladies se produisent, c'est souvent le signe que les décisions d'aménagement étaient mauvaises - par exemple choix d'essences non appropriées ou éclaircies tardives - et il faut alors adopter une bonne pratique sylvicole. Lorsque des erreurs fondamentales d'aménagement ont été commises, un mélange ne sera probablement d'aucune utilité pour maîtriser une attaque. Les plantations mixtes devraient avoir une influence bénéfique dans les projets à aménagement extensif et lorsque des attaques de ravageurs et de maladies ou des événements climatiques imprévisibles sont susceptibles de se produire. Dans ces cas-là, les plantations mélangées constituent une sorte d'assurance contre l'échec complet et peuvent contribuer utilement à réduire la vulnérabilité d'une essence indigène à un parasite ou à une maladie indigène, à condition que l'essence concernée ait été correctement aménagée - voir ci-dessus - mais un mélange trop hétérogène peut compromettre les possibilités d'exploiter intensivement cette essence.

Le risque de dégradation de la fertilité du site est, à certains égards, un problème plus insidieux car si l'on ne dispose pas d'un réseau bien entretenu de placettes d'échantillonnage permanentes, la dégradation peut ne devenir apparente que quand la fertilité est déjà gravement compromise. Même si un système de suivi efficace a été mis au point, il est peu probable que la dégradation du site imputable à un type particulier de plantation ressorte de la modification des rendements avant la révolution suivante. Le comportement de la microflore et de la microfaune du sol n'est pas connu en détail dans les zones tropicales, mais, si les problèmes sont identifiés à temps, les mesures à prendre pour prévenir une perte de fertilité sont bien connues:

- conserver la couche arable et la matière organique lorsque l'on établit des plantations;

- remplacer les éléments nutritifs et restaurer l'état physique du site après la coupe;

- s'assurer que les besoins en éléments nutritifs des arbres ne sont pas supérieurs à la capacité de la station, ce qui se produira par exemple si l'on maintient un matériel sur pied excessif ou si on laisse la litière s'accumuler.

Les plantations mélangées sont un outil d'aménagement parce qu'elles influent sur les conditions édaphiques, en constituant une couverture vivante qui protège le sol de l'érosion et du manque d'humidité ou améliore l'état de la couche arable afin de favoriser la prolifération de micro-organismes bénéfiques. On peut réaliser le mélange soit en plantant, soit en permettant à un sous-étage naturel d'envahir une forêt à couvert clair. L'aménagement des plantations, basé sur des objectifs clairement définis, peut aussi promouvoir la conservation des ressources génétiques animales et autres.

L'incendie représente un risque de plus en plus grave pour les plantations, et il comporte des coûts directs et indirects élevés. Il n'existe pas d'études sur l'influence que peuvent avoir les mélanges d'essences pour réduire l'incidence des feux de forêts ou pour ralentir leur propagation mais c'est une question qui mériterait d'être approfondie.

Les épidémies et les variations climatiques étant des phénomènes imprévisibles, il est essentiel de conserver la diversité génétique dans une plantation. La diversité peut exister à différents niveaux; elle peut-être inter-spécifique ou intra-spécifique. La diversité totale donne au peuplement davantage de chances de pouvoir s'adapter à des conditions nouvelles et offre aussi une certaine garantie contre une perte de production totale. Toutefois, on peut maintenir la diversité en établissant des mélanges au sens large, par blocs ou par parcelles, plutôt qu'un mélange au sens étroit (pied par pied). La décision d'établir des mélanges au sens étroit doit dépendre des objectifs d'aménagement. Pour l'aménagement intensif de plantations industrielles, les plantations pures sont probablement plus indiquées, alors qu'un aménagement plus extensif (par exemple de plantations à bois de feu) peut tirer profit de mélanges et si l'objectif premier est la remise en état du site, les plantations mixtes sont souvent plus adaptées. Cependant, il ne faut jamais oublier que les objectifs d'aménagement ne doivent être déterminés qu'après une étude attentive du potentiel et des limites de la station, et que les objectifs devront peut-être être modifiés par la suite, compte tenu des essences qui sont disponibles pour le site en question. On accorde souvent trop peu d'importance au maintien à long terme de la viabilité et de la fertilité du site dans les programmes de plantation (Lundgren 1980).

4. PRODUITS ET SERVICES NON INDUSTRIELS

Dans le passé, les mélanges n'ont pas été utilisés dans les plantations destinées à la production de produits ligneux industriels, mais ils ont généralement été considérés comme mieux adaptés lorsque l'objectif était de produire des biens non industriels ou de fournir des services écologiques. Le cas particulier des produits et des services non industriels est donc étudié dans ce chapitre.

Utilisations non commerciales

Il est désormais largement admis que les forêts fournissent une masse de produits qui sont utilisés par les communautés locales vivant dans les forêts mêmes ou à proximité. Bien que quelques produits proviennent de sources extérieures à la forêt - champs des concessions, champs extérieurs ou arbres fourragers situés à la lisière des exploitations agricoles - beaucoup sont récoltés "gratuitement" dans la forêt. Il est évident que les cultivateurs connaissent bien le site et les besoins sylvicoles des espèces cultivées dans les concessions et dans les fermes extérieures; mais ces espèces sont habituellement cultivées en petites parcelles dans un environnement agroforestier et ont donc été exclues de cette étude. Au Nigéria (et probablement dans la plus grande partie de la zone tropicale humide d'Afrique), les besoins sylvicoles des espèces récoltées en forêt sont souvent mal connus (Okafor 1977). On n'a trouvé aucune étude sur la création par les communautés locales des régions tropicales de plantations forestières mixtes destinées à leur fournir la gamme de biens qu'elles utilisent, ni sur l'aménagement délibéré des forêts naturelles par ces communautés. Il ne faudrait pas conclure pour autant que les communautés locales n'ont pratiqué aucun système d'aménagement traditionnel dans les forêts tropicales: de tels systèmes d'aménagement ont existé, mais n'ont pas été étudiés. Dans les anciennes colonies, les forestiers et les administrateurs ont souvent été dans l'impossibilité d'appliquer les systèmes d'aménagement traditionnels, par exemple parce que des réserves forestières avaient été créées ou parce que des réglementations forestières qui ne tenaient pas compte des systèmes traditionnels avaient été imposées. L'aménagement traditionnel des forêts naturelles tendait à viser avant tout à organiser la distribution d'une ressource disponible plutôt qu'à manipuler l'écosystème pour favoriser une composante particulière. Lorsque la pression sur la forêt s'accentue en raison de la croissance démographique, les systèmes d'aménagement traditionnels tendent à se désorganiser. Dans les pays des régions subtropicales, comme le Népal, l'exploitation des forêts a été mieux maîtrisée par les communautés locales dans le passé, mais là encore l'aménagement n'a pas réellement tenté de manipuler la forêt pour obtenir des produits finaux spécifiques.

Outre ce problème, dans de nombreuses sociétés des zones tropicales, la forêt naturelle est peu respectée, d'une part parce que la première exigence est d'avoir de la terre à cultiver et d'autre part parce que les produits forestiers sont considérés comme des biens libres et gratuits. Bien que la valeur de la forêt puisse être appréciée, l'individu se sent personnellement peu responsable de sa protection car les avantages qu'elle fournit tendent à être trop généraux. Les plantations artificielles sont souvent traitées avec plus de respect que les forêts naturelles, même si celles-ci font l'objet d'un aménagement.

Il est généralement reconnu que la perte des forêts naturelles dans les zones tropicales humides prive les communautés locales de nombreux produits, mais on ne dispose pas de connaissances suffisantes pour établir et entretenir les plantations qui doivent fournir ces produits. Les projets forestiers ont été accusés de remplacer les forêts naturelles plurispécifiques par des plantations monospécifiques qui ne fournissent pas les multiples autres produits que l'on trouve dans les forêts naturelles. Mais lorsque les terres agricoles sont rares, il est habituellement impossible d'aménager la forêt naturelle de façon peu intensive ou à des fins de protection. Etant donné que les connaissances actuelles ne permettent pas de créer des plantations forestières mélangées en vue de satisfaire les besoins des communautés locales, la seule solution est de protéger et d'aménager une certaine superficie de forêt naturelle, tout en mettant en oeuvre un projet de plantation commerciale, de préférence monospécifique. Les besoins considérables de combustible et de perches peuvent ainsi être couverts par les plantations, alors que la forêt naturelle procure d'autres produits. Ce n'est que quand on connaîtra mieux les besoins sylviculturaux des nombreux arbres fruitiers, herbes et arbres médicinaux etc. qu'utilise la communauté, mais qui n'ont vraisemblablement de valeur qu'au niveau local, que l'on sera en mesure d'établir des plantations mélangées qui permettent de satisfaire ce type de besoins.

Bois de feu et perches

En 1980, environ 39 pour cent des plantations d'Afrique, d'Asie, d'Amérique du Sud et des îles du Pacifique[1] étaient répertoriées comme non-industrielles (FAO 1988). Dans l'estimation de la superficie plantée entre 1981 et 1985, la proportion est passée à 46 pour cent (FAO 1988).

La plupart des plantations non industrielles sont destinées à produire des perches ou du bois de feu. Habituellement la production est écoulée sur le marché local avec des opérations très limitées de transformation. De ce fait, il est moins important d'utiliser des techniques de récolte hautement mécanisées et les plantations peuvent être établies sur des sites plus pentus et plus rocailleux, qui ne seraient pas appropriés pour des plantations industrielles. Les plantations mixtes peuvent donc être très bien adaptées à la production de bois de feu et de perches, à condition de sélectionner des essences appropriées aussi bien au site qu'aux besoins des usagers, mais malheureusement, comme ce sont souvent les sites les moins fertiles qui sont disponibles, le choix est parfois limité à une seule essence. On trouvera plus loin dans ce même chapitre une description détaillée de l'exemple du Népal.

Fourrage

Le brout et le fourrage pour l'élevage sont particulièrement recherchés dans toutes les régions où le climat comporte une saison sèche longue. L'herbe des bois peut être broutée et les forêts, en particulier sur les collines où la pluviosité est plus élevée, peuvent être réservées pour obtenir le fourrage de la saison sèche; l'herbe peut aussi être

[1] A l'exclusion de l'Afrique du Sud, ainsi que de la Chine et de l'Argentine, pays pour lesquels aucune donnée n'a été fournie.

coupée et apportée au bétail. Cependant elle se dessèche et meurt au début de la saison sèche, alors que le feuillage et les fruits des arbres, par exemple les cosses d'acacia peuvent conserver de la saveur et rester nourrissants beaucoup plus longtemps. Cependant la capacité qu'a un arbre de conserver ses feuilles ou ses cosses varie en fonction de l'essence, aussi pour garantir l'approvisionnement de fourrage pendant toute la saison sèche, un mélange est essentiel car il permet de disposer successivement d'une série d'essences, depuis celles qui perdent leurs feuilles au début de la saison sèche jusqu'aux essences sempervirentes, comme quelques espèces de chênes (*Quercus semecarpifoglia* par exemple) et *Ilex* spp de l'Himalaya. On a publié relativement peu de textes sur l'aménagement des cultures arbustives fourragères, mais quelques études sont en préparation au Népal (Gilmour et al. 1989; 1990; Applegate et Gilmour 1987; Mohns et al. 1988).

Régénération des sites dégradés

Le boisement de sites dégradés afin de reverdir la zone et de reconstituer la structure du sol est de plus en plus reconnu comme un objectif de foresterie en soi. Dans ces conditions, les arbres et arbrisseaux à croissance lente, qui fournissent une couverture vivante, peuvent jouer un rôle aussi important que les grands arbres. Néanmoins il est souvent difficile de protéger et d'aménager de tels sites, en particulier si des pressions s'exercent pour que la terre soit destinée à un autre usage (même irrationnel), sauf si les communautés locales ont la possibilité de jouir des produits des arbres plantés sur le site. Ainsi, un mélange d'essences qui fournissent une couverture vivante et reconstituent le sol, composé d'essences fourragères, à bois de feu, à perches et à bois d'oeuvre est souhaitable.

Au Brésil, des travaux ont été effectués pour régénérer les sites dégradés; dans le cadre de cette expérience, on s'est intéressé en particulier aux besoins écologiques de chaque espèce et à la position dans la succession de végétation écologique (Nogueira 1977; Durigan et Nogueira 1990). Les résultats sont satisfaisants dans l'ensemble, mais l'analyse de la régénération naturelle successive indique que la diversité des essences (naturelles ou introduites) tend à se réduire progressivement au cours des générations suivantes.

En Inde, des terrains de recouvrement des mines de dolomie (Ram Prasad et Camire 1988) ont été boisés. *Acacia auriculiformis, A. campylacantha, Gmelina arborea* et *Pongamia pinnata* ont eu une meilleure croissance en hauteur et en diamètre quand ils étaient mélangés avec des bambous; la croissance d'*Albizia procera* a en revanche été légèrement retardée par les bambous. Dans le Madhya Pradesh, un site recouvrant une mine de bauxite a été reverdi grâce à l'établissement de *Shorea robusta* en mélange avec *Grevillea robusta, Eucalyptus camaldulensis, Toona ciliata* et *Pinus kesiya* (Ram Prasad 1988); on ne sait pas pourquoi ce mélange d'essences très diverses a été choisi et aucune information n'a été fournie sur les résultats obtenus.

L'arbuste *Hippophae rhamnoides* (argousier) est souvent planté en mélange avec des arbres forestiers en Chine. Il résiste bien à la sécheresse et au froid et est recherché pour la conservation et l'amélioration des sols en raison de son aptitude à fixer l'azote, mais aussi pour ses fruits (qui sont riches en vitamines C) et pour les autres produits qu'il

procure (bois de feu, fourrage, médicaments et huile). Cet arbuste est planté en mélange avec *Populus spp.* dans les travaux de conservation des sols et dans les rideaux protecteurs, mais bien que l'on plante chaque année 60 000 ha de cette essence, on ne dispose d'aucune estimation sur le nombre d'arbustes plantés en mélange, ni sur les avantages que peuvent présenter ces mélanges par rapport aux plantations pures. L'arbre *Robinia pseudoacacia* (faux acacia) est aussi utilisé en mélange avec des peupliers en Chine. Dans aucun de ces deux cas, on n'a trouvé d'informations selon lesquelles la croissance de l'espèce principale, ou la production sur le site, avaient été meilleures que lorsque le peuplier est cultivé seul.

Rideaux protecteurs et brise-vents

Cette fonction a été mentionnée dans le chapitre sur le climat. Comme les brise-vents sont généralement établis pour protéger des cultures, ils sont étroits afin de réduire au minimum la surface de terre soustraite à la production agricole, mais pour réduire les turbulences, un brise-vent est plus efficace lorsqu'il a un profil transversal triangulaire que lorsqu'il forme une barrière haute rectiligne. Un mélange d'espèces de hauteurs diverses à l'âge adulte permet d'obtenir le profil transversal souhaité, et filtre probablement mieux le vent qu'une plantation dense d'une seule essence. A Kano, au Nigéria, on a planté des rideaux protecteurs composés de huit rangées centrales d'*Eucalyptus camaldulensis* entourées de quatre rangées d'une autre essence de chaque côté. Les autres essences étaient *Acacias spp, Azadirachta indica* et *Anacardium occidentale* (adaptée aux sites plus humides), et l'on avait l'intention d'abattre la moitié de la largeur à l'âge de huit ans, puis, en alternant, l'autre moitié tous les quatre ans pour produire des perches et du bois de feu (Lowe 1991).

Plantations urbaines et péri-urbaines

Dans les villes, les arbres améliorent le microclimat et empêchent la transmission du bruit. Les plantations péri-urbaines améliorent de façon importante le cadre de vie, mais dans les zones arides et semi-arides, elles peuvent réduire le vent et la poussière dans la ville. Les plantations urbaines et péri-urbaines sont également vulnérables aux effets imprévisibles de la pollution de l'air. Un mélange d'essences est souhaitable, aussi bien du point de vue de l'agrément, pour éviter un aspect uniforme, que pour augmenter les chances de survie d'une partie de la couverture d'arbres dans le cas de dommages biotiques ou abiotiques. L'impact important de la pollution par l'ozone dans les forêts naturelles d'*Abies religiosa*, sur les collines entourant la ville de Mexico, a déjà été signalé, de même que les dégâts sur *Pinus jeffreyi* dans les montagnes de San Bernardino (Californie), où l'arbre à encens (*Calocedrus decurrens)* et le sapin amabilis (*Abies amabilis*) ont au contraire été très peu touchés.

Quelques exemples de plantations non industrielles

Foresterie communautaire au Népal

Dans le passé, les communautés locales pratiquaient traditionnellement l'exploitation ordonnée des forêts dans les collines du Népal, mais l'exploitation est devenue anarchique et excessive, de sorte que de nombreuses forêts situées à flanc de

collines ne sont plus que des prairies surpâturées portant un petit nombre de souches fortement élaguées. Un programme de reboisement a débuté dans les années 70; les premières plantations ont essentiellement été constituées de pins Emodi indigènes (*Pinus Roxburghii)*. On a constaté qu'une fois qu'un site était fermé au pâturage, les feuillus, tels que *Schima wallichii,* se régénéraient bien à partir des vieilles souches, des drageons et plus tard des semences. Ces feuillus sont beaucoup plus intéressants que les pins pour les communautés locales, pour en tirer du fourrage, du bois de feu et des outils agricoles. Depuis 1979, le projet forestier Népal/Australie fait des expériences, en vue d'étudier comment aménager des mélanges pins/feuillus pour obtenir différents produits finaux et de déterminer les rendements de ces mélanges. Les essais ont consisté à éclaircir afin de favoriser les pins ou les feuillus dans des proportions variées ou à recéper les feuillus (Gilmour et al.1989; 1990; Applegate et Gilmour 1987; 1988; Mohns et al. 1988). Ils comprennent aussi des plantations d'enrichissement et l'ensemble de l'opération repose sur des plantations d'enrichissement dans des forêts claires naturelles très surexploitées plutôt que sur l'établissement de plantations mélangées. Il est encore trop tôt pour formuler des conclusions précises, mais quelques enseignements d'ordre général peuvent déjà être tirés de cette expérience et être appliqués dans des projets de foresterie communautaire d'autres régions, en particulier pour aider les populations locales à choisir entre les plantations mixtes ou les plantations pures:

- il est essentiel de faire participer les communautés locales à l'aménagement et à la planification des parcelles forestières établies;

- pour que la communauté puisse apporter une contribution avisée à la planification de l'aménagement, elle doit avoir une idée claire des options; c'est pourquoi il est nécessaire de créer des parcelles de démonstration;

- les prescriptions doivent être simples, mais la manipulation des mélanges d'essences ne pose pas de problèmes particuliers, dans la mesure où il s'agit seulement de varier la proportion des espèces de conifères et de feuillus.

Rotin

Les rotins, qui constituent une famille de palmiers grimpants, sont exploités à la fois pour satisfaire les besoins des communautés locales et pour alimenter des exportations importantes, en Inde et en Malaisie en particulier. Parmi les rotins à petite canne, seuls *Calamus caesius* et *C. trachycoleus* sont plantés sur de vastes superficies dans la bande de forêts ombrophiles de cette région. Ce sont des rotangs qui forment des bouquets et *C. caesius* a traditionnellement été traité comme une culture itinérante, récoltée entièrement entre sept et dix ans puis à la fin de la période de jachère, vers l'âge de 14 ans. Toutefois, si les bouquets sont récoltés de façon sélective une année sur deux, ils peuvent être exploités en ayant un rendement durable pendant de nombreuses années (Dransfield 1979).

Les rotins sont ordinairement cultivés en forêt secondaire, mais ils ont donné de bons résultats dans des plantations d'hévéas abandonnées et même dans une plantation de *Pinus cocarpa* et dans une plantation de *Shorea robusta* au Bangladesh (Davidson 1986). Il est essentiel de savoir "manipuler" l'ombre pour produire du rotin de qualité; s'il y a

trop d'ombre, par exemple sous le couvert de *Dillenia spp*, le rotin a une croissance faible, mais il a moins d'entre-noeuds, ce qui est préférable. A Sabah, dans l'est de la Malaisie, le rendement de *Calamus trachycoleus*, au bout de 11 ans, a été estimé à 2,5 tonnes/ha/an, et son prix sur le marché était de 800 dollars E.-U. la tonne (non transformé) et 1 500 dollars E.-U. la tonne (transformé) (Dransfield 1988).

C. aman est habituellement cultivé pour produire de grosses cannes; cette espèce ne forme pas de bouquets et ne repart pas de la base après la coupe, si bien qu'elle ne peut être coupée qu'une seule fois. D'autres rotins à grosses cannes qui forment des bouquets, comme *C. inermis* ou *C. merrillii,* originaires des Philippines, pourraient le remplacer. La culture de *C. aman* pose un autre problème: en raison de son poids (il peut atteindre 180 m de long), il peut casser les arbres qui le soutiennent. D'autres variétés de rotins sont cultivés en Inde et à Sri Lanka et il existe même une espèce africaine.

Le rotin peut fournir des recettes financières intéressantes, jusqu'à 3 500 dollars E.-U./ha/an (brut) au bout de 11 ans seulement, pour des frais de gestion peu importants. Il doit être cultivé en mélange, mais on ne sait pas très bien dans quelle mesure l'autre espèce du peuplement peut contribuer aux recettes. Plusieurs options d'aménagement sont possibles: on peut considérer le rotin comme une composante du premier stade de la série de végétation secondaire de l'écosystème et le remplacer au cours des stades ultérieurs; ou bien tenter de manipuler le couvert afin de conserver le rotin pendant une révolution plus longue; ou encore maintenir la plantation à un stade précoce de la succession afin de favoriser le rotin aux dépens d'autres composantes du peuplement. La question devra être approfondie.

Santals (voir aussi annexe 4)

Le santal est un hémiparasite des racines qui peut pousser en association avec de nombreux hôtes, dont des graminées. Le genre Santalum pousse naturellement en Inde, en Australie et dans le bassin du Pacifique. Il comprend 14 espèces, mais la plus précieuse et l'une des plus vigoureuses est *Santalum album* qui pousse spontanément en Inde et dans le Timor-Occidental, en Indonésie; on plante actuellement cette espèce en Australie occidentale et dans de nombreuses îles du Pacifique, où les espèces indigènes ont été massivement exploitées.

Le bois de santal est l'un des bois les plus précieux que l'on puisse trouver sur le marché mondial. Il est utilisé pour la sculpture en Inde et dans ce cas son prix peut atteindre 9 400 dollars E.-U. la tonne. Le santal cultivé en Australie se vend essentiellement sur le marché du Moyen-Orient pour fabriquer de l'encens et même les copeaux et la poudre de bois peuvent atteindre environ 2 300 dollars E.-U. la tonne. L'huile de santal se vend sur les marchés d'Europe et d'Amérique du Nord à 1 500 dollars E.-U. le kg.

On a constaté que l'établissement des plantations peut être amélioré si un hôte primaire est utilisé dans la pépinière, mais qu'en pleine terre, le santal et son hôte primaire doivent être repiqués à proximité d'un hôte secondaire, qui est habituellement une espèce plus grande et plus vigoureuse. L'hôte primaire doit être un arbuste à croissance lente, tel que *Cajanus cajan* ou *Sesbania grandiflora; Acacia spp*, *Albizia spp*

et on a constaté que d'autres légumineuses, comme *Bauhinia biloba, Dalbergia sissoo* et *Terminalia* spp. sont aussi appropriées; en revanche *Pinus caribaea* et *Araucaria* spp seraient des hôtes peu intéressants.

Conclusions sur les produits et services non industriels

L'inclusion dans les plantations d'espèces qui fournissent des produits et des services non industriels est un moyen important de satisfaire les besoins de nombreux produits forestiers des populations rurales et de faire participer les communautés à la production de biens qui seront utilisés ailleurs, par exemple en cultivant des rotins ou des santals. Il existe probablement une beaucoup plus vaste gamme d'espèces que celles qui sont signalées ici, ce qui fait penser non pas que la demande des produits de ces autres essences est inexistante, mais que ces essences n'ont pas encore fait l'objet de recherches suffisantes, en vue de les incorporer dans des plantations monospécifiques, en tant que plantation d'enrichissement.

5. L'AMENAGEMENT DES MELANGES

Deux sources importantes ont étudié la classification des mélanges, les méthodes permettant de les réaliser et leur taux de réussite:

- Le Indian Forest Service (Service des forêts de l'Inde), au cours de la quatrième et de la cinquième conférences sur la sylviculture, qui ont eu lieu à Dehra Dun en 1934 et 1939. Les procès-verbaux de ces conférences offrent un compte rendu détaillé des expériences réalisées ainsi que des principes directeurs logiques pour créer des plantations forestières en peuplements mélangés dans le sous-continent indien.

- Le Centre technique forestier tropical a étudié le problème en Afrique de l'Ouest et divers rapports et documents ont été réunis dans un chapitre de l'Etude FAO Forêts N° 98 - *Les plantations à vocation de bois d'oeuvre en Afrique intertropicale humide* (FAO 1991b). Cet ouvrage contient une classification et des critères de sélection et d'aménagement des mélanges.

Ces deux sources sont complémentaires et parviennent à des conclusions similaires. La classification ci-après dérive de ces deux sources.

Classification des mélanges

Aucune classification des mélanges n'est entièrement satisfaisante car les classes de mélanges ne sont pas nettement différenciées, mais tendent à se succéder progressivement en fonction du site et du degré d'intervention sylviculturale. On propose la classification ci-après, qui se fonde sur la structure du peuplement et sur la durée du mélange par rapport à la révolution:

1. Couvert bistrate
   - 1.1 Mélange temporaire, destiné à devenir monospécifique
   - 1.2 Mélange permanent, destiné à rester plurispécifique.

2. Couvert monostrate
   Mélange généralement permanent, destiné à rester plurispécifique.

En général, on traitera de mélanges composés de deux essences; des mélanges plus complexes sont possibles, mais l'aménagement de deux espèces dans une plantation n'est déjà pas facile, et toute espèce supplémentaire augmente les difficultés.

1. <u>Couvert bistrate</u>

1.1 Mélanges temporaires, destinés à devenir monospécifiques avant la fin de la révolution.

- Des peuplements de protection sont utilisés pour aider une essence plus précieuse à traverser une phase d'établissement difficile. Ils sont surtout utilisés pour protéger contre des facteurs climatiques défavorables - gel, insolation - ou pour détourner

les attaques d'insectes. Dans les zones tempérées, les peuplements-abris servent souvent à fournir une protection contre le gel et ils sont aussi utilisés dans ce but dans certaines régions subtropicales, par exemple dans l'Himalaya. Dans les zones tropicales, on plante couramment des arbres à croissance rapide, pour abriter des espèces précieuses de la famille des méliacées et d'autres essences, telles que *Milicia (= Chlorophora) excelsa,* pendant le stade de végétation où elles sont exposées à des attaques de foreurs des pousses. On a peu étudié l'efficacité de cette stratégie, mais il semble que les foreurs sont inhibés par l'ombre. Les plantations de *Swietenia macrophylla* (acajou) de Sundapola (Sri Lanka) sont un bon exemple dl'utilisation réussie de peuplements de protection, bien que les participants à la Conférence de Dehra Dun (1939) aient estimé que les mélanges teck:*Swietenia macrophylla* ne donnaient pas de bons résultats en Inde et à Sri Lanka. Cependant, à Fidji et à la Martinique, des plantations pures d'acajou, qui n'ont pas bénéficié d'un peuplement de protection, ont bien poussé et de toute évidence elles n'ont pas subi de grosses attaques de foreurs.

Il est souvent utile de bien connaître la succession des espèces dans l'écosystème local pour sélectionner les essences de protection. *Milicia (=chlorophora) excelsa* et *Entandrophragma grandifoliola* ont été établis avec succès dans des bois de *Terminalia* exposés aux feux de forêt, avec un peuplement de protection de *Phyllanthus discoideus* (Dawkins 1949). Quarante ans plus tard, bien que la station ait connu de nombreux problèmes, *M. excelsa* et *E. grandifoliola* ont connu, d'après les rapports, une bonne croissance sur les microsites humides.

Au Népal, il existe une variante intéressante de peuplements-abris. Dans ce pays, les programmes villageois de boisement portant sur la plantation de pins définissent très clairement la superficie à reboiser, de sorte qu'il est plus simple de protéger efficacement la station contre les coupes non programmées des villageois et contre le pâturage non organisé de leur bétail. Il est souvent inutile de clôturer. Grâce à ce système, les feuillus les plus précieux se sont régénérés de façon satisfaisante sous la couverture de pins. Par la suite, on peut enlever les pins ou les laisser en place en tant que complément d'un peuplement mixte de feuillus (Gilmour et al. 1990).

- Mesures sylviculturales visant à améliorer la forme du peuplement principal: cette amélioration peut résulter de l'écartement entre les arbres, et elle n'a pas été testée scientifiquement, mais on considère que la forme de *Pterocarpus dalbergioides* dans les îles Andaman est améliorée quand il pousse sous un étage supérieur de *Lagerstroemia hypoleuca, Terminalia bialata etc.* De même, *Dalbergia latifolia* a une meilleure forme s'il est cultivé en sous-étage (Indian Forest Service 1939).

- Des espèces de remplissage peuvent être utilisées en cas de pénurie de l'essence principale, ou si l'essence principale est coûteuse ou difficile à établir. Dans ce cas, le peuplement principal peut être planté à un écartement large dans une matrice d'espèces "de remplissage" bon marché qui serviront à supprimer les adventices, à fournir une ombre latérale au peuplement principal ou constitueront une couverture vivante qui protègera le sol. En Indonésie, il a été conseillé de

planter *Altingia excelsa, Schima wallichii* var. *noronhae, Eugenia polyantha* sous *Toona sureni* afin de fournir une couverture vivante, la production ligneuse n'étant qu'un objectif secondaire (Grutterink 1930).

Ces trois fonctions des mélanges (protection, amélioration sylviculturale et "remplissage") peuvent souvent être assurées grâce à des plantations d'enrichissement dans les forêts des zones tropicales humides. Les espèces résiduelles de faible valeur qui poussent spontanément dans les forêts coupées à blanc remplissent une triple fonction (protection, amélioration culturale, ou remplissage); toutefois ce dernier rôle est fortement réduit par la présence de plantes grimpantes sur de nombreux sites. Il existe très peu d'exemples où le recours à une plantation d'enrichissement pour établir des plantations industrielles peut être considéré comme une réussite économique indiscutable. On espérait que les expériences de plantations par groupes de *Maesopsis eminii* avec exploitation de la forêt résiduelle en vue de produire du charbon de bois seraient rentables (Earl 1968), mais aucun rapport récent n'a été publié sur ces travaux. En revanche, des espèces introduites, comme *Albizia chinensis, Melia azeradach, Milletia dura* et en particulier *Maesopsis eminii* ont envahi la forêt naturelle dans les montagnes de l'Est de l'Usambara en Tanzanie, où elles font à présent concurrence aux espèces indigènes (Binggeli et Hamilton 1990). Toutefois, lorsque l'objectif premier n'est pas la production de bois mais plutôt le maintien d'un écosystème diversifié, la plantation d'enrichissement est recommandée car le sol n'est pas exposé pendant la phase d'établissement.

Des recettes économiques peuvent parfois être obtenues rapidement grâce à l'utilisation de mélanges, quand le peuplement principal est une essence précieuse, mais qui demande de l'ombre, a une croissance lente, et ne fournit pas de produits d'éclaircies de valeur. L'adjonction d'une espèce à croissance rapide dans le peuplement peut procurer des recettes précoces et rendre un projet plus rentable économiquement. En Inde et au Myanmar, la plantation de *Xylia dolabriformis* avec des tecks n'a pas été considérée comme une réussite (Indian Forest Service 1939), mais comme le teck, qui tendait à éliminer les *X. dolabriformis* était plus précieux, l'échec n'a pas été trop grave, d'autant plus que le mélange avait pour effet d'augmenter l'écartement entre les tecks, à une période où on le plantait habituellement trop serré. Au Nigéria, l'établissement de *Lovoa trichilioides* et d'*Entandrophragma utile* en association avec *Nauclea diderrichii*, qui peut être exploité pour produire des perches à l'âge de 15 ans, a été considéré comme un succès (Lamb 1991; Lowe 1991). Dans les îles Salomon, des expériences ont été conduites en vue de cultiver *Swietenia macrophylla* dans une matrice de *Securinega flexuosa*, espèce qui se vend facilement sur le marché des poteaux de contruction à l'âge de 5 ou 6 ans et qui devrait réduire l'incidence du foreur des pousses *Hypsipyla* dans les acajous (Iles Salomon 1988a).

Il est fondamental de supprimer le peuplement temporaire en temps voulu et d'apporter le plus grand soin à cette opération pour que l'espèce principale ne soit pas endommagée lors de l'enlèvement des arbres de protection.

1.2 Mélanges permanents

Sous-étage destiné à améliorer le sol. On a déjà souligné dans la section sur les sols la nécessité de maintenir la teneur en matière organique de la couche arable et les conditions dans lesquelles celle-ci est susceptible de s'épuiser, par exemple à cause de l'accumulation de la litière (Morris 1986) ou du brûlage de la couverture morte sous les tecks (Bell 1973). Certaines espèces ont des feuilles qui se décomposent plus facilement et qui favorisent la microfaune et la flore qui sont les principaux agents de conversion de la litière en matière organique dans le sol. Au Costa Rica, un mélange de *Cordia alliodora* et d'autres essences a sensiblement accéléré la décomposition des feuilles de *C. alliodora* (Babbar et Ewel 1989). L'introduction d'espèces de sous-étage dans les plantations de tecks en Indonésie, dans la première moitié du XXe siècle, a été largement motivée par le désir d'améliorer les sols ou les conditions hydrologiques, même si l'on considérait aussi qu'il était fondamental que ces plantations de sous-étage produisent du bois plus facilement commercialisable. Les opinions étaient très partagées quant à la nécessité ou l'utilité de planter des mélanges. Dans les années 30, on avait rassemblé des informations qui démontraient que la plantation de mélanges n'était pas rentable économiquement (Hart 1931a) et que l'on pouvait obtenir un résultat plus satisfaisant sur le plan économique, mais similaire sur le plan écologique, en encourageant la formation d'un sous-étage naturel (Kunst 1918). On a suggéré que les effets bénéfiques d'un sous-étage de *Leucaena sp.* pouvaient être attribués aux pratiques culturales plutôt qu'à l'espèce (Hart 1931b). Dans le nord-est de la Zambie, l'absence d'une couche épaisse de litière sous *P. kesiya* de 20 ans (hauteur: 18 m; diamètre: 23 cm; Ph du sol: 6,2) a été associée à l'ouverture du couvert, à une bonne couverture vivante constituée entre autres de *Desmodium ascendens* var. *robustum* et de *Sphenostylis marginata* et à la présence de lombrics (Lawton 1991).

A Trinidad, la pratique consistant à planter les tecks à un écartement réduit s'est développée, d'où une augmentation des feux de forêt parce que les feuilles décidues de teck s'accumulent sur le sol sans se décomposer. En conséquence, les essences vulnérables au feu ont été éliminées, ce qui a entraîné une perte presque totale de la matière organique contenue dans la couche arable et une grave érosion. Les teckeraies établies précédemment avaient été plantées moins serré et en mélange avec d'autres espèces. Dans ces plantations, les feuilles de teck se décomposaient beaucoup plus rapidement et la couverture morte, moins exposée au feu, offrait des conditions favorables à la régénération naturelle des arbres et arbustes locaux. La couverture vivante était plus abondante, les conditions édaphiques étaient meilleures et l'érosion faisait moins de dégâts (Bell 1973).

L'utilisation d'espèces fixatrices d'azote, en particulier d'acacias, est souvent préconisée, par exemple *Acacia auriculiformis* qui peuvent être recépés sous *Eucalyptus exserta* en Chine (Barnes 1991, Kaeokammerd 1991), ou les mélanges de peupliers avec *Hippophae rhamnoides* ou *Robinia pseudoacacia* (voir chapitre 4). Les conditions édaphiques s'améliorent sous l'effet de la croissance des espèces fixatrices d'azote et les plantations fournissent une plus vaste gamme de produits aux populations, mais il n'est pas évident que, dans les zones tropicales, le peuplement principal se soit sensiblement

amélioré. En revanche il existe des cas bien connus où la fixation d'azote a eu une action bénéfique sur la croissance d'une ou de plusieurs composantes d'un mélange en Amérique du Nord.

2. Couvert monostrate

Il s'agit là du maintien d'un mélange de deux espèces ligneuses dominantes. Ce mélange est habituellement permanent, en ce sens qu'il dure pendant toute la révolution, mais il est toujours possible de passer à une seule espèce, et le mélange devient alors temporaire. Les raisons pour lesquelles on cherche à établir un mélange monostrate sont les suivantes:

- Synergie. Lorsque l'on cultive deux espèces ensemble, le rendement peut être supérieur au rendement moyen de ces deux espèces cultivées dans des plantations pures distinctes. L'"effet de mélange" a été observé en Scandinavie avec les pins et les épicéas (Jonsson 1961) et dans les forêts de hêtres et de chênes en Belgique, en Allemagne et en France. Dans le Queensland, on avait coutume de planter *Pinus elliottii* avec *Araucaria cunninghamii;* le mélange a eu un effet positif sur la croissance de *A. cunninghamii*, mais les stations étaient situées hors de l'aire d'extension naturelle de cette espèce, aussi cette pratique a-t-elle été abandonnée (Applegate 1991). On a constaté qu'un mélange de *Bombax malabaricum* et d'*Acacia catechu* enregistrait une meilleure croissance que l'une de ces essences cultivée isolément en Inde (Indian Forest Service 1939).

Le mélange *Eucalyptus/Albizia* à Hawaï (DeBell et al. 1985) est un exemple de synergie apparente associée à la fixation d'azote dans les zones tropicales; fait plutôt inhabituel dans ce cas, l'espèce fixatrice d'azote est plus grande et a une croissance plus rapide que "l'espèce principale". Cet exemple sera étudié plus à fond dans ce même chapitre.

- Réduction des attaques de ravageurs et de maladies. Cette question est étudiée en détail dans le chapitre 3. Les mélanges permanents ne semblent constituer une "barrière" efficace contre les maladies et les ravageurs que lorsque les arbres précieux qui doivent être protégés sont très dispersés, ce qui est par exemple le cas pour *Milicia (= Chlorophora) excelsa*, essence sujette aux attaques de *Phytolyma lata* (Gibson et Jones 1977). Dans certains cas, les mélanges peuvent même augmenter les risques d'infestation, par exemple lorsque l'on introduit un hôte alternant. On ne peut donc pas penser en principe que les mélanges fournissent une protection supplémentaire sur tous les sites ou pour toutes les espèces.

- Vent. Il se peut que, dans les zones tempérées, des mélanges comme ceux de hêtres et de mélèzes augmentent la résistance au déracinement par le vent, mais cet effet n'est pas certain dans les zones tropicales. En Afrique du Sud, on espérait que l'introduction de *Pinus radiata*, qui est censé s'enraciner plus profondément, dans des peuplements d'*Acacia melanoxylon*, espèce résistant mal au vent, améliorerait la stabilité de cette espèce. Or, ce mélange n'a pas été une réussite (de Zwaan 1981).

- Assurance économique. Cette question sera étudiée dans le chapitre 7. Si l'on ne sait pas très bien quelle est l'essence qui se comportera le mieux sur un site, ou s'il y a un risque que survienne un événement imprévisible - gelées tardives, vent, sécheresse - il peut être justifié de planter deux ou plusieurs essences (Indian Forest Service 1939, Heybroek et van Tol 1985). Dans ce cas, le mélange est souvent temporaire, car on constatera que le peuplement est devenu monospécifique en fin de révolution; d'autre part le mélange risque de s'avérer inutile pour la deuxième révolution, car entre-temps on aura obtenu des informations sur les exigences stationnelles de chaque espèce du mélange (Heybroek et van Tol 1985). Le mélange doit être soigneusement adapté au site et il est utile de connaître les différentes espèces de la série de végétation de l'écosystème local.

Critères sylviculturaux pour réussir les mélanges

- Dans les mélanges temporaires, les essences doivent être compatibles, c'est-à-dire que l'espèce secondaire ne doit pas être trop exigeante; par exemple elle ne doit pas avoir une couronne trop vigoureuse, de façon à ce que les deux espèces puissent coexister pendant plusieurs années, sans intervention humaine.

- Dans les mélanges permanents à couvert monostrate, les espèces ne peuvent avoir une croissance satisfaisante que dans des conditions limitées, en ce qui concerne le site, les caractéristiques sylviculturales et les options d'aménagement.

Le site doit être adapté aux deux espèces (Jonsson 1961; FAO 1991b). Souvent, les besoins qui sont communs aux deux espèces, en matière de station, sont peu nombreux. Il est possible d'étendre la gamme de sites sur lesquels deux espèces peuvent être cultivées ensemble grâce à des interventions sylviculturales, mais celles-ci s'accompagnent généralement d'une réduction de la rentabilité économique. Cette observation ne fait que corroborer le fait, déjà souligné, que l'adaptation des espèces au site est l'un des premiers impératifs d'une bonne pratique sylvicole, qu'il s'agisse de plantations pures ou mélangées.

Les caractéristiques sylviculturales doivent être compatibles; cela signifie essentiellement que les deux espèces doivent représenter à peu près le même stade de la série de végétation secondaire et que leurs cimes doivent avoir des caractéristiques similaires. En outre, leur croissance initiale en hauteur doit être comparable. Ainsi le mélange de *Khaya spp* ou *Entandrophragma spp,* à croissance lente, avec *Terminalia spp* ou *Triplochiton scleroxylon* a peu de chances de donner de bons résultats, alors que des mélanges de *Terminalia superba, T. ivorensis* et *Triplochiton scleroxylon* devraient réussir (FAO 1991b).

Le seuil à partir duquel deux espèces entrent en concurrence et, partant, la densité de plantation, la surface terrière maximale et le calendrier et l'intensité des éclaircies doivent aussi être analogues.

Dans les zones tropicales, il est souhaitable que les âges de révolution soient similaires (FAO 1991b); en effet, dans ces régions, les arbres dominants portent

généralement de larges houppiers et les éclaircies peuvent endommager gravement les arbres qui sont laissés en place. En Scandinavie, où les couronnes sont relativement étroites, il est recommandé d'enlever les bouleaux inclus dans des peuplements de pins et d'épicéas, à environ 60 pour cent de l'âge de révolution (Mielikainen 1985; Tham 1988).

Récemment, en Allemagne et dans d'autres pays d'Europe centrale, on s'est beaucoup préoccupé de donner à la foresterie de plantation de bonnes bases écologiques. De nombreuses plantations monospécifiques sont critiquées parce que la recherche d'une optimisation étroite des objectifs entraîne un risque trop élevé (Brunig 1983), bien que les avantages des forêts jardinées et de l'aménagement "naturel" soient probablement surestimés (Kenk 1990). Les plantations mixtes devraient permettre d'élargir les objectifs, mais il n'est pas certain que l'utilisation de modèles de rendement, qui est préconisée pour remplacer les tableaux de rendement, trop rigides, soit possible dans les peuplements plurispécifiques des forêts tropicales. La politique recommandée, qui consiste à maintenir les peuplements très ouverts de façon à encourager un sous-bois de végétation indigène, permet d'obtenir les mêmes effets que la politique d'éclaircies massives, visant à maximiser la croissance des tiges les plus précieuses, qui a été préconisée pour des raisons économiques en Afrique du Sud il y a près de quarante ans (Craib 1947). On trouve fréquemment des plantations surpeuplées de pins, de cyprès et de tecks dans certains pays tropicaux et les effets négatifs sur le site sont visibles, mais résultent plus d'un mauvais aménagement que de la composition monospécifique des forêts.

Méthodes d'établissement des mélanges

Les mélanges peuvent être établis de diverses façons: en mélanges intimes (les essences sont mélangées dans les lignes), en layons (chaque ligne est composée d'une seule essence), la combinaison et le nombre des lignes pouvant varier, ou encore en groupes. Les combinaisons des mélanges à l'intérieur des lignes ou entre les lignes sont décrites de façon assez détaillée dans les actes de la quatrième Conférence sur la sylviculture de Dehra Dun (Indian Forest Service 1934). D'une manière générale, la conclusion a été que les mélanges sont extrêmement difficiles à aménager, sauf si une composante est nettement dominante et si l'autre est une espèce d'ombre qui peut survivre en étant à demi étouffée; en d'autres termes, un mélange bistrate est plus facile à aménager qu'un mélange monostrate. Sur le plan administratif, la plantation en layons est la plus facile à établir, mais c'est aussi la plus difficile à aménager sur le plan technique, surtout si les essences ne sont pas compatibles. Les mélanges de cyprès et de *Grevillea robusta* au Kenya sont un exemple de mélanges en layons non réussi (Graham 1949); comme les essences n'étaient pas compatibles, les cyprès plantés près des lignes de *G. robusta* ont eu un fût fortement courbé. Les mélanges intimes sont les plus satisfaisants s'ils doivent servir d'"assurance" contre les risques, car les couronnes des arbres qui ont une bonne croissance peuvent se développer dans l'espace laissé par ceux qui n'ont pas pris, avec un effet de lisière réduit au minimum. Cependant, lorsqu'un mélange se forme spontanément, il se présente souvent comme une mosaïque de petits groupes constitués en réponse à des différences stationnelles mineures.

Au Zaïre, des plantations ont été établies de la manière suivante: on a introduit dans une matrice de brousse naturelle des groupes espacés de 10 m les uns des autres contenant un maximum de 37 arbres plantés à un écartement réduit (0,5 m). On a planté

une gamme d'essences exotiques comme les eucalyptus et les pins, *Grevillea robusta* et *Acacia decurrens*; dans une variante de cette technique, des essences *Cupressus lusitanica, Eucalyptus grandis* et *Acacia decurrens* ont été mélangées à l'intérieur de chaque groupe. Il semble que les aménagistes aient sélectionné les essences sans se préoccuper de leur compatibilité. A 30 mois, la croissance semblait bonne à l'intérieur des groupes, d'après les photographies, mais il n'y avait pas de matrice et les effets de lisière ont sans doute été importants. Cette technique, basée sur les groupes d'Anderson (Anderson 1953), a également été proposée pour des plantations du Kivu et du Rwanda (Pierlot 1955); aucun rapport n'a été publié ultérieurement.

On a défini les mélanges au sens large (Chapitre 1) comme une association d'espèces ou de provenances différentes en blocs voisins. Les mélanges de clones peuvent aussi être définis comme des mélanges au sens large de blocs voisins. Cette forme de mélange a, par exemple, été utilisée à Aracruz, au Brésil, où des clones d'eucalyptus ont été mis au point pour chaque type de site du domaine; en outre, la politique d'aménagement prévoit que, sur un total de quelque 100 clones disponibles, 10 à 15 clones seront utilisés sur chaque site, en blocs de 5 à 30 ha (Burley et Ikemori 1988).

Qualités requises pour l'aménagement

Les plantations mixtes demandent un aménagement plus intensif que les plantations monospécifiques de sorte que, si les techniques de base sont les mêmes pour l'un ou l'autre type de plantations, l'aménagement des premières doit être plus minutieux et la marge d'erreur possible est plus étroite. Les qualités requises peuvent être résumées en trois points.

Clarté des objectifs

L'objectif que l'on poursuit en établissant un mélange doit être clairement défini; il peut s'agir d'améliorer le sol, d'accroître le rendement par effet de synergie, de réduire les effets négatifs sur la faune et la flore etc. Ce n'est qu'une fois que les objectifs sont clairement définis que l'on peut demander aux agents de terrain d'établir et d'entretenir correctement le mélange. Dans l'idéal, les objectifs devraient rester inchangés pendant toute la durée d'une révolution, mais les mélanges présentent l'avantage d'offrir suffisamment de souplesse pour que, si la situation du marché change, les objectifs puissent être modifiés de façon à satisfaire les nouvelles exigences.

Expérience

On a déjà expliqué que l'aménagement des plantations mixtes est une opération délicate (Dupuy 1986). Des prescriptions peuvent être formulées pour guider les forestiers de terrain, mais les décisions d'aménagement doivent tenir compte des petites différences stationnelles et être prises sur place. Seule l'expérience, et en particulier l'expérience du site considéré, permet de savoir quel est le meilleur traitement à adopter sur ce site. Si quelques plantations "taungya" mélangées du Sapoba (Nigéria) ont réussi à produire des acajous satisfaisants, en dépit d'un aménagement discontinu et peu approprié (Lamb 1991; Lowe 1991), des compétences d'aménagement sont indispensables pour que les plantations mélangées soient rentables sur le plan économique.

Continuité de l'aménagement

Dans quelques régions d'Europe centrale, il n'est pas rare qu'une forêt soit aménagée pendant plusieurs décennies par trois générations successives d'une même famille. Ainsi, l'expérience est accumulée et transmise. En revanche, dans quelques pays, l'administration a pour politique de transférer le personnel, à tous les niveaux et même jusqu'aux agents subalternes, tous les trois ans. Cette pratique empêche d'acquérir ou de conserver une expérience détaillée des besoins sylviculturaux d'une forêt. L'élaboration de bons plans d'aménagement, la tenue de registres et la discipline dans l'application des prescriptions, permettent d'atténuer dans une certaine mesure l'effet des transferts de personnel. Mais bien que les affectations de très longue durée à un même poste soient généralement irréalisables, si l'aménagement est discontinu et si des moyens financiers ne sont pas garantis, l'aménagement a peu de chances de réussir, surtout en ce qui concerne les plantations mixtes.

Si la plantation n'est pas soumise à un aménagement, une des essences tend probablement à devenir dominante et à former des peuplements ou des groupes monospécifiques.

Quelques expériences de plantations en mélange

Quelques exemples sont présentés ci-après pour illustrer les points importants.

a) Reconstitution des conditions d'une forêt naturelle

Si les forêts tropicales humides sont détruites par l'homme sur une superficie plus grande qu'une petite parcelle, il leur faudra plusieurs centaines d'années pour atteindre naturellement un climax (Adlard 1978). En Malaisie, le Forest Research Institute a établi dans les années 30 les parcelles de démonstration de Kepong, en plantant des diptérocarpacées sous des peuplements de protection d' *Albizia falcataria.* Les parcelles ont été établies sur des mines d'étain restaurées ou sur des potagers abondonnés. Le peuplement de protection a été supprimé assez tôt, mais au fil des années, des essences locales se sont régénérées sous les diptérocarpacées. Aujourd'hui, soixante ans après, on pense que quelques-unes de ces parcelles ressemblent d'assez près à la succession secondaire de la forêt naturelle qui se trouvait autrefois sur ce site (Ng 1991).

Dans quelques régions du Brésil, on s'est efforcé de recréer la forêt naturelle. Une vaste gamme d'essences, le plus souvent indigènes mais aussi quelques espèces exotiques, ont été plantées sur un petit nombre de sites. Ces plantations ont été étudiées pour déterminer les besoins écologiques des espèces et le stade de la série de végétation (Nogueira 1977; Kageyama et al. 1990). A Sao Paolo, une plantation expérimentale établie sur une surface déboisée depuis 50 ans a été considérée, 20 ans plus tard, comme une forêt semi-décidue vigoureuse, contenant des arbres pouvant atteindre 20 m de haut. A Candida Mote cependant, une étude de la régénération naturelle dans une plantation âgée de 15 ans établie sur la rive d'un fleuve, a montré que, bien que 42 espèces se soient régénérées, 64 pour cent étaient des *Nectandra megapotamica* et la plantation tend fortement à se convertir en une forêt homogène (Durigan et De Souza Dias 1990). Il est utile de bien connaître l'écologie locale et les espèces de chaque stade de la succession.

En Ouganda, la sélection d'arbres-abris pour *Chlorophora excelsa* a été basée sur une connaissance de l'environnement local (Dawkins 1949) et les résultats obtenus semblent honorables. A Cuba, une classification détaillée des espèces, en fonction du stade de la série de végétation et des besoins sylviculturaux, a été effectuée pour Sierra del Rosario (Canizares et al. 1987).

Rien n'indique que les plantations brésiliennes (ci-dessus) puissent produire du bois commercial ni qu'elles aient été conçues à d'autres fins que pour protéger les rives des fleuves. En revanche, les parcelles de diptérocarpacées de Kepong portent du bois commercial de dimension exploitable, bien qu'elles soient aujourd'hui utilisées comme zone d'agrément. Cet exemple a démontré qu'il est possible de recréer les conditions d'une forêt secondaire, dans un laps de temps raisonnable, sur de très petites parcelles.

b) Une plantation d'acajou

A Sundapola (Sri Lanka), un mélange d'acajous (*Swietenia macrophylla*), de tecks (*Tectona grandis*), et de jacquiers (*Artocarpus integrifolius*) a été établi au début du XXe siècle. Le but de ce mélange était de protéger les acajous des attaques de *Hypsipyla robusta*. Dans les années 50, les acajous s'étaient abondamment régénérés, mais on ne sait pas très bien si c'est parce qu'ils étaient protégés des attaques du foreur ou parce que l'acajou est une espèce d'ombre à croissance rapide. On a décidé d'aménager la zone en forêt jardinée en favorisant l'acajou plus précieux (Tisseverasinghe et Satchithananthan 1957). Ce système est aujourd'hui pratiqué avec succès depuis une trentaine d'années; les populations de tecks et de jacquiers avaient diminué et ne représentaient plus qu'environ 20 pour cent du peuplement en 1963 (Muttiah 1965). L'abattage est effectué avec un grand soin et, comme l'acajou est un bois précieux, il est possible d'exiger que les exploitants forestiers ébranchent les arbres avant la coupe.

Il s'agit là d'un cas assez rare où un peuplement de protection a rempli sa fonction et a ensuite été conservé en qualité de partenaire égal dans l'étage supérieur du peuplement, même si le matériel sur pied a été fortement réduit par rapport au niveau initial. Cet exemple montre aussi que l'on peut choisir de convertir une plantation en peuplement monospécifique, même si à Sundapola les circonstances sont inhabituelles en ce sens que la technique des coupes jardinées est normalement réservée aux plantations à dominante monospécifique dans les zones tropicales.

c) Afrique de l'Ouest

On a appris à bien manipuler des mélanges comportant l'introduction de *Terminalia spp, Khaya spp, Heritiera utilis, Triplochiton scleroxylon, Nauclea diderrichii, Lovoa trichilioides Aucoumea klaineana* au milieu des espèces indigènes et de tecks, *Cedrela odorata, Gmelina arborea* et de pins comme essences exotiques (FAO 1991b).

Dans les forêts denses sempervirentes, *Heritiera utilis, Aucoumea klaineana, Nauclea diderrichii* (longue révolution - supérieure à 35 ans) et *Terminalia ivorensis, T. superba, Gmelina arborea* et des pins (révolution courte - 20 à 25 ans) peuvent être établis en peuplements purs. Pour élever *Khaya ivorensis, k. senegalensis* et *K. anthotheca* en association avec *Heritiera utilis* et *Nauclea diderrichii* il faut avoir recours

aux peuplements mélangés; dans ce cas, il est toujours possible de convertir la forêt en plantation monospécifique de l'espèce secondaire si *Khaya* ne donne pas de résultats satisfaisants.

Dans la zone de transition entre les forêts denses sempervirentes et les forêts denses semi-décidues, on peut planter *Terminalia ivorensis* et *T. superba* en peuplements mélangés ou encore mélanger l'une ou l'autre de ces deux espèces avec *Triplochiton scleroxylon;* la proportion des composantes peut être déterminée au moyen d'éclaircies précoces ou tardives. Dans la zone de forêt dense semi-décidue, ces essences, de même que *Gmelina arborea,* peuvent être cultivées en association avec des tecks qui servent d'espèce secondaire. Cependant, toutes ces essences, ainsi que *Cedrela odorata* peuvent aussi être cultivées en peuplements purs.

Dans les savanes arborées, les tecks et *G. arborea* peuvent être cultivés soit en peuplements purs, soit en peuplements mélangés.

On notera que le teck est considéré comme une espèce secondaire qui supporte bien l'ombre, alors qu'ailleurs il est normalement considéré comme une espèce dominante de lumière. Parmi les espèces citées plus haut, les essences de lumière sont *Terminalia spp, Triplochiton scleroxylon, Aucoumea klaineana, Gmelina arborea, Cedrela odorata* et les pins, alors que *Heritiera utilis, Khaya spp, Nauclea diderrichii* et les tecks sont considérés comme des essences qui supportent relativement bien l'ombre.

Sur la base de l'expérience, les mélanges à éviter en raison de l'incompatibilité des vitesses de croissance (Dupuy 1985) sont les suivants:

Tiegmella spp avec *Heritiera utilis*
Cedrela odorata avec *Entandrophragma utile* ou *Terminalia ivorensis*
Terminalia ivorensis avec *Khaya spp* ou *Entandrophragma utile*
Triplochiton scleroxylon en association avec *Khaya spp* ou *Tieghemella* spp.

Dans la réserve forestière de Mamu River au Nigéria, des acajous (*Khaya spp, Entandrophragma spp* et *Lovoa trichilioides)* ont été cultivés dans une matrice de *Gmelina arborea,* qui a été coupée tous les dix ans suivant le système du taillis. Après deux ou trois révolutions les acajous ont dominé en hauteur *G. arborea* et formé un couvert fermé, mais il n'est pas certain que ce système ait été rentable sur le plan économique (Lowe 1991).

L'expérience réalisée en Afrique de l'Ouest a principalement montré que les mélanges destinés à la production de bois ne peuvent réussir que si l'on prend soin de bien adapter les essences au site et si l'on sait quelles sont les essences qui sont compatibles sur le plan écologique et sylvicultural.

d) Plantations clonales d'eucalyptus

A Aracruz, au Brésil, on a construit une usine de pâte qui est alimentée par 82 000 ha de forêts artificielles d'eucalyptus. Ces plantations sont aménagées suivant des révolutions de sept à huit ans et, grâce à un programme intensif d'amélioration génétique,

elles ont une productivité élevée et chacune des variétés utilisées est très uniforme. Ces résultats ont été obtenus grâce à la mise au point de clones présentant les caractéristiques requises (vigueur, rectitude, branchement, capacité de recépage, résistance aux maladies, densité du bois, etc.) (Burley et Ikemori 1988; Aracruz Cellulose 1988; Campinhos et Ikemori 1986). Ces plantations forestières sont extrêmement proches de cultures agricoles à court terme et, pourrait-on penser, extrêmement éloignées du concept de plantations mélangées, même si elles contiennent des espèces et des hybrides différents. Bien qu'il soit toujours tentant de privilégier les clones qui permettent d'obtenir le rendement le plus élevé, les aménagistes ont décidé de disposer d'un ensemble d'environ une centaine de clones et de sélectionner entre 15 et 20 clones pour les utiliser sur chaque type de site. Il fallait ensuite décider si l'on mélangerait les clones dans une parcelle ou si l'on réaliserait un mélange au sens large en juxtaposant des parcelles de clones différents. Cette dernière solution a été retenue, d'une part parce que l'on a pensé que, à moins que tous les clones n'aient le même degré de compétitivité, l'un d'eux serait supprimé ce qui entraînerait une certaine perte d'uniformité et probablement une baisse de rendement, et d'autre part parce que l'on a considéré qu'un mélange intime n'offrait aucun avantage pour lutter contre les ravageurs et les maladies et qu'il risquait même d'augmenter la probabilité d'infestations. On est parti du principe qu'un mélange d'un petit nombre de clones comporte un risque plus élevé de pertes dues aux ravageurs et aux maladies qu'un mélange de nombreux clones ou qu'une plantation monoclonale (Libby 1982). Dans une plantation monoclonale, les parcelles qui ne donnent pas de résultats satisfaisants peuvent être récoltées tôt et remplacées, au prix d'une désorganisation très limitée des opérations habituelles, alors qu'une parcelle mixte dont une composante ne donne pas de résultats satisfaisants est difficile à traiter.

En outre, à Aracruz, la politique d'aménagement prévoit de conserver 20 pour cent de la superficie sous forêts naturelles, essentiellement le long des fleuves, et ces forêts ont été enrichies d'arbres fruitiers et autres. Dans ce cas, l'objectif est à la fois de protéger le sol et d'encourager les oiseaux insectivores qui peuvent aider à lutter contre les attaques d'insectes sur les eucalyptus, ainsi qu'à conserver la diversité biologique.

Ainsi, même dans cette production à très haut rendement, dans laquelle la diversité spécifique a été délibérément réduite, on a renoncé à quelques recettes à court terme afin d'obtenir un mélange de clones et par là même d'inclure un élément de diversité. Dans les plantations d'eucalyptus de Pointe-Noire, au Congo, l'ensemble de clones est plus réduit et plus de la moitié de la superficie a été plantée avec 5 clones seulement (Martin et al. 1989). La base génétique a récemment été élargie grâce à la mise au point d'un programme simultané de croisements contrôlés (Martin 1991). On s'est également orienté vers le bois de sciage (Cossalter 1991) pour diversifier la production. Les procédés qui permettent de réduire les risques inhérents à l'utilisation de matériel clonal ont été résumés par Matziris (1991) comme suit: utilisation d'un grand nombre de clones en mélange ou en mosaïque, rotation des clones dans le temps et introduction régulière de nouveaux clones, associée à la reproduction sexuée pour produire du nouveau matériel clonal et pour servir de "relais".

Conclusions sur l'aménagement des mélanges

Les mélanges de deux ou plusieurs essences sur un site ne pourront être réussis, c'est-à-dire atteindre un ou plusieurs objectifs, que si ces objectifs ont été clairement définis par les aménagistes, et si les essences sélectionnées sont compatibles. Il est utile de connaître la position des espèces dans la hiérarchie de la série de végétation de l'écosystème, mais il faut également être informé des besoins sylviculturaux de chaque espèce.

Les mélanges dans lesquels une essence pousse sous une autre espèce, par exemple peuplements de protection ou couverture vivante, sont généralement assez faciles à aménager, toutefois il faut des connaissances techniques pour supprimer un étage supérieur si l'essence d'ombre est celle qui doit constituer le peuplement final.

L'aménagement des mélanges de deux essences dominantes est beaucoup plus compliqué; ce type de mélanges ne peut être établi que sur un petit nombre de sites et aboutit souvent à l'élimination d'une des espèces et donc à un retour à un peuplement essentiellement monospéficique. Bien que l'on ait cité des cas où deux ou plusieurs espèces ont poussé ensemble sur le même site, on considère, d'une manière générale, que, en raison de la pénurie d'agents forestiers formés et expérimentés dans de nombreux pays tropicaux, du manque de stabilité du personnel et de l'insuffisance des garanties financières, l'aménagement des mélanges d'essences dominantes a peu de chances de donner de bons résultats à l'heure actuelle.

Il est relativement justifié de planter des mélanges pour s'assurer contre un événement imprévisible (sécheresse, gel, excès d'eau, salinité etc.), mais le choix d'essences bien adaptées au site reste essentiel et ce type de mélange tend généralement à devenir homogène en fin de révolution. Il n'est pas certain que les mélanges soient efficaces pour prévenir les attaques de ravageurs ou de maladies non spécifiés.

Une stratégie de mélanges au sens large, lorsque l'on dispose de plusieurs essences adaptées, et la mise en oeuvre d'une bonne pratique sylvicole, permettront très souvent d'obtenir la stabilité requise. Quelques-unes des stratégies qui sont préconisées à l'heure actuelle pour des raisons écologiques en Allemagne, comme l'écartement plus large entre les arbres, produisent des effets très similaires à ceux de certaines stratégies adoptées en Afrique australe il y a quarante ans, pour des raisons économiques.

6. RENDEMENTS

Il n'est pas facile de quantifier les rendements en bois (par opposition aux autres avantages) dans les peuplements à longue révolution. Les expérimentations à long terme doivent être vastes, et sont difficiles à contrôler et à exécuter; elles ont donc un coefficient élevé de variation résiduelle. Pour toutes ces raisons, on a généralement utilisé des techniques de modélisation mathématique pour calculer les rendements, mais ces techniques mesurent le potentiel de rendement dans des conditions optimales ou normalisées, et les données à partir desquelles sont établis les modèles proviennent souvent de placettes qui n'ont subi aucune perturbation. Toutefois, la mesure des rendements réels reflète la situation réelle, aussi les données sont-elles dérivées de placettes moyennes recevant un traitement moyen et ayant une incidence de calamités moyenne. Dans ce cas, on cherchera surtout à se procurer des données d'entrée abondantes, à bien regrouper les peuplements et les parcelles et à utiliser des fonctions de régression pour décrire les processus.

Amérique du Nord et Asie tempérée

On s'est intéressé aux effets de l'adjonction d'espèces fixatrices d'azote sur les rendements en bois.

En Amérique du Nord, la culture d'aulnes (essentiellement *Alnus rubra)* en mélange avec des conifères, comme le sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii),* sur des sites pauvres en azote peut accroître considérablement les rendements des conifères, bien que cette augmentation ne se manifeste généralement que lorsque les conifères ont plus de 30 ans (Binkley 1984; Binkley & Green 1983). Les effets bénéfiques ne deviennent apparents que quand l'espèce fixatrice d'azote est dominante ou co-dominante dans le peuplement et, sur les sites pauvres en éléments nutritifs, les aulnes sont incapables de fixer l'azote. Sur les sites riches en azote, le rendement global reste habituellement inchangé ou peut même diminuer, et ordinairement des conifères décroît (Binkley et Greene 1983).

Les mélanges d'aulnes, de robinias (*Robinia pseudoacacia)* et en particulier d'oliviers d'automne (*Elaeagnus umbellata)* peuvent influencer la croissance du noyer (*Juglans nigra)* en Amérique du Nord; la minéralisation de l'azote est considérablement augmentée et il peut y avoir un accroissement correspondant du rendement du noyer, qui peut être multiplié par 30 (Paschke et al. 1989; Schlesinger et Williams 1984). Mais, dans un cas, la croissance de la surface terrière du noyer n'a pas été directement liée à la concentration d'azote dans le sol, alors que l'azote était fixé de façon satisfaisante dans la couche superficielle fertile par l'aulne et par d'autres espèces fixatrices d'azote (Friederich et Dawson 1984).

Dans les mélanges d'essences de lumière, une composante tend à être étouffée par l'autre. Le chêne rouge d'Amérique *Quercus falcata* var. *pagodifoglia* est étouffé jusqu'à l'âge de 25 ans s'il est cultivé en association étroite avec des liquidambars d'Amérique (*Liquidambar styraciflua)* ou avec des platanes d'Amérique (*Platanus occidentalis).* Le chêne rouge d'Amérique, plus précieux, présentait une meilleure conformation quand il

était cultivé en association étroite avec d'autres essences et, après l'âge de 25 ans, il pouvait entrer en concurrence avec ces dernières (Clatterbuck et al. 1987; Clatterbuck et Hodges 1988).

L'idée qu'une essence puisse occuper une "niche" dans un peuplement, sans gêner l'espèce principale, est séduisante. Ce phénomène pourrait se produire dans des conditions assez particulières, comme en Finlande, dans les mélanges d'épicéas et de bouleaux, où *Betula pubescens* pousse dans les vides laissés par des épicéas qui n'ont pas pris, dans des peuplements mal établis (Mielikainen 1985). Mais un cas d'Amérique du Nord montre que, bien que l'immixtion naturelle de *Tsuga canadensis* dans des peuplements de feuillus ait accru le volume sur pied de 30 pour cent et de 20 pour cent sur deux sites, cette augmentation s'est accompagnée d'une réduction du volume des feuillus plus précieux, comme *Quercus rubra* (Kelty 1989).

Au Japon, un mélange d'*akamatsu (Pinus densiflora)* et d'*hinoki (Chamaecyparis obtusa)* a entraîné une augmentation du volume global, mais une baisse du volume de *hinoki* (Kawahara et Yamamoto 1986).

Europe

Le mélange de hêtres (*Fagus sylvatica)* et d'épicéas (*Picea abies)* augmenterait les rendements totaux de 15 pour cent (Schutz 1989). Toutefois, dans ce cas la hausse résulte moins d'une interaction entre les essences que du fait que l'épicéa a une croissance plus rapide que le hêtre; les peuplements purs d'épicéa pourraient être encore plus productifs.

L'interaction entre *Picea abies* et *Pinus silvestris* a été étudiée de façon assez détaillée en Scandinavie (Jonsson 1961). Une interaction positive, dite "effet de mélange", a été identifiée lorsque le pin et l'épicéa sont cultivés ensemble sur des sites où les deux espèces ont normalement une bonne croissance. Cet effet s'affaiblit lorsque le site change de façon à favoriser l'une ou l'autre des espèces - les sites plus secs et moins fertiles favorisent le pin; les terrains plus humides et plus fertiles avantagent l'épicéa. En outre, l'espèce favorisée par le site tend à devenir dominante et à former des peuplements monospécifiques, ou au moins une mosaïque de groupes d'une seule espèce. Cette tendance a également été observée pour d'autres essences en Hollande (Heybroek et Tol 1985). L'"effet de mélange" varie en fonction du paramètre considéré; si c'est la hauteur, il est positif pour les deux espèces; si c'est la croissance en diamètre, il est positif pour le pin, mais nul ou légèrement négatif pour l'épicéa (Jonsson 1961). Une étude plus récente portant sur les mélanges pins/épicéas cultivés sur de la tourbe et des landes *Calluna* a fait apparaître un effet positif important sur la croissance de *Picea sitchensis* (Malcolm et al. 1990). En raison de l'effet de mélange (ou synergie), il est difficile d'effectuer une comparaison entre des peuplements naturels purs et mélangés sur des sites différents si l'indice de fertilité est défini par la hauteur dominante, car on tendra alors à comparer les peuplements mélangés à des peuplements purs situés sur un site dont l'indice de fertilité est plus élevé. Il est possible que ce fait ait dissimulé les avantages des peuplements mélangés (Jonsson 1961). L'indice de fertilité doit donc être défini suivant une autre méthode moins précise basée sur l'observation des caractéristiques du sol, des types de végétation et des essences témoins.

L'interaction entre les bouleaux et les conifères est plus complexe. Elle a été analysée dans deux études en Finlande et en Suède (Mielikainen 1985; Tham 1988), au moyen de techniques de modélisation du rendement. Dans l'ensemble, les deux études donnent une interprétation similaire des interactions bouleaux/conifères, mais les rendements et le niveau des avantages sont beaucoup plus élevés en Suède; cette différence peut s'expliquer par le site ou simplement par le fait que les modèles ont été établis à partir d'hypothèses différentes. *B. pendula,* espèce pionnière qui domine initialement le peuplement principal, peut avoir un effet bénéfique sur l'épicéa (*Picea abies)*, qui est une essence d'ombre, même si le bouleau est laissé en place pendant toute la révolution. Le pin (*Pinus sylvestris)* est une espèce qui ne supporte pas l'ombre et, de ce fait, bien que le bouleau accroisse les rendements dans les peuplements peu denses, lorsque les deux espèces sont en concurrence étroite, le bouleau réduit la croissance en hauteur du pin. Pour remédier à ce problème, on peut rapprocher le bouleau pendant les sept ou huit premières années, jusqu'à ce que le pin ait acquis un avantage en hauteur de 1 m (Mielikainen 1985), mais cette solution rend les bouleaux moins intéressants en tant que peuplement de protection. On ne doit jamais laisser les bouleaux en place pendant toute une révolution dans les peuplements de pins, car le rendement total serait réduit. *B. pubescens* peut avoir un effet négatif sur les conifères (Mielikainen 1985) et est moins utile (Tham 1988).

Tableau 3: Rendements estimatifs épicéas-bouleaux - Suède

		Peuplements purs			Peuplements mélangés			
Age	Espèce	#/ha	Ht m	Vol m^3/ha	#/ha	Ht m	Vol m^3/ha	
25	Epicéa	1 936	5,3	39	1 936	5,5	23	
	Bouleau	-	-	-	600	15,8	78	éclairci à l'âge de 25 ans
50	Epicéa	1 237	14,6	300	1 238	15,0	300	
	Rendement total			300			378	

Source: Tham (1988)

Note: Ces données supposent une légère éclaircie des épicéas à l'âge de 30 et 40 ans.

Ainsi, en conservant *B. pendula,* on obtient un volume supplémentaire de 78m^3/ha et, bien que cette augmentation s'accompagne d'une baisse du rendement de l'épicéa à l'âge de 25 ans (-40 pour cent), ce déficit est compensé sur les 25 années suivantes et le rendement global augmente de 25 pour cent sur une révolution de 50 ans. Le gain de rendement dépend de la capacité de réponse de l'épicéa à la libération, après avoir été à demi-étouffé, car les espèces de lumière n'ont pas cette capacité. Si *B. pubescens* est utilisé, le gain est inférieur de quelque 20 m^3, sans doute parce que ce bouleau a une croissance initiale rapide.

Tableau 4: Rendements estimatifs Epicéa-Bouleau & Pin-Bouleau - Finlande

	B. pendula		*B. pubescens*	
	Total	Bois de sciage	Total	Bois de sciage
	Vol m^3			
Epicéa IF $24_{(100)}$	Révolution 90 ans			
Epicéa 100 %	425	266	415	257
+ Bouleau 25 %	438	282	394	217
+ Bouleau 50 %	433	251	390	184
Pin IF $28_{(100)}$	Révolution 80 ans			
Pin 100 %	615	371		
B. pendula 100 %	493	200		
Mélange 50 %	625	350	Bouleau dépressé à 40 ans	

Source: Mielikainen (1985)

Note: L'adjonction de 25 pour cent de *B. pendula* dans un peuplement d'épicéa a accru le rendement total de 3 pour cent et le rendement en bois de sciage de 6 pour cent (par rapport à un peuplement pur d'épicéa), mais si le mélange est de 50 pour cent, l'accroissement est plus faible, aussi bien pour l'épicéa que pour le pin, et la production de bois de sciage diminue.

Les informations provenant de Suède et de Finlande font penser que l'"effet de mélange" peut être obtenu grâce à un aménagement soigneux, mais l'interprétation et l'extrapolation des résultats ne sont pas simples. Premièrement, l'augmentation des bouleaux vient plus d'une régénération naturelle que du capital planté, et deuxièmement, le mélange a un effet plus important sur le volume sur pied de la station en tant que déterminant du rendement, que sur le rendement pour un volume sur pied donné. Bien que, dans le cadre de ces expériences, la production de bois ait augmenté, il n'est pas certain que, dans la pratique, les avantages puissent être clairement établis (Agestam 1991).

Il est beaucoup plus compliqué de construire un modèle de rendement pour un peuplement bispécifique que pour un peuplement monospécifique; chaque espèce supplémentaire augmente les difficultés. Un modèle a été mis au point pour le sud des Etats-Unis; il part du principe que les composantes individuelles des mélanges ont un comportement tout à fait comparable à celui qu'elles auraient dans des peuplements purs (Nelson 1964); il semble que ce modèle n'ait pas été testé dans les zones tropicales, et on ignore s'il serait valable dans ces régions.

Zones tropicales

Sur la côte d'Hamakua, à Hawaï, les plantations expérimentales d'*Eucalyptus saligna/Albizia falcataria* établies sur une exploitation de canne à sucre abandonnée, constituent l'exemple le plus remarquable des avantages qu'offrent les mélanges. Dans une expérience, dont un traitement a aussi compris *Acacia melanoxylon,* un mélange d'*Eucalyptus:Albizia* (40:60) a entraîné une augmentation de 140 pour cent de la production totale de bois, par rapport au rendement obtenu avec un peuplement pur d'*Eucalyptus* à l'âge de 65 mois. A elle seule, la composante *Eucalyptus* du mélange a donné une production supérieure de 60 pour cent à celle de la parcelle pure. Un mélange 50:50 d'*Acacia melanoxylon* et d'*Eucalyptus* s'est avéré moins intéressant, mais même dans ce cas, la production globale a augmenté de 50 pour cent et le rendement d'*Eucalyptus* n'a baissé que légèrement dans le mélange. Tous les traitements ont reçu des engrais, dans le cadre de cette expérience. (DeBell et al. 1985).

Dans une autre expérience, dans laquelle tous les traitements ont reçu des engrais pendant la première année, mais dans laquelle seule la placette d'*Eucalyptus* a reçu de nouveaux apports d'engrais pendant chacune des trois années suivantes, l'adjonction de 25 pour cent, ou moins, d'*Albizia falcataria* a fait baisser le rendement total à l'âge de 48 mois, alors que si la proportion d'*Albizia* passait à 34 pour cent ou plus, le rendement total du mélange était plus élevé que dans la parcelle pure d'*Eucalyptus,* mais l'accroissement n'était pas très significatif. Le rendement d'*Eucalyptus* dans les mélanges a été nettement inférieur à celui qui a été obtenu dans la parcelle pure, mais quand la composante *Albizia* dépassait 50 pour cent, les arbres individuels d'*Eucalyptus* avaient un volume sensiblement plus élevé que dans la placette pure. Aucune comparaison n'a été effectuée avec une parcelle pure d'*Albizia.* Comme la comparaison se faisait avec une placette pure d'*Eucalyptus* bénéficiant d'apports massifs d'engrais, les résultats ont été faussés au détriment du mélange. On suppose que si la comparaison avait été faite avec *Eucalyptus* recevant des quantités d'engrais normales, tous les mélanges seraient apparus sous un jour beaucoup plus favorable (DeBell et al. 1989).

On peut déduire des chiffres du Tableau 5 que l'effet bénéfique de l'*Albizia falcataria* fixatrice d'azote (ou *Acacia melanoxylon)* ne se matérialise que quand l'essence fixatrice d'azote atteint une proportion suffisamment élevée dans le mélange. Cet effet a été noté en Amérique du Nord (voir chapitre 3).

L'expérience a été menée sur une ancienne exploitation de canne à sucre, où la teneur du sol en azote avait probablement été réduite, mais où les ressources en autres éléments nutritifs étaient sans doute suffisantes. Il ne faut pas oublier que, sur d'autres sites, ce mélange a donné des résultats médiocres ou a même été un échec à Hawaï.

A Espirito Santo (Brésil), un mélange d'*Eucalyptus urophylla* et de *Leucaena leucocephala* a accru le taux de mortalité des eucalyptus et réduit le rendement total à l'âge de sept ans. On a pensé que le mélange avait favorisé l'humidité, ce qui avait favorisé la propagation de spores de *Cryphonectria cubensis* qui attaquaient l'eucalyptus. Les placettes avaient reçu de l'engrais azoté, ce qui a sans doute inhibé l'effet de la fixation de l'azote par *L. leucocephala* (Moraes de Jesus et Brouard 1989).

Tableau 5: Mélange E. saligna-Albizia falcataria & E.saligna- Acacia melanoxylon

Hawaï

Expérience 1	65 mois		Expérience 2	48 mois	
Mélange	Tiges/ha	Poids sec Tonne/ha	Mélange	Tiges/ha	Poids sec Tonne/ha
Eucalyptus	2 200	37,6	Eucalyptus	2 396	93,7
Eucalyptus	1 012	35,3	Eucalyptus	2 101	58,1
Acacia 50 %	1 012	16,2	Albizia 11 %	278	8,9
	2 024	51,5		2 379	67,0
Eucalyptus	838	58,2	Eucalyptus	1 562	57,8
Albizia 60 %	1 225	37,1	Albizia 50 %	833	44,8
	2 063	95,3		2 395	102,6
		Eucalyptus		815	53,4
		Albizia 66 %		1 632	50,8
				2 447	104,2
			Eucalyptus	(engrais standard)	44,0

Source: DeBell et al. (1985, 1989)

Les rendements de certaines plantations mixtes ont été mesurés dans les collines du Népal, non loin de Katmandou. Aucune mesure comparative des peuplements mixtes et des peuplements purs n'a été effectuée mais il était manifeste que les pins qui avaient été plantés (*P, roxburgii, P. wallichiana et P. patula)* et les espèces de feuillus dominées par *Schima wallichii,* qui poussent spontanément dans les plantations de pins, réagissaient différemment au site. Dans une plantation âgée de 10 ans, le rendement (tige plus feuille) des pins a varié entre 0,8 et 6,7 tonnes/ha/an, les rendements les plus élevés étant obtenus sur d'anciens pâturages où subsistaient un petit nombre d'espèces feuillues, alors que les feuillus (dont les rendements ont été compris entre 1,8 et 6,7 tonnes/ha/an) ont donné de meilleurs résultats sur d'anciennes stations forestières et sur des cultures en terrasse abandonnées. Sur ces derniers sites, les pins ont souffert de la concurrence avec les feuillus (Mohns et al. 1988).

Conclusion sur les rendements

Dans les zones tempérées comme dans les zones tropicales, il existe quelques exemples de rendements totaux en volume de bois plus élevés dans les peuplements mélangés que dans les plantations pures. Mais l'adaptation soigneuse des essences au site et le bon choix des espèces d'accompagnement sont d'une importance cruciale pour la réussite des mélanges et l'effet qu'a une essence sur une autre peut varier en fonction du

site et avec le temps; les gains de rendement dépendent aussi du calendrier et de l'ampleur des interventions d'aménagement. En outre, les gains totaux peuvent être réduits et, dans les plantations industrielles, ils ne concernent pas toujours la composante la plus précieuse du mélange.

Il est difficile de construire des modèles de rendement polyspécifiques portant sur les espèces plantées dans les forêts tropicales humides, compte tenu du nombre potentiel d'essences et de l'insuffisance des données d'information. Mais ce n'est pas parce qu'il peut s'avérer impossible de prévoir avec précision le développement des mélanges dans les zones tropicales que ceux-ci ne doivent pas être essayés.

Dans les zones tropicales, les rendements ont rarement été enregistrés et lorsque les mélanges n'améliorent pas la productivité, on s'aperçoit souvent que l'objectif du mélange n'avait pas été défini de façon claire; il est donc possible que les essences choisies ne soient pas appropriées. L'exemple remarquable de Hawaï cité ci-dessus doit être analysé avec prudence si l'on veut en faire un modèle général, car plusieurs facteurs se sont combinés dans ce cas.

Le rendement en bois est un bon paramètre pour mesurer la réussite des plantations industrielles et des plantations à bois de feu et à perches, mais il n'est pas valable lorsque les forêts ont été établies pour des raisons écologiques - contrôle de l'érosion, renforcement de la fertilité du sol, amélioration du micro-climat ou effets sociaux directs. L'évaluation de ces avantages "non commercialisables" sera étudiée plus en détail dans le chapitre suivant.

7. ECONOMIE

L'économie concerne l'engagement de ressources pour obtenir une production et les rendements en produits ayant une valeur pour la société. Dans les pays tropicaux, la foresterie de plantation peut être favorisée car on trouve des terres à faible coût d'opportunité et de la main-d'oeuvre à bas prix. Les connaissances technologiques et le personnel d'aménagement qualifié peuvent cependant être plus rares et donc plus coûteux. L'environnement naturel peut favoriser une croissance rapide et forte en volume des espèces recherchées. Cependant, cet avantage est contrebalancé par un coût car la croissance de la végétation adventice est elle aussi importante et donc coûteuse à contrôler. La valeur du produit sur le marché local peut être relativement faible parce que dans une économie à faible revenu, la demande est réduite car la forêt naturelle fournit du matériel ligneux de substitution bon marché, ou encore parce que l'acheminement du produit vers d'autres marchés est difficile en raison de l'éloignement et du coût du transport. L'équation change à mesure que l'économie locale se développe, ce qui influe à la fois sur le coût des approvisionnements en intrants et sur la demande des produits.

Un investissement en forêt artificielle s'amortit sur plusieurs années et, lorsque l'on évalue un investissement de ce genre, il est très important de tenir compte du décalage dans le temps entre la dépense et la perception d'un revenu. Pour de nombreuses cultures d'arbres tropicaux, ce décalage dans le temps peut être plus bref que dans les pays tempérés - 10 ou 20 ans, contre 50 à 100 ans par exemple, pour obtenir des rendements finaux de 200 à 400m^3/ha.

Le concept de valeur nette actualisée est un instrument utile pour évaluer sur une base comparable les dépenses et les revenus qui interviennent à des périodes différentes du cycle de production et pour pouvoir comparer la rentabilité de différentes cultures et de différentes options d'aménagement pour une même culture. Dans de telles évaluations, on part du principe que tous les coûts et avantages peuvent être exprimés en valeur monétaire et que l'on peut choisir un taux d'actualisation qui ramène toutes les valeurs engagées ou perçues à différentes périodes, à la valeur de la période actuelle.

Dans les plantations industrielles, les recettes provenant des ventes constituent l'avantage essentiel et les intrants de production sont achetés et vendus sur des marchés bien établis; l'analyse financière est donc simple. Ainsi on peut prévoir un rendement financier positif d'une espèce à haut rendement si les conditions de végétation sont favorables et constantes et les marchés établis; c'est par exemple le cas pour les plantations d'eucalyptus d'Aracruz (Brésil) ou de Pointe-Noire (Congo). En revanche, l'analyse coûts/bénéfices des plantations de la Commission forestière du Royaume-Uni (United Kingdom Forestry Commission), qui ne couvrait que les avantages "commerciaux", a donné un rendement financier négatif. L'inclusion dans l'analyse des valeurs "non commerciales" et des avantages écologiques (qualité de l'environnement, loisirs, préservation du paysage, rôle de réservoir à carbone des plantations) a abouti à un rendement financier positif (Bateman 1991). Quand l'objectif principal d'une plantation est la remise en état de sites dégradés, la protection des bassins versants ou la conservation des sols, il est encore plus important d'évaluer correctement les avantages écologiques, bien que les critères d'évaluation de ces avantages ne soient pas encore au point. On notera, toutefois, que la nécessité d'évaluer les avantages écologiques est

maintenant généralement reconnue. Une analyse des taux de rentabilité des projets forestiers de la Banque mondiale a indiqué que ces taux étaient de 15 à 21 pour cent pour les huit projets de remise en état des bassins versants, de 15 à 30 pour cent pour les 27 projets d'agroforesterie, de plantations à bois de feu, de foresterie communautaire ou de forêts à avantages sociaux, mais de 10 à 15 pour cent seulement pour les 15 projets de plantations industrielles (Spears 1985). Toutefois, on ne sait pas dans quelle mesure les valeurs "non commerciales" ont été incluses dans l'analyse économique des projets de plantation.

En raison de l'insuffisance des ressources d'investissement, les responsables financiers adoptent des taux d'actualisation élevés qui favorisent les espèces à haut rendement, les révolutions brèves et les politiques de gestion assurant des coûts réduits au minimum et une production élevée; or, si des essais adéquats ne sont pas effectués et si l'on n'accumule pas une expérience suffisante, ces politiques tendent à comporter des risques élevés. En effet, elles obligent les gestionnaires à adopter des solutions à effet rapide, souvent coûteuses, par exemple à ajouter des engrais artificiels pour atténuer des carences en éléments nutritifs imprévues, à utiliser des produits chimiques ou à recourir à des traitements aériens pour lutter contre les ravageurs et les maladies. En revanche, lorsque l'établissement de plantations mélangées procure des avantages, ceux-ci peuvent avoir pour contrepartie une baisse de production. Cette approche "faibles intrants/faible production/faible risque" est probablement valable pour les forêts à révolution longue, mais si les taux d'intérêts composés sont élevés sur de longues périodes, elle doit être écartée. Certains auteurs se sont demandés s'il convenait d'adopter des taux d'actualisation élevés pour analyser les projets de longue durée et ils ont également fait valoir que, dans les pays industriels, les taux d'intérêt "réels" à long terme, sont de l'ordre de 2 à 4 pour cent seulement (Leslie 1987).

En tout état de cause, il est évidemment imprudent de se lancer dans un investissement en plantations forestières sans s'assurer que les recettes attendues seront suffisantes pour rembourser les coûts et le passif. La société, par l'intermédiaire du gouvernement ou de la communauté, peut être disposée à apporter des fonds supplémentaires afin d'assurer des avantages qui n'apportent pas de recettes financières directes à l'investisseur, mais qui sont considérés comme importants pour la communauté - conservation des sols et des ressources en eau, qualité de l'environnement et autres avantages écologiques par exemple. Il est indispensable d'identifier clairement ces avantages lorsque l'on définit les objectifs d'une plantation, pour que l'évaluation économique soit fiable.

Aspects économiques des mélanges

Les mélanges peuvent être utiles, grâce à la symbiose, bien que les arguments présentés dans le chapitre 6 sur les effets des mélanges sur le rendement en bois, ne soient pas concluants. Ils peuvent avoir l'avantage d'étaler dans le temps la perception des revenus grâce à l'enlèvement et à la vente des produits de l'une des essences en début de révolution. Les essences peuvent être mélangées afin de se garantir contre le risque que l'une d'entre elles soit attaquée par des ravageurs ou des maladies. Comme les arbres restants ont été favorisés par le mélange pendant les années de formation, les pertes dues aux ravageurs et aux maladies peuvent être moins que proportionnelles aux décès, étant

donné que les arbres qui meurent peuvent aussi être récoltés. Enfin, on peut préférer les mélanges parce qu'ils améliorent le cadre de vie, ou pour des raisons esthétiques ou écologiques.

L'économie de chacun de ces types de systèmes d'aménagement peut être analysée, grâce à l'estimation de la valeur actualisée étudiée plus haut, à une estimation appropriée des coûts et des recettes et à une évaluation des avantages "non commerciaux".

Expérience dans les pays tempérés

En Scandinavie, on s'est intéressé à la théorie de l'économie des plantations mixtes, mais celle-ci est essentiellement axée sur l'aménagement des espèces de feuillus qui poussent naturellement dans les peuplements artificiels de conifères. La récolte ayant lieu très longtemps après l'établissement et les prix du produit final étant imprévisibles, la thèse ci-après a été proposée:

- l'investissement initial doit ménager un choix (il devrait donc s'agir d'un mélange), surtout parce que, avec une longue révolution, il est très probable que les objectifs devront être redéfinis;

- l'éclaircie et le choix définitif entre les deux composantes du peuplement final doivent être effectués le plus tard possible.

On aura ainsi les meilleures possibilités d'identifier les essences qui devraient obtenir les prix les plus élevés au moment de la coupe finale et ce, sans risque supplémentaire d'échec biologique de l'une des essences, si les deux sont aussi adaptées l'une que l'autre au site. Bien entendu, ce principe est limité par les impératifs sylviculturaux et les nécessités de l'aménagement; par exemple, la conservation d'un matériel sur pied excessif peut conduire à la stagnation et les éclaircies tardives peuvent endommager de façon excessive les arbres laissés en place. Cette théorie a le défaut de s'intéresser essentiellement aux valeurs commerciales et de négliger les autres avantages, en outre elle ne prend pas en compte l'impact que peuvent avoir les mesures préconisées sur le sol sur plusieurs générations. Ceci dit, la théorie part du principe que les variations des prix relatifs sont essentiellement aléatoires, mais qu'elles sont reliées aux prix précédents de façon inversement proportionnelle au temps écoulé. En d'autres termes, les prévisions de prix ont plus de chances d'être précises sur un laps de temps bref qu'à long terme. Certains ont soutenu que les gains économiques procurés par les peuplements mélangés, qui peuvent en outre comporter des recettes additionnelles précoces grâce aux éclaircies des espèces les plus précieuses, ont été sous-estimés et sont, selon toute probabilité, bien supérieurs à "l'effet de mélange" dont on a beaucoup parlé, mais qui est souvent réduit et aléatoire (Lohmander 1990). On notera que, dans les plantations de Scandinavie, les essences d'accompagnement (essentiellement bouleau et tremble) poussent spontanément et que les conifères se régénèrent eux aussi naturellement. Jusqu'à une époque relativement récente, les feuillus étaient traités comme des espèces indésirables; c'est seulement depuis que le bouleau a retrouvé des débouchés que cette espèce contribue à fournir un revenu.

On fait parfois valoir que l'introduction d'une espèce d'accompagnement peut améliorer la qualité et donc la rentabilité de l'essence principale. Cette amélioration s'est produite dans les cas suivants:

- suppression des gourmands sur le chêne rouge et maintien d'une couverture vivante favorisant la régénération du chêne par le sous-étage de tsuga (Kelty 1989);

- augmentation de la longueur de la tige du chêne rouge d'Amérique lorsqu'il est en concurrence avec *Liquidambar* (Clatterbuck et Hodges 1988);

- la suppression des branches latérales des épicéas par *P. pendula*, a entraîné un gain des rendements en bois de sciage (+6 pour cent) (Mielikainen 1985). Mais bien que l'adjonction de 25 pour cent de *P. pendula* ait légèrement accru le rendement total des pins, elle a, semble-t-il, réduit les rendements en bois de sciage (-5 pour cent) - voir tableau 4;

- d'autres études montrent que, grâce au maintien des bouleaux, la hauteur de l'élagage naturel des pins s'est élevée et le coeur branchu a été réduit; tous les coûts des soins culturaux supplémentaires ont été couverts par des recettes. Ces résultats sont cependant imputables à la densité plutôt qu'au mélange et auraient probablement pu être obtenus en réduisant l'écartement entre les pins, toutefois le coût aurait été plus élevé (Haegg 1988, 1989, 1990).

On ignore quelle sera l'importance de ces avantages.

Expérience tropicale

Aucune analyse économique des plantations mixtes dans les zone tropicales n'a été relevée dans le cadre de la présente étude. Les comptes rendus des expériences réalisées avec *Eucalyptus/Albizia* à Hawaï n'abordaient pas les aspects économiques de la culture de ce mélange. Comme les arbres étaient destinés à la fourniture d'énergie, on présume que l'objectif premier était de produire la plus grande quantité de biomasse possible. Si le bois plus léger d'*A. falcataria* est plus coûteux à exploiter, d'une part parce que les tiges sont plus nombreuses et, d'autre part, parce que, comme cette espèce est branchue, elle risque plus d'être endommagée lors de la coupe, sa valeur en tant que biomasse est pratiquement aussi élevée que celle de l'eucalyptus. Dans une plantation à vocation énergétique, le mélange devrait être une réussite sur le plan économique, vu les résultats cités. Mais si l'objectif avait été de cultiver des eucalyptus pour obtenir du bois de sciage, les avantages économiques du mélange n'auraient pas été aussi évidents; la valeur des deux bois par rapport à l'utilisation finale est importante.

Au Nigéria, ainsi qu'on l'a indiqué précédemment, *Nauclea diderrichii* (opepe) est utilisé comme peuplement de protection pour des essences appartenant à la famille des méliacées - *Entandrophragma, Khaya, Lovoa* -; cette espèce a réduit l'incidence de *Hyspsipyla robusta* et permis d'obtenir une production intermédiaire grâce à la vente des perches de l'opepe. On a constaté que le taux de rentabilité interne de l'opepe cultivé sur une révolution de 60 ans était de 4,5 pour cent, alors que quand cette espèce est cultivée

en mélange (5 opepe, 1 méliacé), ce taux augmente légèrement (4,6 pour cent) pour une révolution de même durée (Ball 1979). Ce léger écart entre les deux taux est dû au fait que le volume final des méliacées est plus faible que celui de l'opepe cultivé en peuplement pur, la valeur des méliacées étant plus élevée. On a aussi constaté que comme la demande de perches d'opepe était forte, les arbres les mieux formés ont été abattus au cours d'éclaircies précoces, ce qui a eu deux conséquences: les opepe les moins vigoureux ont été laissés en place pour la récolte finale et les arbres du peuplement final ont été gravement endommagés par les éclaircies.

Les plantations mixtes de *Swietenia/Securinega* établies à titre d'expérience dans les îles Salomon offrent aussi ce potentiel. Toutefois, dans ce cas comme dans d'autres, il n'est possible d'obtenir un revenu supplémentaire que s'il y a un marché pour le produit des éclaircies. Dans les années 50, il n'y avait pas de marché local pour les produits d'éclaircie de neuf ans au Nigéria (Henry 1960), alors que, grâce au développement rapide des fournitures d'énergie électrique dans les années 70, la demande de perches d'opepe a été importante quoiqu'imprévue. En Inde, l'utilisation de *Gmelina arborea* comme abri pour *Dipterocarpus turbinatus* a donné de bons résultats sur le plan sylvicultural, mais il a fallu supprimer le peuplement de protection avant qu'il ne soit vendable et le recrû a posé des problèmes (Indian Forest Service 1939).

En Scandinavie, il a été démontré (voir plus haut) que le maintien de mélanges poussant spontanément peut être avantageux sur le plan économique. La même situation pourrait facilement se produire dans les Tropiques - invasion d'une plantation par des espèces pionnières telles que *Macaranga spp., Anthocephalus chinensis, Neoboutonea macrocalyx ou Croton spp.* Mais l'interaction avec l'essence principale, surtout s'il s'agit d'un conifère exotique, pourrait ne pas être aussi acceptable qu'en Scandinavie et les débouchés de l'espèce d'accompagnement sont encore très limités.

Gains et pertes à long terme

Les avantages qu'offrent les plantations mélangées pour améliorer les sols et maintenir l'état de la station sur plusieurs révolutions sont d'une importance capitale. Ils sont cependant difficiles à quantifier ou à incorporer dans un modèle économique, car l'échelle de temps est très longue. Il peut arriver qu'une culture épuise les ressources en un nutriment particulier d'un site, sans que cela se traduise par une carence au cours des premières révolutions. Les rendements de cette culture seraient considérés comme durables, si l'on ne tenait pas compte de la perte d'éléments nutritifs et du risque d'une brusque baisse de rendement lorsque la teneur en ce nutriment tombera en-dessous du seuil minimum. A long terme, il est indispensable de garantir une fertilité et des rendements durables. Pour y parvenir, il faut engager des dépenses ou renoncer à des avantages financiers à court terme. On ne doit pas se servir des modèles économiques à court terme (une ou deux révolutions) qui sont habituellement appliqués pour cacher aux forestiers les risques de dégradation du site à long terme, alors que ces risques pourraient être atténués par l'utilisation de mélanges.

Evaluation des risques

L'analyse économique doit comprendre une évaluation du risque d'échec inhérent à toute entreprise. Les partisans des plantations mélangées sont souvent motivés par le désir de réduire les risques d'échec grave dû à une catastrophe imprévisible (attaque d'insectes ou de champignons, sécheresse, etc.). Le concept des mélanges à vocation d'"assurance", étudié dans les chapitres 3 et 6, montre que ce risque est reconnu. Toutefois, cette "assurance" peut comporter un coût, sous forme de réduction des rendements et d'augmentation des frais d'établissement et d'aménagement. En Nouvelle-Zélande, où les plantations sont constituées à 85 pour cent de *Pinus radiata*, on a fait valoir qu'une politique consistant à investir dans une seule essence était justifiée pour les raisons suivantes:

- *P. radiata* est bien adapté aux sites disponibles en Nouvelle-Zélande, et il n'y a pas de raison particulière de craindre des épidémies catastrophiques;

- au cas où surviendrait une infestation grave de maladie ou de ravageurs, telle que *Dothistroma pini*, le pays dispose de suffisamment de moyens financiers et d'agents forestiers pour la combattre;

- rien n'indique que *Pinus radiata* est plus vulnérable aux ravageurs et aux maladies que les peuplements indigènes régénérés naturellement, par exemple *Nothofagus* a été attaqué par des insectes (*Platypus*);

- en ce qui concerne cette essence unique, on a cherché à maintenir une base génétique aussi large que possible, ce qui réduit les possibilités d'épidémies catastrophiques, comme celles qui ont ravagé les peupliers;

- l'aménagement sylvicultural comprend des éclaircies précoces et massives et les révolutions sont courtes, si bien qu'en cas d'épidémie, la récolte peut être avancée au prix d'une perte minime et le site touché peut être replanté au moyen d'une autre provenance ou espèce. Dans le passé, les épidémies - comme les attaques du siricidé *Sirex* - ont été liées à l'absence d'aménagement sylvicultural;

- des recherches portant sur d'autres essences potentiellement adaptées à la Nouvelle-Zélande sont en cours et des essences de rechange ont été mises à l'essai et pourraient être introduites rapidement dans le programme de plantation en cas de nécessité.

En résumé, la Nouvelle-Zélande, ayant sélectionné, dans le but de produire du bois et de protéger les bassins versants, une espèce bien adaptée aux sites disponibles et ayant analysé soigneusement les risques, a décidé qu'il était plus avantageux de continuer d'investir dans une espèce qui s'est avérée extrêmement rentable plutôt que de réduire les profits en investissant dans une gamme d'essences à plus faible rendement.

L'analyse des risques qui a été entreprise à Aracruz (Brésil) a abouti à une conclusion analogue. L'objectif est d'obtenir des rendements élevés sur une révolution courte. D'une part, les risques liés à la réduction de la diversité spécifique et

intraspécifique des populations productives sont considérés comme faibles et la capacité de faire face aux "catastrophes" est bonne. D'autre part, la simplicité de l'aménagement des plantations monoclonales et les gains de rendement qu'elles procurent sont très intéressants. A condition de prendre des précautions, par exemple de conserver une large base génétique dans des populations de base parallèle, la réduction de la diversité spécifique et intraspécifique peut être justifiée.

De nombreux pays en développement souhaitent investir dans les plantations industrielles, mais ils ne possèdent ni les ressources requises pour entreprendre des recherches en vue de lutter contre les épidémies ni la connaissance approfondie d'une espèce, comme celle qu'ont les forestiers de Nouvelle-Zélande (*Pinus radiata)* ou d'Aracruz Cellulose (*Eucalyptus spp)*. Les pays en développement auraient intérêt à adopter une politique de répartition des risques en utilisant, dans des plantations industrielles à révolution courte, un mélange au sens large, constitué d'essences soigneusement harmonisées aux sites disponibles. Lorsque des cultures à révolution longue sont envisagées, les politiques de réduction des risques, basées sur une bonne adaptation des essences au site, et les politiques d'étalement des risques, basées sur l'utilisation de plus d'une essence, sont aussi importantes (sinon plus) que pour les cultures à révolution courte, et il est même possible d'établir des mélanges intimes si les circonstances le permettent; en d'autres termes, si l'on connaît assez bien la sylviculture des essences que l'on se propose d'utiliser, les objectifs peuvent être atteints ou d'autres avantages peuvent être identifiés. Lorsque l'objectif est l'aménagement d'un bassin versant ou la remise en état de terres dégradées, les mélanges sont souvent plus appropriés, surtout s'ils favorisent la croissance d'un sous-étage.

Conclusions sur l'économie

On a découvert peu d'informations ayant fait l'objet d'une évaluation complète sur les aspects économiques des plantations mélangées dans les régions tempérées ou tropicales. En théorie, l'établissement de plantations mixtes permet de garder des options ouvertes aussi longtemps que possible afin d'obtenir les meilleurs prix ou la meilleure gamme de produits. Si des mélanges, comme ceux de bouleaux et d'épicéas en Scandinavie, peuvent être obtenus pour un faible coût, des gains économiques peuvent s'ajouter aux éventuelles synergies des rendements, mais il semble que, dans les zones tropicales, l'établissement et l'entretien des forêts industrielles mixtes soient souvent coûteux. Toutefois, dans certains cas, les avantages non commerciaux associés à l'agrément ou à l'écologie sont considérés comme importants (voir ci-dessous).

Il arrive qu'un mélange ne soit, d'une manière générale, rentable ou souhaitable que s'il est possible d'exploiter une composante du mélange en début de révolution; c'est le cas de *Nauclea diderichii* cultivé en mélange avec des *méliacées* au Nigéria. L'expansion des débouchés locaux du petit bois ou d'autres produits (comme le rotin) favorisera les éclaircies; ainsi l'aménagement des peuplements plurispécifiques sera plus facile, car une plus large gamme d'essences pourra être envisagée pour les mélanges. Plus les espèces qui ont une valeur commerciale sont nombreuses, plus les mélanges deviennent intéressants sur le plan économique, bien que les opérations sylviculturales qui sont nécessaires pour dégager le peuplement principal ne puissent pas toujours avoir lieu au meilleur moment pour vendre les produits d'éclaircies.

La réussite économique et biologique des plantations mélangées dépend des disponibilités en ressources financières et en agents qualifiés, ainsi que du choix des essences qui doivent être bien adaptés aux sites, compatibles avec les autres composantes du mélange et répondre aux utilisations finales possibles.

On n'a considéré dans les paragraphes qui précèdent que l'effet des mélanges sur les rendements en produits ligneux. Or des essences peuvent être introduites dans les mélanges pour d'autres raisons - par exemple pour fournir du fourrage, des fruits ou des noix, ou pour les propriétés d'amélioration des sols de leurs feuilles, pour les bactéries fixatrices d'azote qui leur sont associées ou pour leur aspect esthétique. Toutes ces raisons sont valables et justifient la plantation de mélanges, mais les avantages sont difficiles à évaluer car habituellement les produits des plantations ne sont pas commercialisés sur les marchés.

8. CONCLUSIONS PRINCIPALES

Les plantations des régions tropicales et subtropicales

Les plantations peuvent compléter, sans jamais les remplacer totalement, la gamme de biens et de services que procurent les forêts naturelles. Les forêts artificielles sont souvent critiquées comme écosystèmes appauvris comprenant un nombre réduit d'espèces végétales et animales. Bien que certaines plantations soient établies dans le but précis de conserver les ressources génétiques d'une ou de quelques essences particulières et que la reconstitution d'écosystèmes ait été tentée à une échelle limitée, la plupart des plantations ne sont pas établies avec ces objectifs et (sauf si elles ont remplacé une forêt naturelle sur le même site), on doit se garder d'évaluer les avantages qu'elles apportent en les comparant directement à ceux des forêts naturelles. Il faut également souligner que la création de plantations à vocation de production, qui comporte souvent l'utilisation d'espèces pionnières à croissance rapide, ne doit pas empêcher d'effectuer des recherches et de mettre en valeur d'autres espèces locales; en outre, si un écosystème est modifié par l'établissement de forêts artificielles (ou de cultures agricoles), il faut veiller à conserver ailleurs des spécimens représentatifs de la flore et de la faune locales.

Les plantations forestières des zones tropicales et subtropicales contribuent à satisfaire les besoins des populations en produits forestiers dans une proportion supérieure à ce que leur superficie relativement modeste pourrait laisser prévoir, en fournissant non seulement des bois ronds industriels, mais aussi de nombreux autres biens et des services écologiques. La superficie sous forêts artificielles devrait augmenter considérablement, en particulier celles qui ne sont pas établies par le secteur public, mais par des collectivités et des particuliers; l'utilisation des plantations pour fixer le carbone en vue de réduire l'accumulation de bioxyde de carbone dans l'atmosphère suscite également beaucoup d'intérêt. La composition par essences a une importance considérable pour maintenir dans le temps les bienfaits de ces plantations.

Les mélanges d'essences peuvent être délibérés, mais ils peuvent aussi résulter de la régénération naturelle d'autres espèces ligneuses, dans des plantations monospécifiques. Il existe une vaste gamme de mélanges possibles, depuis les mélanges équiens simples composés de deux essences, jusqu'aux mélanges constitués de plusieurs essences qui caractérisent les plantations aménagées selon le régime du jardinage. La plantation d'essences différentes en blocs adjacents est aussi considérée comme un mélange. La plupart des forêts artificielles que l'on plante actuellement sont constituées d'une seule essence, mais les adversaires de ce système d'aménagement, qui le considèrent comme néfaste sur le plan écologique, semblent oublier qu'un grand nombre d'associations monospécifiques se forment naturellement. En fait, les espèces à croissance rapide les mieux adaptées pour produire du bois sur des révolutions courtes sont souvent celles qui caractérisent les premiers stades de la série de végétation, qui contiennent un petit nombre d'essences; il est donc possible qu'elles soient mal adaptées à la culture en peuplements mélangés.

Baisse des rendements en bois

La baisse des rendements en bois, constatée dans les plantations monospécifiques au cours de la deuxième révolution ou des suivantes, semble résulter d'une mauvaise adaptation de l'espèce au site plutôt que du fait que la plantation est pure. Néanmoins, des éléments nutritifs sont perdus au moment de la récolte, en particulier dans les plantations à révolution courte. Les placettes d'échantillonnage permanentes sont un moyen important de détecter une baisse de rendement, mais parallèlement les forestiers doivent éviter les pratiques sylvicoles qui risquent d'entraîner une perte de fertilité ou de matière organique. Une sylviculture appropriée peut aussi contribuer au recyclage des éléments nutritifs grâce à la décomposition rapide de la litière.

Importance du site et des objectifs

Les essences doivent être bien adaptées au site; des problèmes surgissent tôt ou tard lorsque les arbres sont plantés "hors site". Toutefois, il existe habituellement plusieurs espèces qui sont adaptées, sur le plan sylvicole, à chaque site; le choix est alors déterminé par les objectifs d'aménagement. Lorsque ceux-ci peuvent être atteints grâce à des méthodes d'aménagement extensif, ce qui est le cas pour l'aménagement des bassins versants, la remise en état de sites dégradés, les plantations d'agrément et parfois la production de fourrage pour le bétail, il est souvent avantageux d'utiliser des espèces biologiquement adaptées à la culture en peuplements mélangés et qui peuvent se compléter les unes les autres pour fournir une gamme de biens et de services écologiques. Si, au contraire, l'objectif est d'obtenir des rendements élevés et un produit uniforme, ce qui est le cas lorsque le produit est soumis à une transformation industrielle, il est probable que l'on obtiendra de meilleurs résultats en plantant une seule espèce pionnière à croissance rapide et à révolution courte.

Tous projets de plantations forestières comportent cependant des objectifs secondaires et des contraintes à la réalisation des objectifs principaux; ces contraintes sont par exemple la recherche de rendements soutenus et le maintien de la fertilité du site. En raison de ces objectifs ou contraintes secondaires, à respecter pour garantir la viabilité de l'écosystème, les politiques d'aménagement peuvent conduire à écarter les plantations monospécifiques; les aménagistes décideront par exemple de créer des mélanges en parquets, de cultiver en alternance différentes espèces, ou de pratiquer des éclaircies importantes de façon à encourager le développement d'un sous-étage d'arbustes et d'herbes.

Risques

Un mélange d'essences offre souvent une assurance contre le risque de perte totale de la récolte à la suite d'une calamité ou d'une modification des marchés ou de la demande. Lorsque l'on établit des mélanges afin de réduire le risque global dans des plantations aménagées intensivement, les profits sont souvent réduits, soit parce qu'une espèce précieuse est partiellement remplacée par une essence de moindre valeur, soit parce que le coût de l'aménagement est plus élevé. Les plantations monospécifiques et, à plus forte raison, les plantations monoclonales sont souvent associées à une politique du type "intrant élevé/ production élevée" qui comporte souvent des risques élevés. Une

politique de ce type peut être justifiée à condition que les responsables (gouvernement, communauté, personne physique ou morale) soient en mesure d'évaluer les risques, d'affecter des ressources pour surmonter les problèmes potentiels et d'entreprendre des recherches pour les prévoir. La réussite dépend aussi de la longueur de la révolution. Des projets de plantations monospécifiques ont bien réussi dans de nombreux pays, par exemple en Nouvelle-Zélande, en Afrique du Sud, dans certains Etats d'Australie, au Brésil, au Chili et au Congo, mais lorsqu'une organisation n'est pas en mesure de garantir des ressources régulières, il est préférable d'étaler les risques, ne serait-ce qu'en utilisant des mélanges au sens large.

Bien que les mélanges aient généralement été considérés comme une assurance contre les risques, dans certains cas la diversité spécifique ne s'est pas avérée efficace pour lutter contre une maladie, par exemple la flétrissure du châtaignier aux Etats-Unis ou la flétrissure due à *Dothistroma* dans les peuplements de *P. radiata* en Afrique de l'Est. On a soutenu que les mélanges peuvent même accroître les risques de maladies lorsqu'ils fournissent un hôte alternant. On connaît mal les mécanismes de propagation et de maîtrise des parasites et des maladies dans un écosystème forestier; les mélanges qui n'ont pas fait leurs preuves et qui sont organisés sans discernement ont peu de chances d'être efficaces pour lutter contre les ravageurs et les maladies.

Il est important de surveiller la croissance, les rendements et la fertilité du sol, mais il est difficile de suivre la fertilité et la tendance au déclin des rendements peut être masquée par des progrès de l'amélioration génétique et des techniques sylvicoles, et parfois elle n'est détectée qu'à la révolution suivante. On a déjà souligné la nécessité d'adopter des pratiques d'aménagement rationnelles afin de maintenir la fertilité du sol et l'utilisation des mélanges peut être utile à cet égard.

Synergie

On trouve, dans les rapports, des exemples de mélanges qui renforcent non seulement le rendement total, mais aussi celui de composantes spécifiques précieuses d'un peuplement. En Scandinavie, cet "effet de mélange" est souvent faible, mais il semblerait que l'utilisation d'espèces co-dominantes fixatrices d'azote puisse accroître les rendements. Il est intéressant de rechercher de telles synergies, mais elles ne peuvent se produire que sur un nombre limité de sites et les conditions dans lesquelles elles apparaissent n'ont guère été étudiées dans les zones tropicales.

Types de plantations

a) Plantations industrielles

L'aménagement vise à réduire la diversité au sein de la population productive afin de maximiser la croissance des essences de valeur et d'obtenir un produit uniforme pour l'industrie. Il existe des écosystèmes naturels qui sont constitués d'une ou d'un petit nombre d'essences, mais dans une plantation monospécifique, le risque d'instabilité s'accroît, bien que ce type de forêt soit plus facile à traiter que les plantations plurispécifiques en cas d'attaques de ravageurs ou de maladies.

L'efficacité des mélanges pour lutter contre les attaques de ravageurs et de maladies est variable et incertaine. Les mécanismes d'action sont souvent complexes et le degré de mélange requis fait qu'il est souvent irrationnel sur le plan économique de cultiver une essence vulnérable. Il est admis que quelques bois tropicaux précieux, notamment certains acajous, ne peuvent avoir une bonne croissance qu'à l'ombre, ce qui aide à maîtriser les attaques de *Hypsipyla*. Habituellement la meilleure façon de fournir de l'ombre est d'introduire une autre essence et les plantations mixtes d'acajou ont bien réussi sur le plan sylvicole dans de nombreuses régions des zones tropicales.

L'aménagement des plantations mixtes, et en particulier des mélanges d'espèces dominantes et co-dominantes, requiert des connaissances plus grandes que celui des plantations monospécifiques. La mauvaise programmation des interventions sylvicoles ou l'utilisation d'espèces incompatibles peuvent entraîner une malformation des tiges ou même un retour naturel à un peuplement monospécifique.

Etant donné que dans les plantations industrielles des zones tropicales, les produits de la coupe finale sont souvent destinés au marché d'exportation, les mélanges sont souvent plus rentables, si un peuplement de protection ou "de remplissage" peut être récolté en début de révolution. Mais pour que cela soit possible, il faut qu'il existe un marché pour les produits de petite taille ou pour les produits non ligneux du peuplement de protection.

La baisse de productivité de la deuxième révolution est un risque réel sur les sites peu fertiles mais qui ne doit pas être écarté sur les sites fertiles. Il peut être maîtrisé grâce à une bonne pratique sylvicole qui peut comprendre l'établissement de mélanges temporaires ou permanents afin de favoriser la décomposition de la litière, de façon à encourager le recyclage des éléments nutritifs et à accroître la teneur en matière organique de la couche arable.

b) Plantations aménagées moins intensivement

Dans les plantations à bois de feu et à perches, l'uniformité du produit est habituellement moins importante et ces plantations se prêtent souvent mieux à l'utilisation de techniques de récolte et d'extraction non mécanisées. De ce fait, les facteurs qui entravent le recours aux mélanges dans les plantations industrielles sont moins puissants et on peut donc décider d'inclure des mélanges afin de réduire les risques ou d'améliorer la fertilité du sol.

Les plantations fourragères doivent généralement être mélangées afin de fournir une succession de feuillage vert pendant toute l'année, en particulier pendant la saison sèche. Il est également préférable que les brise-vents soient constitués de plusieurs espèces, afin d'offrir une protection différenciée, en niveau comme en intensité.

Il peut être avantageux sur le plan économique de cultiver d'autres essences ligneuses en association avec l'espèce principale; on a vu dans cette étude les exemples du rotin et du santal.

c) Plantations destinées à améliorer le site

Les plantations établies dans le but d'améliorer le site - aménagement des bassins versants, régénération des sols dégradés et amélioration de l'environnement - se prêtent habituellement bien aux mélanges. Les sites présentent souvent des problèmes particuliers, que l'on connaît mal, et un mélange permet de s'assurer contre l'échec, même si la succession naturelle tend souvent de toute façon à limiter la diversité. Il est utile de connaître la succession écologique naturelle du site considéré.

Conservation de la faune et de la flore sauvages

La plupart des grandes plantations ont un seul grand objectif (par exemple la production de bois) mais aussi d'autres objectifs secondaires ou même parfois des contraintes qui s'opposent à la réalisation de l'objectif principal (conservation des sols, protection des bassins versants ou fourniture d'avantages sociaux directs). Elles ont aussi parfois des objectifs de conservation de la faune et de la flore sauvages.

Le maintien d'habitats adaptés, en vue de conserver les ressources génétiques et de produire des espèces animales ou végétales sauvages ayant une valeur commerciale ou de subsistance, est le principal objectif de conservation de la faune et de la flore sauvages dans les plantations forestières. La contribution des plantations forestières à cet objectif sera considérablement renforcée par une bonne planification et une bonne conception de l'aménagement avant la plantation, et par une bonne organisation des opérations journalières une fois que la plantation sera établie. Les programmes de plantation doivent être considérés dans le contexte plus vaste de l'utilisation des sols, et chaque programme devrait comprendre des mesures telles que peuplements-tampons, couloirs, conservation d'îlots de forêt naturelle à l'intérieur des plantations et incitations aux populations locales, qui favoriseront la conservation de la faune et de la flore sylvestres.

Plus l'aménagement d'une plantation encourage la diversité végétale générale et plus la plantation ressemble à une forêt naturelle, plus elle contribue à la conservation de la faune et de la flore sauvages. Des mélanges de classes d'âge et d'espèces appropriées, ainsi que la conservation d'une partie de la forêt naturelle favorisent généralement cette conservation. Les populations de grands herbivores "généralistes" peuvent atteindre une densité élevée dans les endroits où la plantation est structurellement diversifiée ou même dans les jeunes plantations ou sur des sites ayant subi une coupe rase.

9. RECOMMANDATIONS

On a examiné attentivement toute la documentation comparant les avantages et les inconvénients des plantations mélangées ou pures. De nombreux textes abordent la question mais peu de documents présentent des comparaisons directes entre les plantations monospécifiques et celles qui sont composées de plus d'une essence. La présente section contient quelques recommandations à l'attention des agents forestiers, des chercheurs et des planificateurs qui s'intéressent au développement des plantations forestières dans les zones tropicales et subtropicales; ces recommandations se fondent sur les faits observés mais tiennent aussi compte des lacunes des connaissances actuelles quant au comportement des espèces cultivées en peuplements purs et mixtes.

Objectifs des plantations

Il est recommandé lorsque l'on établit des plantations d'identifier avec précision les objectifs spécifiques que l'on poursuit, afin de pouvoir évaluer leurs coûts et leurs avantages de façon complète. Ce n'est que dans ces conditions que l'on pourra choisir entre une composition monospécifique ou plurispécifique.

Bien adapter les essences et les pratiques d'aménagement au site

L'une des principales recommandations, qui ressort de la présente étude, est qu'il faut veiller à l'adaptation non seulement des essences et des provenances mais aussi des pratiques d'aménagement au site, afin que la croissance et le rendement des produits recherchés soient durables. Cette recommandation aura encore plus d'importance lorsque les plantations seront étendues, dans les régions tropicales et subtropicales, à des sites qui sont marginaux pour la croissance des espèces forestières traditionnelles.

Il est recommandé de définir des principes directeurs de plantation, formulés aux niveaux national et régional sous forme de réglementations forestières, afin que les plantations bénéficient de bonnes pratiques sylvicoles. Des principes directeurs de ce type ont été définis, par exemple, dans le Queensland (Kanowski et Savill 1990) ainsi que par l'Organisation internationale des bois tropicaux, en collaboration avec la FAO. D'autres organisations ont aussi préparé des principes directeurs pour attirer l'attention sur la "meilleure pratique" à adopter pour la planification, l'établissement et l'aménagement des plantations.

Situations où les mélanges sont appropriés

Dans certaines situations, il est recommandé à l'aménagiste ou au planificateur forestier d'envisager l'utilisation de mélanges d'un type quelconque. Les mélanges sont notamment conseillés dans les situations suivantes:

- forêts communautaires où le fait de cultiver plus d'une essence aide à satisfaire les besoins divers en fournissant plusieurs produits finaux et permet de s'assurer contre l'échec d'une essence particulière;

- pare-feux dans les plantations pures, soit en lignes pour créer une discontinuité, soit en mélange intime pour introduire des espèces moins inflammables;

- peuplements de protection, en particulier pour réduire les attaques d'insectes; ainsi le mélange de *Nauclea diderichii* et de *méliacées* réduit l'incidence de *Hypsipila;*

- zones dans lesquelles la conservation de la faune et de la flore sauvages est un objectif déclaré: au lieu de chercher à limiter au minimum l'impact négatif des plantations artificielles sur la faune et la flore sauvages, on établit des plantations mélangées afin de créer un habitat adapté à cette faune et à cette flore.

Et aussi, bien qu'il ne s'agisse pas à proprement parler de mélanges d'arbres;

- encouragement d'un sous-étage d'arbustes et de végétation herbacée, en pratiquant des éclaircies régulières et en évitant de conserver un matériel sur pied excessif; il s'agit en fait de la bonne pratique sylvicole recommandée précédemment;

- foresterie clonale: sur la superficie boisée chaque année, il est conseillé d'établir un mélange de blocs de clones et d'introduire régulièrement de nouveaux clones, issus d'un programme permanent d'amélioration génétique par reproduction sexuée (y compris hybridation).

Suivi de la croissance

On dispose de peu d'informations sur la croissance des peuplements purs dans une gamme complète de sites tropicaux; quant aux informations sur les peuplements mélangés, elles sont négligeables. Il est recommandé aux pays qui ont des programmes importants de plantations forestières (dont des plantations communautaires) de mettre en place un réseau de placettes d'échantillonnage permanentes à l'intérieur des plantations. Ces placettes doivent être conservées sur plusieurs révolutions et sont nécessaires pour toutes les essences importantes. Elles doivent être établies sur une gamme complète de stations forestières potentielles. Les placettes d'échantillonnage permanentes doivent être complétées par des parcelles sur lesquelles, non seulement la même essence sera replantée au cours des révolutions successives mais en outre, la semence proviendra de la même source que dans la plantation originale, afin de réduire au minimum les erreurs d'expérimentation. Le système des révolutions courtes, qui est adopté pour de nombreuses essences dans les Tropiques, rend cette pratique possible. Les placettes permettront aussi de dériver des modèles de rendement.

Recherche

Il n'existe pratiquement aucune étude expérimentale sur les avantages et les limites des forêts artificielles mélangées ou pures dans les régions tropicales et subtropicales, en ce qui concerne leur établissement, leur croissance ou la commercialisation de leurs produits. Il est recommandé aux institutions de recherche nationales, régionales et internationales d'inscrire des études de ce type dans leurs programmes de recherche sur les plantations forestières. Les recherches devraient notamment être axées sur les domaines ci-après:

- effet sur la fertilité et sur le rendement à long terme, et en particulier capacité des essences fixatrices d'azote d'accroître les rendements d'un peuplement mélangé, effet des opérations de récolte sur l'équilibre nutritif du sol et rendement des révolutions suivantes;

- identification de nouvelles espèces et provenances d'arbres et d'arbustes à utiliser dans les mélanges, les études portant non seulement sur leurs rendements en bois mais aussi sur les produits non ligneux et les autres avantages qu'elles procurent. Des recherches peuvent s'avérer nécessaires en vue de créer des marchés pour les produits des espèces peu connues;

- compatibilité entre les différentes essences, qu'il s'agisse d'arbres ou d'arbustes lorsqu'elles poussent en mélange; la recherche doit s'intéresser en particulier à l'existence d'une synergie entre les espèces et aux méthodes d'aménagement des mélanges;

- potentiel des mélanges pour protéger la forêt des insectes, des maladies ou du feu, et en particulier mécanismes de propagation des maladies et des insectes ravageurs dans les écosystèmes forestiers et processus naturels de lutte.

Analyse économique

Si les données sur l'économie des plantations tropicales sont insuffisantes d'une manière générale, celles sur l'économie des plantations mixtes sont pratiquement inexistantes. Il se peut que des données sur les coûts et les recettes soient disponibles, mais rien n'indique que ces chiffres aient été collationnés et analysés. Il est recommandé que les données sur les coûts et avantages des programmes de foresterie artificielle soient collectées de façon à permettre une comparaison valable entre les plantations mixtes et les plantations pures, surtout sur plusieurs révolutions. Il faudrait tenter de quantifier les autres avantages que procurent les plantations, en plus des produits ligneux.

La présente étude a surtout insisté sur les effets biologiques des plantations pures et mixtes, mais il peut y avoir des raisons sociales ou culturelles importantes d'inclure dans les plantations des essences autres que celles qui sont traditionnellement plantées pour obtenir des produits ligneux. Il est recommandé de considérer ces facteurs lorsque l'on évalue les diverses options possibles de composition des plantations.

ANNEXE 1

BIBLIOGRAPHIE ANNOTEE

Les références ci-après sont loin d'être exhaustives car la question des plantations mixtes est abordée dans de très nombreux documents. Les notes ne se réfèrent qu'aux aspects de la publication qui intéressent particulièrement les plantations mélangées.

Adlard, P.G. 1978. Tropical forests - comparisons and contrasts. In: The ecology of even-aged forest plantations. Proceedings of the meeting of Division I, IUFRO, Edinburgh, sept. 1978. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge (UK), 1979.
Tropiques: Aménagement. Sols.
La production primaire nette d'une forêt dense humide peut être utilisée pour maintenir un équilibre dynamique. Les espèces fixatrices d'azote peuvent être particulièrement importantes dans ces forêts. Les températures élevées et les précipitations intenses augmentent le lessivage dans les zones tropicales. L'apport d'engrais est coûteux et peut en outre provoquer le lessivage des sols et endommager les bactéries et les mycorrhizes azotées.

Adlard, P.G., 1990. Procedures for Monitoring Tree Growth and Site Change. Tropical Forestry Papers 23, Oxford Forestry Institute (UK).
Général: Aménagement, recherche
Manuel à consulter pour la conception et l'installation de placettes d'échantillonnage permanentes.

Agarwal, S.C., Chinnamani, S. and Rege, N.D. 1961. Mixed plantations for effective soil conservation in the Nilgiris. Indian Forester 87 (1): 26-33.
Inde: Sols,aménagement
La régénération naturelle d'*Acacia molissima* sous *Eucalyptus globulus* semble bonne. Le mélange a une valeur de protection plus importante que l'une des deux espèces isolée.

Agestam, E. 1991. *Blandskogens produktion.* (Production des peuplements mélangés). Skog och Forskning 2/91: 44-51.
Scandinavie: Rendement
Etude des mélanges. Bien que les mélanges présentent des avantages théoriques, il est difficile de démontrer des améliorations concrètes significatives.

Alphen de Veer, F.J. van 1950. *Loofhout in Pinus-culturen.* (Les espèces feuillues dans les plantations de pins). Inédit. Présenté dans Indian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 590
Indonésie: Aménagement
Mise en garde contre les monocultures. Les mélanges avec des espèces feuillues sont recommandés afin de réduire les risques.

Alphen de Veer, F.J. van 1950. *Loofhoutmenging Pinus Takengon.* (Les mélanges de pins et d'espèces feuillues à Takengon, Aceh.) Manuscrit. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 597.
Indonésie: Aménagement.
Un écartement large et un sous-étage d'espèces feuillues sont recommandés. Les feuillus peuvent être plantés après la première éclaircie. Un certain nombre d'essences adaptées sont indiquées.

Alrasyid, H. 1985. *Percobaan penanaman kayu eboni (Diospyros celebica) di bawa tekagan jati di Jawa.* (Plantation expérimentale d'ébéniers (*Diospyros celebica*), sous un peuplement de tecks à Java). Buletin Penelitian Hutan N° 464: 23-37
Indonésie: Aménagement
Introduction expérimentale d'ébéniers en sous-étage dans des plantations de teck. On conclut que, sous un peuplement de tecks, l'ébénier a une croissance en hauteur réduite, dans une région à climat de mousson.

Althen, F.W von 1968. Incompatibility of black walnut and red pine. Bimonthly Research Notes, Department of Forestry, Canada. 2.
Canada: Aménagement. Aspects écologiques.
Expérimentation visant à identifier les effets du juglone (substance excrétée par les racines des noyers) sur les pins rouges d'Amérique. On a constaté que ces effets sont très mauvais, parfois mortels.

Althen, F.W. von 1974. Successful establishment of sugar maple in a Scots pine plantation. Information Report, Great Lakes Forest Research Centre, Canada, No. 0-X-208.
Canada: Aménagement.
L'érable à sucre pousse mal sur les terres agricoles abandonnées, en peuplement pur. Des essais de plantation sous *Pinus sylvestris* ont donné des résultats prometteurs.

Ananthia Padmanabba, H.S., Nagareni, H.C. and Rai, S.N. 1988. Influence of host plants on growth of Sandal. Myforest 24 (2):154-160.
Inde: Aménagement
Des hôtes adaptés au *Santalum album* sont suggérés; les suggestions s'appuient sur des cultures en pots et une analyse des feuilles (teneur en Mg, N, P et K).

Anderson, M.L. 1953. La plantation par bouquets espacés. Unasylva 7: 63-72
Tropiques: Aménagement
Description d'un système de plantation par bouquets.

Andersson, S.O. 1985. Treatment of young mixed stands with birches and conifers. In: Broadleaves in Boreal Sylviculture - An Obstacle or an Asset? Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Report N° 14.
Suède: Aménagement.
Le maintien de feuillus comme peuplements de protection offre des avantages qui compensent largement les pertes de croissance.

Andrasko, K. 1990. Climate change and global forests: current knowledge of potential effects, adaptation and mitigation options. FO: MISC/90/7, FAO, Rome, pp. 60.
Général: Climat
Etude des facteurs qui sont à l'origine des changements climatiques et effets de ceux-ci sur les forêts.

Anon 1974. Supplementary planting in logged beech forest. What's New in Forest Research 10. Forest Research Institute, Rotorua, New Zealand.
Nouvelle-Zélande: Aménagement
Introdution d'Eucalyptus dans une forêt de *Podocarpus-Nothofagus* avec mélange de pins Rimu (*Dacrydium cupressinum*) et de hêtres.

Applegate, G.B. 1991. Communication personnelle.

Applegate, G.B. and Bragg, A.L. 1988. Agroforestry tree species for north Queensland. Paper presented at Conference on Reforestation on the North Coast of New South Wales, Queensland Forest Department.
Australie: Aménagement
Etude comparée de la croissance de *Toona australiensis,* cultivé en peuplement pur ou en mélange avec *Grevillea robusta.* Les meilleurs résultats sont obtenus en peuplement pur ou sous un peuplement de protection d'un an. Il est important de dépresser le peuplement de protection.

Applegate, G.B. and Gilmour, D.A. 1987. Operational Experiences in Forest Management Development in the Hills of Nepal. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD). Occasional Paper N° 6, Kathmandu, pp. 40.
Népal: Aménagement, rendement.
Classification des forêts et options d'aménagement, compte tenu du peuplement initial, à utiliser dans des programmes d'activité à l'échelle des villages.

Applegate, G.B. et Gilmour, D.A. 1988. Biomass and productivity estimates for community forest management: a case study from the hills of Nepal - I. Biomass and productivity of Chir pine (*Pinus roxburghii* Sargent) plantations. Biomass 17: 115-136.
Népal: Rendement
Equations de régression pour prévoir les classes de fertilité$_{(20)}$ d'après la longueur de l'entre-noeuds, et prévoir le poids de la tige, des branches et du feuillage, d'après le diamètre du pin Emodi.

Applegate, G.B. et al 1990a. Sandalwood in the Pacific: a state-of-knowledge synthesis and summary from the April 1990 Symposium. In Proceedings of the Symposium on Sandalwood in the Pacific, April 1990, Honolulu, Hawaii. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-122. pp. 1-11.
Tropiques: Aménagement, écologie, utilisation
Synthèse des documents présentés au colloque.

Applegate, G.B., Davis, A.G.W. et Annable, P.A. 1990b. Managing Sandalwood for conservation in North Queensland. In Proceedings of the Symposium on Sandalwood in the Pacific, April 1990, Honolulu, Hawaii. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-122. pp. 12-18
Australie: aménagement
Description générale du santal dans le nord du Queensland.

Aracruz Celulose S.A. 1988. Technology, Social Progress and the Environment.
Dépliant décrivant les activités de la compagnie.
Brésil: aménagement
Vingt pour cent de la superficie est sous forêts naturelles. Des arbres fruitiers sont plantés pour encourager les oiseaux prédateurs.

Aubreville, A. 1953. Une visite aux plantations de limbo du Moyen-Congo. Bois et Forêts des Tropiques 27: 3-8
Congo: Aménagement
Des expériences ont démontré que *Terminalia superba* peut être planté en bandes largement espacées, à raison d'un relativement petit nombre de jeunes plants par hectare, et continuer à produire du bois de bonne qualité.

Auclair, D. 1978. La sylviculture des forêts mélangées. Etude bibliographique. Document Centre de recherches forestières d'Orléans N° 78/30.

Etude: Aménagement
Un examen de la documentation portant sur la sylviculture des peuplements mélangés.

Babbar, L.I. et Ewel, J.J. 1989. Decomposicion del follaje en diversos ecosistemas sucesionales tropicales. (Décomposition du feuillage dans les écosystèmes tropicaux de la série de végétation secondaire.) Biotropica 21 (1): 21-29.
Costa-Rica: Sols
Dans une plantation pure, les feuilles de *Cordia alliodora* se sont décomposées lentement (22 pour cent de la masse et <50 pour cent de tous les éléments, P et K exceptés, en 15 semaines, contre 50 pour cent de la masse et des éléments, N et S exceptés, en 6 semaines dans un peuplement simulant un stade de la succession riche en essences).

Bakhoven, A.C. 1930. Vul-drijf en dikkingshout in wildhoutbergculturen, dan wel, de in de bergwildhoutbergculturen in te brengen houtsoorten vor blijvend onderbestand en ondergroei. (Essences auxiliaires, de protection et de couverture des sols à introduire dans les plantations des montagnes ne contenant pas de tecks, ou destinées à former un sous-étage d'arbres permanent et un sous-bois.) Tectona 23: 558-569, 569-581. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982, Abstract 591.
Indonésie: Aménagement. Sols
Principes de sylviculture pour l'établissement de plantations mélangées à couvert vertical, qui sont considérées comme plus avantageuses sur le plan hydrologique.

Ball, J.B. 1979. Plantations. Technical Report N° 3. Forestry Development Project, Nigéria. FAO, Rome
Nigéria: Mélanges de *Nauclea diderichii* et de méliacées
Modèles de croissance et calcul du taux de rentabilité interne.

Bandara, P.D.M.G.D. 1990. Insects and diseases of forest plantations in Sri Lanka. In Pests and Diseases of Forest Plantations. Hutacharen, C., MacDicken, K.G., Ivory M.H. and Nair, K.S.S. eds. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok.
Sri Lanka: Ravageurs et maladies
Signale les ravageurs et les maladies qui affectent les plantations forestières et recense les superficies plantées par essence (total, 180 000 ha).

Barnes, R.D. 1991. Communication personnelle

Barnes, R.D. et Mullin, L.J. 1976. Selection of forest tree species in Rhodesia. South African Forestry Journal 98: 16-19.
Afrique australe: Aménagement. Aspects écologiques
Les échecs des plantations arborées en Afrique australe sont souvent dus au fait que les essences sont établies hors de leur aire d'extension naturelle.

Basu, B.K. and Aparajita, M. 1987. Effect of Eucalyptus monocultures on the soils of southwest Bengal, Mudnapore district, India.
Inde: Sols
Analyse des sols sous trois plantations d'Eucalyptus hybrides (14, 10 et 4 ans - diamètre 19,1, 9,5, 6,8 cm). Le pH est passé de 5,2 à 5,7 à mesure que l'âge augmentait; la teneur organique s'est accrue (grâce aux mesures de protection contre le feu), de même que la teneur en N, en Ca et en K échangeables, et les concentrations totales de MgO et K_2O.

Bateman, I. 1991. Placing money values on the unpriced benefits of forestry. Quarterly Journal of Forestry (UK) 85 (3): 152-165.
Royaume-Uni: Economie
Analyse coûts-avantages de la Commission des forêts du Royaume Uni.

Bates, A.L. et Thor, E. 1970. Mixed-species plantations: composition and growth as related to soil/site characteristics. Journal of Forestry 68 (4): 234-236.
Etats-Unis: Rendement
Des forêts pures de *Pinus echinata* ont été comparées à des mélanges de *Pinus strobus* et de *Liriodendron tulipifera* dans des peuplements âgés de 25 ans. Aucune amélioration de la croissance n'a été constatée dans les mélanges.

Becking, J.H. 1928. De djaticultur op Java. Een verlijkend onderzoek naar de uitkomsten van verschillende verjongingsmethoden van der djati op Java. (La culture du teck à Java. Etude comparative sur les résultats de différentes méthodes de régénération du teck à Java.) Meded. Pv.b.H. 22, Thèse, Université d'agriculture, Pays-Bas. Présenté dans Indian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 714.
Indonésie: Aménagement
Comparaison entre l'utilisation du système "Taungya" pour la régénération du teck et la régénération par rejets de souche. Les meilleurs résultats sont obtenus par la méthode Taungya avec des plantations intercalaires de *Leucaena*.

Bell, T.I.W. 1973. Erosion in the Trinidad teak plantations. Commonwealth Forestry Review 52 (3): 223-233.
Trinidad: Sols. Aménagement
Des mesures comparatives des pertes de sol, dans des plantations de teck âgées de 10 et de 13 ans et une forêt naturelle, ont montré que la perte était de 2,5 à 9 fois supérieure sous le teck. Jusqu'en 1919, le teck était cultivé en peuplements mélangés à Trinidad.

Benites, J.R. 1990. Agroforestry systems with potential for acid soils of the humid tropics of Latin America and the Caribbean. Forest Ecology and Management 36: 81-101.
Amérique du Sud et Caraïbes: Sols
Gmelina arborea et quelques autres essences peuvent accroître considérablement la teneur de la couche arable en Ca et Mg, mais le K échangeable peut tomber à des concentrations très faibles et déclencher des carences.

Bhatia, N. et Promila Kapoor. 1984. Neighbour interactions between *Leucaena leucocephala* et *Acacia nilotica* in Punjab. Leucaena Research Reports 5: 18-19.
Inde: Rendement
L. leucocephala et *A. nilotica* ont été mélangées à différents niveaux. D'après les observations effectuées durant les 30 premières semaines, ce mélange s'avère très prometteur.

Binggeli, P. et Hamilton, A.C. 1990. Tree species invasion and sustainable forestry in the East Usambaras. In Research for Conservation of Tanzanian Catchment Forests, ed. Hedberg, I. and Persson, E., Uppsala, Sweden.
Tanzanie: Aménagement, écologie
Description de l'invasion des forêts naturelles par des espèces exotiques et des mesures nécessaires pour régénérer les forêts.

Binkley, D. 1983. Ecosystem production in Douglas-fir plantations: interaction of red alder and site fertility. Forest Ecology and Management 5 (3): 215-227.

Etats-Unis: Sols
Sur un site pauvre en azote, l'aune d'Oregon a accru le diamètre moyen du sapin de Douglas, mais pas sa surface terrière; la biomasse totale (aune compris) a été multipliée par 2,5. L'azote foliaire a augmenté. Sur le site riche en azote, l'aune d'Oregon a réduit le diamètre et la surface terrière du sapin de Douglas.

Binkley, D. 1984. Importance of size-density relationship in mixes stands of Douglas fir and red alder. Forest Ecology and Management 9 (2). 80-85
Canada: Rendements, sols
Des couples de placettes constituées de sapins de Douglas ou d'un mélange sapins de Douglas/aunes d'Oregon ont été comparés. La mortalité a été plus élevée dans les peuplements mélangés sur les sites fertiles. Il semble que des ressources sous-utilisées puissent être assimilées par les aulnes sur les sols peu fertiles.

Binkley, D. 1990. Mixtures of N2-fixing and non-N2-fixing tree species. In Ecology of Mixed Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO div. S2.01 Symposium.
Forêts tempérées: Sols
Les effets positifs ne peuvent se produire sur les sites pauvres en azote que si les espèces fixatrices d'azote sont dominantes ou co-dominantes. L'augmentation de la croissance peut entraîner un accroissement de la demande en éléments nutritifs. Dans ce cas, le rythme de recyclage des nutriments peut être trop lent pour que le taux de croissance soit maintenu.

Binkley, D. et Greene, S. 1983. Production in mixtures of conifers and red alder: the importance of site fertility and stand age. General Technical Report, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, US Dept. of Agriculture Forest Service 163: 112-117.
Etats-Unis: Sols
Sur des sites peu fertiles, les peuplements mélangés d'aunes et de conifères ont accru les taux de production de l'écosystème. On a observé une amélioration de la production de conifères âgés de plus de 30 ans. Sur les sites fertiles, la productivité des peuplements mélangés n'a pas été supérieure à celle des peuplements purs et la production de conifères a été réduite.

Birot, Y. 1991. Boisement et reboisement. Mémoire général, Thème 13, dixième Congrès forestier mondial, Paris, 1991. Actes Vol. 5: 9-19.
Monde: étude générale comprenant des exemples d'utilisation de mélanges.

Bjorkdahl, G. et Eriksson, H. 1989 Effects of crown decline on increment in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Kunst.) in southern Sweden. Medd. Norsk. Inst. Skogforst 42 (1): 19-36.
Suède: Maladies, rendement
Rapport sur l'effet de l'affaiblissement des cimes sur les rendements.

Boardman, R. 1978. Productivity under successive rotations of Radiata pine. Australian Forestry 41 (3): 177-179.
Australie: Rendement
Le déclin de productivité de la deuxième révolution a été relié à la fertilité du site durant la première révolution. Il est important de stimuler la croissance des jeunes peuplements.

Boardman, R. 1982. Use of balanced fertilizers to produce acceptable growth rates in *Pinus radiata* on marginal sites in South Australia. In: IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity, Washington, 323-332.

Australie: Sols, aménagement.
Analyse des stratégies d'enracinement. La baisse de rendement est corrigée par une action sur la teneur en matière organique du sol, qui est la principale source d'échanges de base. L'insuffisance de matière organique entraîne la compaction du sol. L'accumulation de litière doit être évitée. L'application progressive d'engrais convient bien à *Pinus radiata.*

Boardman, R. 1988. Living on the edge - the development of silviculture in South Australia pine plantations. Australian Forestry 51 (3): 135-156.
Australie: Aménagement
Historique de la sylviculture en Australie méridionale.

Boardman, R. 1990. The use of species mixtures in plantations for rehabilitation purposes in the winter rainfall areas of South Australia. In Ecology of Mixed Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO Div S2.01 Symposium.
Australie: Aménagement.
Analyse de la compatibilité entre les espèces cultivées en mélanges, d'après les résultats de plantations par groupes espacés d'eucalyptus et d'après des essais d'espacement entre les *P. radiata* pour produire des modèles de vigueur. Les mélanges sont actuellement utilisés dans les périmètres d'effluents.

Boardman, R. 1991, Communication personnelle
Australie: Aménagement
Dans une plantation de *P. radiata,* le taux de minéralisation de l'azote est plus faible que dans une forêt claire naturelle.

Bond, G. 1983. Taxonomy and distribution of non-legume N-fixing systems.
In: Biological Nitrogen Fixation in forest ecosystems: Foundations and applications. J.C. Gordon and C.T. Wheeler eds. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk publishers.
Général: Sols
Recense les genres qui comprennent des espèces porteuses de nodules du type aulne.

Bossut, P. 1988. Premiers résultats des plantations d'acacias australiens. AFRI (Togo), CTFT, inédit.
Togo: Rendement. Sols.
Les mélanges en layons établis en 1982-83 pour améliorer des sites qui n'étaient pas appropriés aux plantations pures d'eucalyptus sont recensés. En moyenne, l'acacia a produit deux fois plus de bois que l'eucalyptus.

Boyce, J.S. 1954. Forest plantation protection against disease and insect pests.
FAO Forestry Development Paper 3 pp. 41.
Général: Ravageurs et maladies
Etude générale des problèmes de ravageurs et de maladies

Brandis, D. 1901. Pure forests and mixed forests. Transactions of the Royal Scottish Arboricultural Society.
Allemagne: Aménagement.
Les mélanges pins/acacias et pins/hêtres sont moins exposés aux attaques de nonnes (*Liparis monarcha).* Les mélanges pins/hêtres et mélèzes/hêtres améliorent la structure du sol. En ce qui concerne les mélanges chênes/hêtres du Spessart, les hêtres sont abattus tôt pour être livrés aux verreries, ce qui permet aux chênes de se développer.

Brown, A.H.F. 1990. Functioning of mixed species stands: the Gisburn experiment in NW England. In Ecology of Mixed Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO Div S2.01 Symposium.
Royaume-Uni: Sols
Les mélanges peuvent avoir un effet positif, négatif ou compensatoire. Dans le cas de l'épicéa, l'absorption de N (et sans doute de P) semble intervenir, les ressources pouvant varier en fonction des différences de recyclage de la matière organique ou de la complémentarité des modes d'enracinement.

Brown, A.H.F. and Harrison, A.F. 1983. Effects on tree mixtures on earthworm populations and nitrogen and phosphorus status in Norway spruce (*Picea abies)* stands. In New Trends in Soil Biology. Lebrun, P., Andre, H.M. and Medts, A. (eds) pp. 101-108. Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve. pp. 703.
Royaume-Uni: Sols
Etude d'un peuplement mélangé de 26 ans composé d'épicéas, d'aunes et de pins sauvages, à Gisburn. Le nombre et le poids des lombrics, la teneur du sol en NO_3 et en P et la hauteur des arbres ont été augmentés par l'introduction d'aulnes, et surtout de pins. On suppose que les arbres ajoutés ont encouragé les lombrics, qui ont accéléré la minéralisation de l'azote et du phosphore.

Bruenig, E.F. 1983. Designing ecologically stable plantations. In: Strategies and Designs for Afforestation and Tree Planting. Proceedings of an International Symposium (Wiersum, K.F. ed.), PUDOC, Wageningen, 1984.
Allemagne: Aménagement, rendement.
La rigidité des systèmes de foresterie actuels est critiquée. Le document présente des principes directeurs pour un aménagement sylvicultural plus souple et plus fonctionnel, ainsi qu'un exemple pratique d'application des méthodes préconisées.

Bruenig, E.F. 1991(a). ITTO guidelines for the sustainable management of man-made tropical forests (First Draft). Presented to the Permanent Committee on Reforestation and Forest Management at the seventh session, Quito, Ecuador.
Tropiques: Aménagement.
Formule 48 principes et suggère 56 lignes d'action possibles, en particulier en ce qui concerne le maintien de la stabilité et la réduction des risques. Les plantations mixtes sont nettement recommandées.

Bruenig, E.F. 1991(b). Forêts et climat: nouvelles dimensions et perspectives. Mémoire général, Thème 1, Dixième Congrès forestier mondial, Paris, 1991. Actes, Vol 2: 16-22.
Monde: Aménagement
Attire l'attention sur les problèmes inhérents aux forêts artificielles, du fait qu'elles sont conçues pour obtenir une production maximale, ce qui a un effet déstabilisant sur l'écosystème. Les forêts artificielles doivent être modifiées afin de pouvoir résister aux changements climatiques imminents.

Budowski, G. 1983. Biological diversity and forestation in the tropics. In: Strategies and Designs for Afforestation and Tree Planting. Proceedings of an International Symposium (Wiersum, K.F. ed.), PUDOC, Wageningen, 1984.
Tropiques: Aménagement
Les avantages des forêts artificielles par rapport aux forêts naturelles sont exposés brièvement. Les expériences de plantations mélangées - jusqu'ici limitées et très décevantes - sont analysées. Le recours aux mélanges pour fournir une couverture végétale et de l'ombre s'est toutefois avéré intéressant.

Bule, L. and Daruhi, G. 1990. Status of Sandalwood resources in Vanuatu. In: Proceedings of the Symposium on Sandalwood in the Pacific, April 1990, Honolulu, Hawaii. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-122. pp. 79-84.
Vanuatu: Aménagement
Historique de l'exploitation du santal à Vanuatu et exposé des problèmes et des efforts de recherche actuels.

Burdon, R.D., 1982. Monocultures - how vulnerable? What's new in Forest Research N° 115. Forest Research Institute, Rotorua.
Nouvelle-Zélande: Environnement. Sols.
Résumé et analyse des critiques faites aux plantations pures équiennes. L'étude conclut que les peuplements purs équiens ne sont pas nécessairement plus vulnérables que les peuplements mélangés. Le succès limité des espèces exotiques autres que *Pinus radiata*, en Nouvelle-Zélande, est relevé.

Burley, J. et Ikemori, Y.K. 1988. Tropical forest production: the impact of clonal propagation technology. In Towards an Agro-Industrial Future, Royal Agricultural Society of England, Monograph Series 8: 169-180.
Brésil: Aménagement
Description du programme d'amélioration génétique et de clonage appliqué à Aracruz, au Brésil.

Butterfield, J., Standen, V. and Benitez Malvido, J. 1990. The effect of mixed species planting on the distribution of soil invertebrates in broadleaved and conifer stands. In Ecology of Mixed Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO Div S2.01 Symposium.
Royaume-Uni: Sols
La répartition distribution du coléoptère carabidé *Enchytraeidae* dépend du type de sol et des essences forestières plantées.

Calabri, G. 1991. Problèmes et perspectives concernant les incendies de forêts - leur prévention et leur maîtrise. Mémoire général, Thème 5, dixième Congrès forestier mondial, Paris, 1991. Actes, Vol. 2: 405-414.
Monde: Aménagement
Statistiques sur les incendies de forêts et moyens de réduire les risques.

Campinhos, E. et Ikemori, Y.K. 1986. Breeding Eucalyptus in Brazil. Aracruz Florestal S.A. mimeographed Report pp. 9.
Brésil: Aménagement.
Etude sur la nécessité d'améliorer la qualité génétique dans les plantations forestières. Outre les accroissements en volume etc., des améliorations importantes ont été réalisées ce qui concerne la densité du bois, le rendement en pâte, la capacité de recépage. Avantage économique: au Brésil la pâte se vend 55 dollars E.-U. la tonne, contre 155 dollars E.-U. en Finlande.

Campinhos, E. et Claudio-da-Silva, E. 1990. Development of the Eucalyptus tree of the future. Document présenté à la Conférence ESPRA de printemps, Séville, Espagne. Aracruz Florestal S.A.: rapport polycopié.
Brésil: Aménagement
Importance de l'amélioration génétique pour la qualité de la pâte. L'accroissement annuel moyen en volume (1990) est tombé à 35 m^3, contre 45 m^3 en 1985, en raison de la sécheresse.

Canizares, E.G. et al. (1987?) Propuesta de planificacion territorial de la actividad forestal en la Sierra del Rosario, Cuba. IESAAC, A.P. 8010, C. Habana 10800. Cuba: Aménagement
Calcul d'un indice de stress pour les sites, ainsi que d'un indice de la capacité de résistance au stress pour chaque essence. L'utilisation de ces indices devrait permettre de bien adapter les essences aux sites.

Carlson, A. 1986. A comparison of birds inhabiting pine plantation and indigenous forest patches in a tropical mountain area. Biological Conservation 35: 195-204.
Kenya: Faune sauvage
Dans les plantations de *Pinus radiata,* les espèces "spécialistes" ont été appauvries plus fortement que les espèces "généralistes". Les espèces paléarctiques ont été favorisées par les pins. Il est nécessaire de créer des réserves forestières naturelles, et de conserver des îlots et des mosaïques d'espèces végétales indigènes.

Carlson, P.J. et Dawson J.O. 1984. Effects of autumn-olive and black alder leaf mulches on the growth of eastern cotton wood in two soils. Forestry Research Report, Dept. of Forestry, Agricultural Experiment Station, University of Illinois 84-1: pp. 3.
Etats-Unis: Sols
Dans des expériences en pots, le mulch de feuilles d'*Alnus glutinosa* et *Elaeagnus umbellata* (en particulier de cette dernière essence) a amélioré la croissance de *Populus deltoides* aussi bien sur sols argileux de prairie que sur sols constitués à 2:1:1 de sable: tourbe: mélange terreux. Les espèces fixatrices d'azote peuvent être bénéfiques même sur les sols de prairies fertiles.

Cellier, K-M., Boardman, R., Boomsma, D.B. et Zed, P.G. 1985. Response of *Pinus radiata* D. Don to various sylvicultural treatments on adjacent first - and second - rotation sites near Tantanoola, south Australia. I. Establishment and growth up to age 7 years. Australian Forestry Research 15: 431-447.
Australie: Aménagement, sols
Description des traitements sur des couples de parcelles portant des peuplements de la première et de la deuxième révolution. Les mesures les plus efficaces ont été: utilisation d'un désherbant pour lutter contre les adventices, apport massif de phosphate et apport modéré d'azote; chaulage efficace en deuxième révolution; aucune différence entre les rendements des deux révolutions qui ont été excellents; augmentation globale de la production: 30 pour cent.

Chaffey, D.R. 1978. Decline in productivity under successive rotations of forest monoculture. Land Resource Division, Miscellaneous Report 243, ODA, London.
Etude générale.
Etude de la documentation portant sur les rubriques ci-après: pathogènes, sols - propriétés physiques, sol - propriétés chimiques, facteurs biologiques et climat.

Champion, H.G. 1954. Forestry, Oxford University Press (UK).
Manuel général: Aménagement
Les mélanges en layons et en matrice sont brièvement expliqués. Les mélanges réussis sont relativement rares.

Champion, H.G. et Griffith, A.L. 1948. Manual of general sylviculture for India. Geoffrey Cumberledge, Oxford University Press (UK).
Inde: Aménagement, manuel.

Les raisons les plus importantes des échecs des plantations mélangées sont résumées. Les connaissances actuelles étant limitées, les essais devront être poursuivis pendant de nombreuses années. L'expérience montre que les avantages des mélanges doivent dériver du maintien de la fertilité du sol au cours des révolutions futures.

Chapman, K., Whittaker, J.B. et Heal, O.W. 1988. Metabolic and faunal activity in litters of tree mixtures compared with pure stands. Proceedings: Workshop on interactions between soil-inhabiting invertebrates and microorganisms in relation to plant growth, Columbus, Ohio, March 1987. In: Agriculture, Ecosystems and Environment V. 24 (1-3), Elsevier, 1988
Royaume-Uni: Sols
Par rapport aux peuplements monospécifiques, les ressources en éléments nutritifs et la croissance des arbres ont été renforcées dans les mélanges épicéas/pins et réduites dans les mélanges épicéas/aunes. Les taux de mobilisation sont améliorés par l'activité métabolique, et sont liés aux changements de la communauté qui décompose la litière.

Chatuverdi, A.N. 1983. Eucalyptus for Farming. Uttar Pradesh Forest Bulletin 48. 48 pp. Inde: Aménagement
L'élimination d'une espèce est inévitable dans un mélange. L'eucalyptus tend à souffrir davantage de la concurrence. Neuf mélanges ont été testés et écartés.

Chijioke, E.O. 1980. Influences exercées par les essences à croissance rapide sur les sols des régions tropicales humides de plaine. Bourse André Mayer. Etude FAO: Forêts 21, FAO, Rome
Tropiques: Sols
Il n'est pas prouvé que les monocultures appauvrissent les réserves du sol en éléments nutritifs plus rapidement que des forêts mélangées, lorsque la production de biomasse, la longueur de révolution et la proportion d'arbres enlevés lors de la coupe sont les mêmes.

Chou, C.K.S. 1981. Monoculture, species diversification, and disease hazards in plantation forestry. New Zealand Journal of Forestry 26 (1): 20-42.
Nouvelle-Zélande: Ecologie, ravageurs et maladies
La question de la composition des peuplements et du risque de maladies n'est pas éclaircie. Lorsqu'un pathogène a plusieurs hôtes, les mélanges ne sont pas nécessairement plus sûrs que les peuplements purs. Il est donc difficile de recommander des mélanges sans risque. Les régimes d'aménagement des peuplements mixtes peuvent eux-même engendrer des problèmes de maladies. La rotation des cultures est une forme de mélange qui peut s'avérer nécessaire.

Chu, C.G. 1980. (Etude sur les forces biologiques productives d'une forêt artificielle de *Pinus koraiensis)*. Institute of Forestry and Pedology, Academia Sinica.
Chine: Rendement
Comparaison entre des peuplements purs et mixtes de *Pinus koraiensis*. Lorsque le pin est mélangé avec des feuillus, la biomasse totale est plus élevée que dans les peuplements purs. La qualité et la vigueur sont aussi supérieures dans les peuplements mélangés.

Ciesla, W.M. 1991. L'aphidé du cyprès: une nouvelle menace pour les forêts africaines. Unasylva 167. Vol. 42: 51-55
Afrique de l'Est: attaques d'insectes
Exposé d'attaques de *Cinara Cupressi* sur *Cupressus lusitanica*.

Ciesla, W.M. et J.E. Macias Samano, 1987. Desierto de Los Leones: A forest in crisis. American Forests 93: 29-31, 72-74.
Environnement: pollution.

Clatterbuck, W.K., Oliver, C.D. et Burkhardt, E.C. 1987. The silvicultural potential of mixed stands of cherrybark oak and American sycamore: Spacing is the key. Southern Journal of Applied Forestry 11: 158-161
Etats-Unis: Aménagement
Mélange en layons de *Quercus falcata var. pagodifolia, Platanus occidentalis et Populus deltoides* (éliminé). *Q. falcata,* l'espèce la plus précieuse, a été étouffée au voisinage de *P. occidentalis*. A 24 ans, l'espèce dominante *Q. falcata* a été rattrapée par *P. occidentalis*. L'importance de l'aménagement est évidente.

Clatterbuck, W.K. et Hodges, J.D. 1988. Development of cherrybark oak and sweet gum in mixed, even aged bottomland stands in central Mississipi, USA. Canadian Journal of Forest Research 18(1): 12-18.
Etats-Unis: Rendement, aménagement
Le développement a été "limité" à un écartement de 5,5 m. *Liquidambar styraciflua* a dominé pendant 20 ans. A l'âge de 58 ans, *Q. flacata* avait un diamètre de 61 cm et une hauteur de 34 m. Le développement a été "illimité", lorsque les espèces dominantes ou co-dominantes étaient espacées de plus de 5,5 m. Dans ce cas, *Q. falcata* a atteint un diamètre de 56 cm et une hauteur de 26 m à l'âge de 40 ans.

Clout, M.N. 1985. Wildlife in pine plantations - the New Zealand position. In: Wildlife management in the forests and forestry controlled lands in the tropics and southern hemisphere. ed J. Kikkawa. IUFRO Workshop held at University of Queensland, Australia.
Tropiques et hémisphère sud: Faune
La diversité des espèces d'oiseaux indigènes est améliorée par la diversité structurelle de l'habitat. Les jeunes plantations de pins offrent des habitats particulièrement médiocres aux oiseaux indigènes.

Cossalter, C. 1991. Communication personnelle.

Coster, C. 1934. Rapport over de reboisatie der Tegal-Waroe landen. (Rapport sur le reboisement des terres du Tegal Waru 1934). Inédit. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 626.
Indonésie: Aménagement
Méthodes conseillées pour reboiser les prairies. Les mélanges comprenant un étage supérieur d'*Albizia falcataria* sont l'une des méthodes recommandées.

Coté, B. et Camire, C. 1987. Tree growth and nutrient cycling in dense plantings of hybrid polar and black alder. Canadian Journal of Forest Research 17(6): 516-523.
Canada: Sols
Alnus glutinosa et *Populus nigra x P. trichocarpa.* L'effet stimulant de l'aulne sur la croissance des peupliers a diminué sur trois ans. La concurrence réduite de l'aulne, plus petit, pour l'azote contenu dans le sol et la lumière pendant la première saison de végétation serait le principal facteur de l'accélération de la croissance du peuplier.

Courrier, G. et Garbaye, J. 1981. A propos de la sylviculture des peuplements mélangés. Un exemple de l'effet bénéfique de l'aulne sur la croissance des peupliers. Revue forestière française 33 (4): 289-292
France: Sols

Les effets des applications d'engrais sur le *Populus* "Fritzi Pauley" avaient complètement disparu au bout de 10 ans, mais il y avait une forte corrélation entre le volume des peupliers et le nombre d'*Alnus glutinosa*.

Craib, I.J. 1947. The silviculture of exotic conifers in South Africa. Journal of the South African Forestry Association 15: 11-45.
Afrique du Sud: Aménagement
On conseille des éclaircies précoces massives dans les conifères afin de maximiser les rendements économiques.

CTFT 1977 (?). Projet de plantation du framiré en mélange avec d'autres essences (fraké, samba, cedrela ou cordia). Proposé à la Direction de reboisement de la SOFEDOR. CTFT Division d'entomologie et de pathologie forestières (non publié).
CTFT: Aménagement, régénération, écartement
On a constaté que les cultures de *Terminalia ivorensis* donnent de meilleurs résultats lorsque la densité de peuplement est réduite. Pour maintenir la rentabilité, des mélanges ont été essayés.

CTFT 1991. Essais: composition de peuplement "mélange d'essences". Inédit. CTFT, Nogent-sur-Marne.
Afrique de l'Ouest (+ Madagascar, Guyane française, Nouvelle-Calédonie); Aménagement, rendements
Résumé des 63 expériences (en cours ou terminées) entreprises principalement dans huit pays francophones d'Afrique de l'Ouest.

Darrah, G.V. et Dodds, J.W. 1967. Growing broadleaved trees in mixture with conifers. Forestry 40 (2): 220-228. UK.
Royaume-Uni: Aménagement
La compatibilité entre les espèces ou provenances est importante pour la réussite d'un mélange. Les rendements des conifères sont souvent peu satisfaisants car les éclaircies sont pratiquées à de mauvais moments, surtout s'il y a incompatibilité entre les espèces.

Darroze, S. 1991. Communication personnelle.

Davidson, J. 1986. Underplanting, interplanting and buffer planting for forest plantations. Assistance to the forestry sector of Bangladesh. UNDP/FAO Project BGD/79/017. Working Paper 18.
Bangladesh: Aménagement.
La plantation d'un sous-étage destiné à fournir une couverture vivante est préconisée. Des exemples de légumineuses intéressantes sont fournis. Des mélanges de deux essences avec une légumineuse sont conseillés.

Dawkins, H.C. 1949. Timber planting in the Terminalia woodland of Northern Uganda. Empire Forestry Review 28 (3): 226-246.
Ouganda: Aménagement
Etablissement de *Chlorophora excelsa* et de *Khaya grandifoliola* dans une matrice de *Phyllanthus discoideus* et *Gmelina arborea*. Une analyse de la succession écologique dans un site aride (saison sèche de 5 mois), depuis une prairie de *Terminalia* exposée au feu jusqu'à des espèces sensibles au feu - *Entandophragma angolense* etc.

Dawson; J.O., Dzialowy, P.J., Gertner, G.Z. et Hansen, E.A. 1983. Changes in soil nitrogen concentration around *Alnus glutinosa* in a mixed short rotation plantation with hybrid *Populus*. Canadian Journal of Forest Research 13 (4): 572-576.

Etats-Unis: Sols
Dans une plantation mélangée âgée de 4 ans, l'accrétion de N a été très élevée dans les plantations d'aulnes: peupliers (1:1), moins élevée dans un mélange 2:1 et encore moins élevée dans un mélange 3:1. On suppose que l'accrétion précoce de N dans le sol résulte du stress provoqué par la concurrence, dû au fait que les peupliers fournissent de l'ombre ou à l'allélochimie des peupliers.

DeBell, S.D., Whitesell, C.D. et Schubert, T.H. 1985. Mixed plantations of Eucalyptus and leguminous trees enhance biomass production. Research Paper PSW-175. Berkeley, CA: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Dept. of Agriculture, pp. 6.
Hawaï: Sols
Des espèces fixatrices d'azote, *Acacia melanoxylon* et *Albizia falcataria*, ont été cultivées dans des mélanges en layons d'*Eucalyptus grandis* et *E. saligna*. A 65 mois, la croissance en hauteur de l'eucalyptus était supérieure dans les mélanges avec *Albizia*. Les concentrations foliaires d'éléments nutritifs étaient plus élevées et la teneur du sol en éléments nutritifs plus faible, dans les mélanges.

DeBell, D.S., Whitesell, C.D. et Crabb, T.B. 1987. Benefits of *Eucalyptus-Albizia* mixtures vary by site on Hawaii Island. Research Paper PSW-187. Berkeley, CA. Pacific Southwest Forest and Range experiment Station, Forest Service, US Dept. of Agriculture. pp. 5.
Hawaï: Rendement, aménagement
Application d'un engrais non organique dans des plantations pures et mixtes. L'introduction d'*Albizia falcataria* dans des plantations d'*Eucalyptus saligna* a amélioré la croissance de l'eucalyptus sur les deux sites les plus humides, mais pas sur les deux sites les plus secs. Sur un site, *Albizia* a été un échec, peut-être en raison de l'insuffisance des précipitations. *Acacia mangium* pourrait remplacer *Albizia*.

DeBell, D.S., Whitesell, C.D. et Schubert, T.H. 1989. Using N_2-fixing Albizia to increase growth of eucalyptus plantations in Hawaii. Forest Science 35 (1): 64-75.
Hawaï: Sols, rendement
Par rapport aux peuplements purs d'eucalyptus (qui ont reçu un apport massif d'engrais) (94 t/ha de matière sèche), les mélanges contenant 11 et 25 pour cent d'*Albizia* ont réduit le rendement de 29 pour cent au maximum; lorsque la proportion d'Albizia était plus importante, les rendements ont augmenté de 12 pour cent au maximum. Mais même la parcelle qui a eu le rendement le plus faible (67 t - 11 pour cent d'*Albizia*) a eu un rendement plus élevé que les peuplements purs d'eucalyptus (non compris dans l'expérience) qui recevaient des apports d'engrais normaux (rendement 44 t).

Delwaulle, J.C. 1989. Plantations clonales au Congo. Point des recherches sur le choix des clones dix ans après les premières plantations. In: Gibson, G.L., Griffin, A.R. and Matheson, A.C. (eds). Actes de la Conférence sur la sélection des arbres tropicaux: Population Structure and Genetic Improvement Strategies in Clonal and Seedling Forestry, Pattaya, Thaïlande, 28 novembre - 3 décembre 1988. IUFRO WPs S2.02.08 and S2.02.09. Oxford Forestry Institute, UK. 431-434.
Congo: Aménagement

Delvaux, J. 1971. (Peuplements purs ou mélangés) Bull. Soc. For. Belg. 78 (4): 183-197. Etude
Analyse générale des avantages et des inconvénients des peuplements purs et des peuplements mélangés.

Deventer, A.J. van. 1913. Gemengde djatibosschen (prae-advies). (Forêts mélangées de tecks (propositions)). Tectona 6: 273-293. Présenté dans Indian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 600.
Indonésie: Sols
Dans une plantation de tecks, une formation végétale de couverture doit protéger le sol, bien supporter l'ombre, ne jamais dominer le teck, et fournir un produit commercial. Kesmabi (*Schleichera oleosa)* est recommandée.

Donaubauer, E. 1991. Plantation Management: Aspects of Resistance and Resilience to Pests, Diseases and Abiotic Factors. Rapport inédit destiné à la FAO.
Général: Ravageurs et maladies
Etude bibliographique

Dransfield, J. 1977. *Calamus caesius* and *C. trachycoleus* compared. Garden's Bulletin, Singapore 30: 75-78.
Indonésie: Aménagement
Calamus caesius, une espèce de rotang, peut être complètement récoltée à deux reprises, entre 7 et 10 ans, et 4 ans plus tard, avant d'être épuisée. Cette pratique convient à un système de culture itinérante nécessitant une jachère de 14 ans. Mais si l'on a recours à des coupes sélectives, la vie des plantes est considérablement allongée. *C. trachycoleus*, ayant des stolons plus longs, peut se multiplier sans intervention.

Dransfield J. 1988. Prospects for rattan cultivation. Advances in Economic Botany 6: 190-200.
Malaisie/Indonésie: Aménagement. Rendement. Economie
S'il y a beaucoup d'ombre, la croissance est lente, mais les entre-noeuds sont plus longs, ce qui est souhaitable. Les joncs peuvent être cultivés en forêt secondaire, dans des plantations d'hévéa de qualité médiocre ou sous des pins.

Duff, A.B., Hall, R.A. et Marsh, C.W. 1984. A survey of wildlife in and around a commercial tree plantation in Sabah. The Malaysian Forester 47 (3): 197-213.
Malaisie (Sabah): Faune sauvage
On réduit les dégâts causés par la faune en séparant les forêts naturelles et les plantations, ou en plantant des essences dépourvues d'appétence à la limite de la forêt naturelle. Des îlots de forêts naturelles sont bénéfiques pour les prédateurs. Les densités de mammifères sont supérieures s'il y a une couverture vivante.

Dunikowski, S. 1991. Protection des forêts contre les agressions biotiques et abiotiques. Mémoire général, Thème 4, dixième Congrès forestier mondial, Paris, 1991. Actes, Vol. 2: 285-290.
Général: Environnement
Il est nécessaire de convertir les peuplements purs de conifères, qui sont sensibles à la pollution atmosphérique, en peuplements mélangés contenant une proportion importante de feuillus.

Dupuy, B. 1985. Plantations à vocation de bois d'oeuvre et associations d'espèces en mélange: objectifs et contraintes sylvicoles. CTFT, Côte d'Ivoire (inédit).
Côte d'Ivoire: Aménagement. Rendements.

Dupuy, B. 1986. Principales règles sylvicoles dans les plantations à vocation de bois d'oeuvre. CTFT, Côte d'Ivoire (Projet d'étude non publié).
Côte d'Ivoire: Aménagement.
Une classification des mélanges est proposée: mélanges composés d'une essence principale et d'une espèce jouant un rôle sylvicole, et mélanges constitués d'essences ayant la même valeur sylvicole. Des associations et des systèmes d'aménagement possibles sont étudiés.

Dupuy, B. 1989a. Etude de mélange: *Gmelina arborea/Acacia auriculiformis*. CTFT (inédit).
Côte d'Ivoire: Aménagement
Quatre mélanges de *G. arborea/A. auriculiformis*, comprenant 50, 33, 20 et 10 pour cent d'acacias ont été essayés. *Gmelina* a dominé en hauteur les acacias, sauf dans le mélange à 10 pour cent. Dans ce type de mélange, il est possible de récolter le bois de feu au bout de 5 à 6 ans, en laissant en place l'essence dominante.

Dupuy, B. 1989b. Sylviculture des peuplements en mélange fraké/framiré. CTFT, Côte d'Ivoire (inédit).
Côte d'Ivoire: Aménagement. Rendement.
Des mélanges de *Terminalia ivorensis/Terminalia superba*, 50/50, 25/75 et 6/94 pour cent ont été comparés. Le degré du mélange ne semble affecter la croissance d'aucune des deux essences. Les méthodes sylvicoles seront choisies en fonction de l'essence que l'on veut favoriser au cours des éclaircies.

Durigan, G. et De Souza Dias, H.C. 1990. Abundancia e diversidade da regeneracao natural sob mata ciliar implantada. Instituto Florestal, Sao Paulo, Brésil. Document polycopié présenté au sixième Congrès forestier brésilien.
Brésil: Aménagement.
Etude de la régénération sous une forêt fluviale plantée en 1973 (âgée de 17 ans) à Candida Mota-SP. Cent cinquante essences ont été plantées et 41 autres se sont régénérées naturellement. Un petit nombre seulement d'espèces plantées se sont régénérées, dont des essences exotiques. D'une manière générale, la diversité spécifique s'est réduite au cours de la régénération, et la forêt a eu tendance à devenir homogène au cours du stade suivant de la série de végétation.

Durigan, G. et Nogueira, J.C.B. 1990. Recomposicao de matas ciliares. Insituto Florestal Serie Registros, Sao Paulo 4: 1-14.
Brésil: Aménagement.
Recense les espèces appropriées pour créer des forêts naturelles sur les rives des cours d'eau et les classe en fonction de leurs besoins écologiques et de leur position dans la succession écologique.

Earl, D.E. 1968. Latest techniques in the treatment of natural high forest in South Mengo District. Paper to 9th Commonwealth Forestry Conference, India.
Ouganda: Aménagement.
La carbonisation du bois, en tant qu'instrument d'aménagement dans une forêt naturelle.

Eidmann, F.E. 1932. Het onderplantingsvraagstuk van der djati. (Problèmes des sous-plantations de teck). Korte Meded. B.P.S. 27 and Tectona 25: 671-690, 1628-1682. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982, Abstract 984.
Indonésie: Aménagement

La réussite des sous-plantations de tecks est probablement conditionnée par des éclaircies régulières et massives, afin de dégager le couvert et l'introduction simultanée d'une espèce d'ombre à enracinement profond qui produira du bois de valeur.

Evans, J. 1975. Two rotations of *Pinus patula* in the Usutu forests, Swaziland. Commonwealth Forestry Review 54 (1): 69-81.
Swaziland: Rendement
Une légère augmentation du rendement de la deuxième révolution a été constatée et attribuée à des précipitations supérieures à la moyenne et à la concurrence réduite des herbes au moment de l'établissement.

Evans, J. 1978. A further report on second rotation productivity in the Usutu forest, Swaziland - results of the 1977 reassessment. Commonwealth Forestry Review 57 (4): 253-261.
Swaziland: Rendement
Les précipitations moyennes ont été de 1 230 mm. L'arrivée tardive des pluies de printemps, de 1974 à 1976, se reflète dans les vitesses de croissance (des morts d'arbres provoquées par la sécheresse ont été signalées). Les rapports sur les rendements obtenus pendant la deuxième révolution ou plus tard sont examinés.

Evans, J. 1987. Site and species selection - changing perspectives. Forest Ecology and Management 21: 299-310.
Tropiques: Aménagement. Rendement
Etude sur la nécessité d'établir des espèces appropriées, notamment en ce qui concerne l'utilisation finale et l'utilisation par les villageois. Analyse des essences forestières plantées dans les zones tropicales, par ordre de fréquence (Chine méridionale exclue).

Evans, J. 1988. La forêt de l'Usutu: 20 ans après. Unasylva 159 (40): 19-29.
Swaziland: Rendement. Aménagement
L'insuffisance des pluies en 1958-65 et en 1978-82 entraîne la comparaison des rendements. Les pertes de fertilité peuvent s'expliquer de plusieurs manières: appauvrissement en nutriments par exportation de la biomasse, altération des caractéristiques du sol ou compaction et érosion résultant de la vidange des bois. Quinze pour cent de la superficie plantée recouvre des formations rocheuses à gabbro et, sur ces sols, les réserves de phosphate sont tombées à un niveau critique.

Evans, J. 1990. Long-term productivity of forest plantations - status in 1990. Proceedings of IUFRO XIX World Congress, Montreal. Vol 1: 165-181.
Tropiques: Aménagement, sols
Etude des rendements des dernières révolutions.

Ewel, J.J. 1986. Designing agricultural ecosystems for the humid tropics. Annual Review of Ecology and Systematics 17: 245-271.
Tropiques: sols
Etude générale de la documentation. Les essences à enracinement profond augmentent le volume de sol exploité. Les espèces fixatrices d'azote peuvent utiliser l'azote pour elles-mêmes et ne le restituer au sol que par l'intermédiaire de la chute des feuilles. La matière organique représente jusqu'à 50 pour cent du P total contenu dans l'horizon superficiel des sols tropicaux.
Le P organique circule rapidement.

FAO, 1988. An interim report on the state of forest resources in the developing countries. Forestry Department FO:MISC/88/7, FAO, Rome.
Tropiques: Aménagement
Analyse des types de forêts et des plantations existant en 1980 et estimations des plantations pour la période 1981-1985.

FAO, 1991a. Exotic aphid pest of conifers: A crisis in African forestry. Workshop Proceedings, FAO/Kenya Forestry Research Institute, June 1991.

FAO, 1991b. Les plantations à vocation de bois d'oeuvre en Afrique intertropicale humide. Etude FAO Forêts 98.
Afrique de l'Ouest: Aménagement
Manuel de sylviculture contenant un chapitre sur les mélanges.

Farrichon, V. 1987. Résultats des études menées au projet AFRI d'avril 1986 à mai 1987. Comparaison de deux espèces d'eucalyptus (*E. tereticornis et E. torelliana*) utilisées au projet AFRI. CTFT (inédit).
Togo: Rendement
Dans un mélange en layons de *E. tereticornis* et *E. torreliana, E. tereticornis* s'est avérée l'essence la plus compétitive.

Ferguson, I.S. 1983. Plantation Management in Australia. New Zealand Journal of Forestry 28 (3): 327-338.
Australie: Aménagement
Analyse de la politique forestière nationale, en ce qui concerne l'établissement des plantations et la nécessité de comprendre les problèmes de commercialisation; état des superficies sous différentes cultures arborées.

Ferguson, J.H.A., Hellinga, G. et Alphen de Veer, F.J. van. 1949. Eenige gedachten over de Pinus kultur in Indonesie. (Quelques idées sur la culture des pins en Indonésie.) Tectona 39: 383-387. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 584.
Indonésie: Aménagement, formation végétale de couverture
Pour éviter les risques des monocultures lorsque l'on établit des plantations de *Pinus merkusii,* le mélange de cette espèce avec *Swietenia macrophylla* en plaine, et avec *Agathis loranthifolia* en montagne sur des sols pas trop pauvres, est étudié.

Florence, R.G. 1967. Factors that may have a bearing upon the decline of productivity under forest monoculture. Australian Forestry 31: 51-71.
Général: Sols
Analyse des facteurs susceptibles d'entraîner une baisse de productivité à long terme.

Florence, R.G. et Lamb, D. 1974. Influence of stand and site on Radiata pine litter in South Australia. New Zealand Journal of Forest Science 4 (3): 303-310
Australie: Sols
L'accumulation de la litière dépend du type de sol plus que de la fertilité de la station, et du taux de décomposition plus que de la chute des feuilles.

Francis, P.J. et Shea, G.M. 1987. Management of tropical and sub-tropical pines in Queensland. In Forest Management in Australia; Proceedings of a Conference of the Institute of Foresters of Australia pp 273-280.
Australie: Aménagement

Franzini, F. 1957. Les reboisements artificiels dans les savanes de la région de Pointe Noire. Bois et forêts des Tropiques 53: 25-32.
Congo: Aménagement
Description d'expériences de boisement de savanes avec *Eucalyptus saligna, Eucalyptus camaldulensis* et *Casuarina equisetifolia.*

Friedrich, J.M. et Dawson, J.O. 1984. Soil nitrogen concentration and *Juglans nigra* growth in mixed plots with nitrogen-fixing *Alnus, Elaeagnus, Lespedeza* and *Robinia* species. Canadian Journal of Forest Research 14 (6): 864-868.
Etats-Unis: Sols
Dans une plantation âgée de 14 ans, où les écartements pratiqués étaient de 3,7 x 4,9 et de 9,8 m, c'est sous les *Elaeagnus* plantés serrés et sous *Robinia* (annelés) plantés aux deux écartements que la concentration totale d'azote dans les 30 cm supérieurs du sol a été la plus élevée. La concentration d'azote dans le sol n'a pas eu d'effet important sur la surface terrière du noyer.

Friend, G.R. 1980. Wildlife conservation and softwood forestry in Australia: some considerations. Australian Forestry 43(4): 217-224.
Australie: Faune
Les plantations de *Pinus radiata* sont des habitats spécialisés et simplifiés qui sont appauvris en ce sens que la diversité de la faune y est insuffisante. Les animaux qui n'ont pas de besoins spécialisés sont moins affectés, voire favorisés, par les plantations. Les mesures permettant de remédier à cet appauvrissement sont analysées.

Frivold, L.H. 1982. Blandningsskogens status i europeiskt skogsbruk. (Etat des forêts mélangées en foresterie européenne). Tidsskrift foer skogsbruk 90 (3): 250-261.
Europe: Article de synthèse
La plupart des enquêtes sur l'"effet de mélange" ne permettent pas d'exclure entièrement les différences stationnelles. Les enquêtes qui ont conclu que les monocultures d'épicéas entraînaient une dégradation du sol sont intéressantes. L'expérience fait penser que certains mélanges amélioreraient la qualité du bois. Les peuplements purs peuvent être plus sensibles aux calamités que les mélanges, mais la vigueur du peuplement peut aussi jouer un rôle. Les peuplements mélangés résistent probablement mieux au vent.

Frivold, L.H. 1985. Mixed broadleaved stands - Some silvicultural considerations. In: Broadleaves in Boreal Silviculture - An obstacle or an Asset? Swedish University of Agricultural Sciences, Report 14.
Forêts boréales: Article de synthèse
Un "effet de mélange" ne peut pas être écarté, mais il est probablement limité à quelques points de pourcentage. On dispose de peu d'informations sur la relation entre la stabilité et la diversité. Les peuplements mélangés peuvent, dans certains cas, être plus stables que les peuplements purs. Les résultats concernant la viabilité durable et les mélanges sont contradictoires.

Garrido, M.A. et Poggiani, F. 1979. Caracteristicas silviculturais cinco especies indigenas plantadas em povoamentos puros e mistos. (Caractéristiques sylviculturales de cinq espèces indigènes plantées en peuplements purs ou mélangés). Silvicultura em Sao Paulo 13/14 pp. 33-44.
Brésil: Aménagement

Statistiques de croissance sur cinq ans, concernant *Piptadenia macrocarpa, Astronium urundura, Moquinia polymorpha, Colubrina rufa* et *Tabebuia impetiginosa*, en peuplements purs ou mélangés. *P. macrocarpa* a eu une meilleure croissance en diamètre et en hauteur que le mélange dans son ensemble. Parmi les essences individuelles, seules *C. rufa* et *T. impetiginosa* se sont mieux comportées en mélange.

Geldenhuys, C.J. 1975. Die kunstmatige verstiging van inheemse bos in die Suid-Kap. (Etablissement artificiel d'une forêt indigène dans le sud du Cap.) Bosbou in Suid Afrika 16: 45-53.
Afrique du Sud: Aménagement
La méthode "taungya" a été utilisée pour établir dix essences de la forêt indigène du Cap. Le nombre des tiges et le taux de survie ont été plus élevés que dans une forêt adjacente aménagée pour la production.

Gepp, B.C. 1976. Bird species distribution and habitat diversity in an exotic forest in south Australia. Australian Forestry 39 (4): 269-287.
Australie: Faune sauvage
Des plantations de pins, des forêts naturelles et des prairies ont été comparées du point de vue des habitats des oiseaux. C'est à l'intérieur des plantations non éclaircies que la diversité a été la plus réduite. Les plantations contenaient pratiquement autant d'espèces que la végétation naturelle. La mosaïque du paysage semble fournir suffisamment de niches pour la plupart des espèces de la zone.

Gepp, B. 1985. Values of wildlife in forest plantations in the tropics and southern hemisphere. In Wildlife Management in the Forests and Forestry Controlled Lands in the Tropics and Southern Hemisphere. ed. J. Kikkawa. IUFRO Workshop held at University of Queensland, Australie.
Général: Faune sauvage
Dans les plantations, les conditions changent. Le stade du perchis (à peu près 20 pour cent de la révolution) est le plus uniforme, et le moins favorable à la faune sauvage. Dans les plantations, celle-ci est plus abondante là où il y a une régénération naturelle. La conservation d'îlots ou d'une mosaïque d'espèces indigènes est utile. Les plantations sur les terres agricoles ou les prairies peuvent accroître la diversité.

Gibson, I.A.S. et Jones, T. 1977. Monoculture as the origine of major forest pests and diseases, especially in the tropics and southern hemisphere. Origins of Pest, Parasite, Disease and Weed problems. ed Cherrett, J.M. and Sagar, G.R. Blackwell, Oxford (UK) pp 139-161.
Général: Aspects écologiques, ravageurs et maladies
Dans les monocultures, les essences qui poussent dans leur aire d'extension naturelle sont attaquées par de plus nombreuses maladies que les essences exotiques. La foresterie de plantation permet d'affecter davantage de ressources aux mesures de protection que d'autres types de foresterie.

Gilmour, D.A., Ingles, A. et Maharjan, M.R. 1989. Preliminary harvesting guidelines for community forests in Sindhu Palchok and Kabhre Palanchok. Technical Note 2/89, Nepal Australia Forestry Project, Kathmandu 9 pp.
Népal: Aménagement: Social
Prescriptions pour l'aménagement, par les communautés villageoises, de futaies mono ou plurispécifiques, suivant le régime du taillis sous futaie, comprenant des mélanges de pins et de feuillus.

Gilmour, D.A., King, G.C., Applegate, G.B. et Mohns, B. 1990. Silviculture of plantation forest in central Nepal to maximise community benefits. Forest Ecology and Management 32: 173-186.
Népal: Aménagement. Rendement. Social.
Des techniques d'aménagement ont été essayées dans des plantations de *Pinus roxburghii,* dans lesquelles des mélanges d'espèces feuillues (essentiellement *Schima wallichii)* se sont régénérés. L'objectif était d'élaborer concevoir des techniques permettant d'obtenir un rendement durable de produits dont les villageois ont besoin.

Gonggrijp, L. 1929. Doelbewuste kunstmatige menging van djati en wildhout. (Mélange artificiel de teck et d'autres essences). Tectona 22: 1287-1294. Présenté dans Indian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 592.
Indonésie: Economie.
Selon l'auteur, la nécessité d'établir des mélanges n'est pas prouvée et on ne s'est pas suffisamment intéressé à l'économie des mélanges.

Graham, R.M. 1945. Notes on the growing of cypress timber on farms. East Africa Agricultural Journal 11: 132-139.
Kenya: Sols. Ecologie, ravageurs et maladies
Grevillea robusta est considérée comme une essence se prêtant à la culture en mélange avec *Cupressus macrocarpa*. Elle est introduite pour éviter les risques liés à la monoculture, tels que la dégradation des sols, les ravageurs et les maladies.

Graham, R.M. 1949. Plantation management order N° 5. *Grevillea robusta*. Forest Department, Colony and Protectorate of Kenya.
Kenya: Aménagement.
On a utilisé des nombres considérables de *Grevillea robusta* en mélange avec des cyprès et d'autres essences. L'espèce est intéressante pour ses qualités propres. Un régime d'aménagement est suggéré.

Granert, W.G. et Cadampog, Z. 1980. *Leucaena* as a nurse tree. Leucaena News Letter 1: 21.
Philippines: Aménagement
Plantation de teck et d'acajou (*Swietenia macrophylla*) en mélange avec ipil-ipil *(Leucaena leucocephala)*. Aucun effet sur la croissance du teck n'a été constaté, mais le fût serait plus droit. De même, aucune amélioration de croissance n'a été relevée pour l'acajou, mais l'incidence des attaques de foreurs des cimes a été réduite, sous ipil-ipil.

Gray, B. 1972. Economic tropical entomology. Abbual Review of Entomology 17: 313-353.
Tropiques: Ravageurs

Grijpma, P. 1973. Immunity of *Toona ciliata* Roem. var. *australis* (F.v.M.) C.D.C. and *Khaya ivorensis* A. Chev. to attacks of *Hypsipyla grandella* (Zeller) in Turrialba, Costa Rica. In Studies on the shootborer *Hyspsipyla grandella* (Zeller) Lep. Pyralidae Vol. I Inter American Institute for Cooperation on Agriculture (IICA) Misc. Pub. 101 pp. 18-25.
Tropiques: Ravageurs
H. grandella (Nouveau Monde) et *H. robusta* (Ancien Monde) semblent relativement spécifiques des méliacées indigènes; *Swietenia macrophylla* en Inde et à Sri Lanka et *Khaya ivorensis* en Martinique font exception à la règle.

Grijpma, P. et Ramaldo, R. 1973. Toona spp posibles alternativas para el problem del barrendor Hypsipyla grandella de los Meliaceae en America Latina. In Studies on the shootborer *Hyspsipyla* (Zeller) Lep. Pyralidae Vol. I. Inter-American Institute for Cooperation in Agriculture (IICA) Misc. Pub. 101 pp. 3-17.
Amérique centrale: Ravageurs
T. ciliata est fortement attaqué par *H. robusta* en Australie, mais n'est pas touché par *H. grandella* au Costa Rica.

Groulez, J. 1975. Notes sur les plantations de conversion dans les forêts tropicales humides. Bois et Forêts des Tropiques 162: 3-26.
Tropiques: Aménagement
Analyse les arguments pour et contre les plantations de conversion (qui visent à remplacer la forêt naturelle) et considère que ces plantations sont intéressantes, malgré leur coût élevé et leur rentabilité insuffisante. 26 000 ha d'*Aucumea klaineana* au Gabon, 6 000 ha de *Terminalia superba* au Congo, 50 000 ha de *Gmelina* au Brésil.

Grutterink, B.J. 1930. Verslag van de excursie op 21 maart 1930 naar de boscomplexen Watoetoetoek, Pantodomas en de sagerij Saporean der Firma J.v.d. Welle. (Rapport sur la visite du 21 mars 1930 aux complexes forestiers de Watoetoetoek et de Pantodomas et à la scierie de Dapuran, de l'entreprise J.v.d. Welle.) Tectona 23: 633-640. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 593.
Indonésie: Sols
Les mélanges d'essences d'ombre sont préférables sur le plan hydrologique. Si l'on plante des essences de lumière, on n'obtiendra pas une bonne forêt de protection.

Guizol, P. 1985. Les plantations mélangées. Ecole nationale du génie rural des eaux et forêts, France, 18 p.
France: Aménagement
Enquête sur les peuplements mélangés en France. Les avantages des mélanges sont indiqués et des mélanges appropriés sont recommandés.

Guizol, p. 1983/1985. Les plantations mélangées. Elève-Ingénieur civil des forêts, Promotion. Ecole nationale du génie rural des eaux et forêts.
France: Aménagement.
Enquête sur les peuplements mélangés en France. Des comparaisons sont effectuées afin de déterminer quels sont les mélanges qui ont donné les meilleurs résultats. Les objectifs des mélanges sont analysés.

Hägg, A. 1988. Loensamheten ev bjoerkinblandning i barrskog. (Rentabilité d'une adjonction de bouleaux dans des forêts de conifères.) Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, report N° 208.
Suède: Economie
Il est intéressant de conserver des bouleaux pour accroître la densité du peuplement. Le mélange avec des bouleaux améliore la qualité des pins. L'abattage sélectif de bouleaux dans les peuplements d'âge exploitable peut être augmenté. Les coûts de cette opération seront compensés par une réduction des dépenses d'entretien par la suite.

Hägg, A. 1989. Bjoerkens inverkan paa tallens grengrovlek och grenrensning i blandade bestaand (Influence du bouleau sur le diamètre des branches et sur l'élagage naturel des pins dans les peuplements mélangés). Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Report N° 208.
Suède: Aménagement, économie
L'accroissement de la densité du peuplement, dû à la régénération naturelle des bouleaux, entraîne une diminution du diamètre des branches de la bille de pied. Si les bouleaux sont conservés après les opérations de nettoiement, cet effet est renforcé et l'élagage naturel est accru.

Hägg, A. 1990. Loensamheten av att anvaenda sjaelvfoeryngrad bjoerk foer kvalitetsdaning av planterad tall. (Intérêt de l'utilisation de bouleaux régénérés naturellement pour influer sur la qualité des pins plantés). Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, report N° 214.
Suède: Economie. Aménagement
Le diamètre des branches des pins dépend de la densité du peuplement et non pas des mélanges. Les résultats de la conservation de 1 400 et de 7 900 bouleaux/ha sont comparés. Les calculs montrent que la conservation des bouleaux est bénéfique: les avantages sont renforcés par l'application d'engrais après 50 ans. Pour que le régime de 7 900 bouleaux soit plus rentable, il doit produire 38 pour cent de plus de bois de qualité supérieure.

Hansen, E.A. et Dawson, J.O. 1982. Effect of *Alnus glutinosa* on hybrid *Populus* height growth in a short rotation intensively cultured plantation. Forest Science 28 (1): 49-59.
Etats-Unis: Rendement. Sols
Dans un mélange en layons de trois ans, la hauteur du peuplier a augmenté en fonction de la proportion d'aulnes, et diminué en fonction de la distance entre les deux essences. Dans un peublement voisin, on a constaté que la concentration d'azote s'était sensiblement accrue jusqu'à une distance de 15 cm des tiges d'aulne.

Harencarspel, W. van 1908. Menging van lichtbehoeftige met sterk beschaudwende houtsoorten. (Mélange d'essences de lumière et d'espèces forestières fournissant de l'ombre) Tectona 1: 182-184. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982, Abstract 594.
Indonésie: Aménagement
Un mélange par groupes de *Cupressus* et de *Casuarina* avec des essences qui n'atteignent pas une haute taille est préférable à un mélange intime.

Harrington, C.A. 1982. Sitka alder, a candidate for mixed stands. Canadian Journal of Forest Research 12 (1): 108-111.
Canada: Aménagement
D'après l'analyse de la croissance en hauteur (max. 5 m en 14 ans), *Alnus sinuata* pourrait être une essence de protection adaptée pour *Pseudotsuga menziesii*, mais sur des sites peu fertiles, la plantation anticipée de *P. menziesii* est recommandée.

Hart, H.M.J. 1931a. Gemengde djaticulturen, deel I+II. (Plantations mélangées de teck, Partie I et Partie II.) Meded. P.v.h.B. 24: pp. 170 (Partie I) et pp. 400 (Partie II). Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982, Abstract N. 602.
Indonésie: Aménagement. Sols.

L'étude conclut que les mélanges ne sont bénéfiques que dans des conditions particulières. Dans la plupart des cas, les mélanges étudiés se sont avérés défavorables.

Hart, H.M.J. 1931b. Gemengde djaticulturen. (Plantations mélangées de teck (Proposition)). Tectona 24: 88-107. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 603.
Indonésie: Aménagement
La plupart des effets bénéfiques que les mélanges étaient censés offrir se sont avérés sans fondement. La préparation intensive du sol stimule la croissance des jeunes tecks. Des plantations intercalaires de leucaena produiraient le même effet.

Hart, H.M.J. 1931c. Gemendge djaticulturen. (Plantations mélangées de teck (explication et discussion). Tectona 24: 488-511. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 604.
Indonésie: Aménagement
Plus le sol est pauvre, plus l'influence des mélanges est néfaste. L'élagage naturel est meilleur dans les plantations pures de teck.

Hart, H.M.J. et Noltée, A.C. 1927. Verjonging en verpleging van den djati. (Teck: Régénération et soins culturaux). Tectona 20: 199-213. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 568.
Indonésie: Aménagement
Etude historique des techniques utilisées pour régénérer le teck.

Hasan, S.M., al Saraf, M.J. et Khalil, M.T. 1980. (Etudes comparatives sur la croissance de *Pinus brutia* dans des plantations pures et mixtes). Mesopotamia Journal of Agriculture (from Forestry Abstracts Vol. 42 2949).
Iraq: Rendement
Comparaison entre un peuplement pur de *Pinus brutia* et un peuplement mixte, où *P. brutia* était planté en intercalaire avec *Acacia farnesiana*. Après trois saisons de végétation, la croissance en hauteur du pin a été sensiblement plus élevée dans le peuplement mélangé.

Heald, R.C. et Haight, R. 1979. A new approach to uneven-aged silviculture and management of mixed conifer-oak forests. California Agric. 33 (5): 20-22.
Aménagement
Une méthode d'identification des types de végétation est présentée. L'aménagement vise à les maintenir.

Heilman, P. et Stettler, R.F. 1985. Mixed short rotation of red alder and black cottonwood: Growth, coppicing, nitrogen fixation and allelopathy. Forest Science 31 (3): 607-616.
Amérique du Nord: Sols. Rendement.
Les effets bénéfiques du mélange avec l'aune d'Oregon ne peuvent pas être écartés par cette étude.

Henry, P.W.T., 1960. The Akilla plantation. Inform. Bull. Dep. For. Res. Nigeria 9: 1-4. Nigéria: Aménagement
Plusieurs espèces ont été plantées à titre expérimental dans les forêts tropicales humides de plaine: les meilleurs résultats ont été obtenus avec *Nauclea diderichii*, en peuplement pur ou en mélange (5/1) avec des méliacées.

Heybroek, H.M. 1980. Monoculture versus mixture: interactions between susceptible and resistant trees in a mixed stand. In: Resistance to diseases and pests in forest trees, Proceedings of the Third International Workshop on the Genetics of Host-Parasite Interactions in Forestry, Wageningen, September 1990. PUDOC, 1982. pp. 20.
Général: Ecologie. Ravageurs et maladies
L'établissement mixte d'arbres hôtes et d'arbres "non hôtes" des maladies, peut être efficace, mais pour y parvenir, il faut souvent mélanger les essences, ce qui peut entraîner des problèmes sylviculturaux. Le mélange de génotypes n'a pas d'effets aussi bons que la sélection pour la résistance.

Heybroek, H.M. et Tol, G. van 1985. Experiences with genetically mixed forest plantations in the Netherlands. Forest Ecology and Management 12: 155-162.
Pays-Bas: Aménagement
Il est difficile de maintenir les mélanges sur plusieurs révolutions, car ils tendent souvent à se convertir en peuplements plus ou moins purs, ou en mosaïques. En foresterie clonale, une mosaïque de peuplements purs est préférable aux mélanges intimes.

Hirano, R.T. 1990. Propagation of *santalum*, Sandalwood tree. In Proceedings of the Symposium on Sandalwood in the Pacific, April 1990, Honolulu, Hawaii. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-122. pp. 43-45.
Hawaï: Aménagement.
Brève description du commerce du santal à Hawaï et notes sur l'ensemencement en pépinière.

Ikemori, Y.K. 1990. Genetic variation in characteristics of *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden raised from micro-propagation and seed. D. Phil thesis, University of Oxford (UK).
Brésil: Rendements.
Le rendement moyen a été porté de 30 à 45 m^3/ha/an et devrait passer à 55 m^3. La consommation spécifique de bois devrait tomber de 4,2 m^3/tonne de pâte à 3,7 m^3.

Indian Forest Service 1934. Fourth Silvicultural Conference, Item 8. Dehra Dun, India.
Inde: Aménagement
Analyse assez détaillée des plantations mélangées.

Indian Forest Service 1939. Fifth Silvicultural Conference, Item 14, Dehra Dun.
Inde: Aménagement
Ce document contient l'une des études les plus détaillées sur le sujet.

Ingles, A. 1990. Demonstration of forest management options in shrublands and mixed pine - broadleaf forests. Discussion Paper of Nepal-Australia Forestry Project, Kathmandu, pp. 47.
Népal: Social. Aménagement. Rendement.
Des options d'aménagement sont proposées pour différents types de végétation.

Ishibashi, H. 1987. The development and problems in the anti-erosion plantations in Japon. Mitteilungen der Forstlichen Bundes-Versuchanstalt, Wien, N° 138.
Japon: Sols
Des mélanges de *Pinus thunbergii* et d'*Alnus pendula* sont plantés sur des terrasses. Sur de vastes surfaces, les pins, qui sont sensibles à l'érosion et ont besoin de traitements intensifs, ont disparu ou sont peu nombreux; le régime est décrit.

Japing, H.W. vers 1931. *Het verjongingsonderzoek van sandelhout (Santalum album) op Jawa*. (Recherche sur la régénération du santal (*Santalum album)* à Java. Inédit. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 638.
Indonésie: Aménagement
Brève description de cultures expérimentales de santal en peuplements mélangés.

Jones, A.D., Davies, H.I. et Sinden, J.A. 1990. Relationships between eucalypt dieback and land use in southern New England, New South Wales. Australian Forestry 53 (1): 13-23.
Australie: Ecologie: Ravageurs et maladies
Analyse d'une série chronologique de prises de vue aériennes, basée sur des associations en tables multiples. Il n'a pas été possible de détecter une relation claire entre l'augmentation de la diversité spécifique et la réduction du dépérissement terminal.

Jones, E.W., 1945. Structure and reproduction of the virgin forests of the north temperate zone. New Phytologist 44: 130-148.
Zone tempérée (nord): Ecologie.

Jones, E.W. 1965. Pure conifers in central Europe - A review of some old and new work. Journal of Oxford University Forestry Society 13: 3-15
Europe: Aménagement
Examen de travaux importants réalisés sur ce sujet.

Jones, P.D. et Wigley, T.M.L. 1990. Global warming trends. Scientific American 263 (2): 66-73.
Général: Ecologie
Les prévisions établies à partir d'un modèle mathématique de "l'effet de serre" indiquent que le réchauffement aurait été compris entre 0,5 et 1,3°C au cours du siècle dernier, et qu'il atteindra +4°C d'ici à l'an 2050. Le modèle ne concorde pas exactement avec les faits connus: la période 1920-1940 a été plus chaude que prévu; la période 1940-1970 plus froide.

Jonsson, B. 1961-62. On barrblandskogens produktion (Rendement des forêts mélangées de conifères). Meddelanden fran statens skogsforskningsinstitut, 50.
Suède: Rendement
Il apparaît que les mélanges ont une influence sur le rendement. L'effet est particulièrement fort sur les sites adaptés à *Pinus silvestris* et à *Picea abies*. Dans les deux cas, l'effet diminue et finit par devenir négatif.

Jordan, C.F. et Farnworth, E.G. 1982. Natural versus plantation forests. A case study of land reclamation strategies for the humid tropics. Environmental Management 6 (6): 485-492.
Porto-Rico: Rendement
Au bout de quarante ans, la productivité de la parcelle régénérée naturellement a été supérieure ou égale à celle de la plantation.

Kaeokamnerd, W. 1991. Travel Report to People's Republic of China. Mimeographed pp. 60. UNDP/FAO/SIDA/RFD Project THA/86/016, Royal Forest Department, Bangkok.
Chine: Aménagement
Des mélanges d'*Eucalyptus camaldulensis et E. exserta* avec *Acacia auriculiformis,* par rangs alternés, ont été utilisés pour améliorer les sols et les taillis.

Kagemaya, P.Y., Riella, L.C. et Palermo, A. 1990. Plantacoes mistas com especies nativas fins de protecao e reser vatorios. Document présenté au sixième Congrès forestier brésilien, Campos do Jordao, Sao Paolo, Polycopié 11 p.
Brésil: Aménagement
Analyse de plantations mélangées âgées d'un an. Les performances sylviculturales et la croissance en hauteur sont reliées aux groupes écologiques de la succession secondaire.

Kanowski, P.J. et Savill, P.S., avec Adlard, P.G., Burley, J., Evans, J., Palmer, J.R., et Wood, P.J. 1990. Plantation Forestry. World Bank Forestry Policy. Issues Paper. Oxford Forestry Institute.
Général: Sols. Ecologie, ravageurs et maladies
Une baisse de la productivité de la seconde révolution, comme celle qui a été observée en Australie méridionale, peut être évitée grâce à des soins sylviculturaux appropriés et à l'amélioration génétique des arbres.

Kawahara, T. et Yamamoto, K. 1986. (Etudes sur les peuplements mélangés d'akamatsu (*Pinus densiflora)* et de hinoki (*Chamaecyparis obtusa)* (III) Volume des tiges dans les peuplements mélangés). Journal of Japanese Forestry Society 68 (8): 327-332.
Japon: Rendement
La hauteur du hinoki est la même dans les peuplements mélangés et dans les peuplements purs, le diamètre et le volume des arbres sont supérieurs dans les peuplements purs. Le volume total des tiges est plus élevé dans les peuplements mélangés que dans les peuplements purs de l'une ou l'autre essence.

Kawahara, T. , Sato, A., Takeuchi, I., Tadaki, Y. et Hatiya, K. (1981).
Litter fall and its decomposition in a mixed stand of Japanese larch *(Larix leptolepis)* and hinoki *(Chamaecyparis obtusa)*. Bulletin Forestry and Forest Products Research Institute, Japan. N° 313: 79-91.
Japon: Sols
Le mélange de feuilles s'est décomposé plus rapidement que la litière de l'une ou l'autre espèce cultivée seule.

Keating, W.G. 1981. Utilization of mixed species through grouping and standards. Australian Forestry 43 (4): 233-244.
Australie: Aménagement
L'auteur conseille de rassembler les espèces par groupes de force, en se fondant sur les besoins en matériaux structurels, afin de résoudre le problème de la commercialisation des espèces mélangées. Cette méthode demande une bonne connaissance des caractéristiques de chaque espèce et des techniques de classement par qualité efficaces.

Keeves, A. 1966. Some evidence of loss of productivity with successive rotations of *Pinus radiata* in the south east of South Australia. Australian Forestry 30; 51-63.
Australie: Rendement
Première révolution coupée à 14,5 ans après un incendie, deuxième révolution estimée à 9,5 ans. D'une manière générale, on a constaté une baisse d'une à deux classes de fertilité stationnelle, parfois même de quatre classes.

Kelty, M.J. 1989. Productivity of New England hemlock/hardwood stands as affected by species composition and canopy structure. Forest Ecology and Management 28: 237-257.
Etats-Unis: Rendement
La présence de tsugas a entraîné une réduction du nombre des feuillus dans les mélanges (-30 pour cent) ainsi que de leur volume (-20 pour cent) et de leur accroissement sur cinq ans (-14 pour cent). La densité totale du peuplement a augmenté (65 pour cent), de même que le volume (27 pour cent) et l'accroissement (18 pour cent) totaux. Avantages sylviculturaux: meilleures conditions pour la régénération et moins de gourmands.

Kemp, R.H. 1992. La conservation des ressources génétiques des forêts tropicales aménagées. Unasylva 43 (169) : p. 34-40.

Kenk, G.K. 1990a. The silviculture of mixed species stands in Germany. In Ecology of Mixed Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO Div. S2.01 Symposium, Edinburgh.
Allemagne: Aménagement.
Une définition claire des objectifs des mélanges et une bonne connaissance des sites et des vitesses de croissance des essences utilisées sont indispensables. La forêt jardinée est souvent considérée comme idéale, mais ses possibilités sont surestimées. 672 types de peuplements mélangés sont identifiés.

Kenk, G.K. 1990a. Effects of air pollution on forest growth in southwestern Germany - hunting for a phantom? Proceedings Div.2 XIX IUFRO World Congress. Aug. 1990, Montreal. p 388-395.
Allemagne: Rendements, maladies
Commentaires sur les rendements des peuplements affectés par un affaiblissement des cimes, qui peuvent être plus élevés que prévu. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la température, du CO_2, de la pluviométrie ou de la minéralisation.

Kenward, R.E. 1990. Are tree species mixtures too good for grey squirrels? In Ecology of Mixed Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO Div S2.01 Symposium, Edinburgh.
Royaume-Uni: Faune
Etude du problème de l'écureuil gris en foresterie.

Kerr, G., Nixon, C.J. et Matthews, R.W. 1990. The silviculture and yield of mixed species stands: the UK experience. In Ecology of Mixed Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO Div S2.01 Symposium, Edinburgh.
Royaume-Uni: Aménagement. Rendement.
On considère que les peuplements de protection accroissent la rentabilité et la capacité d'adaptation en plaine. En montagne, les avantages ont été clairement démontrés sur certains sols. Les mélanges d'épicéas avec des pins ou des mélèzes sont recommandés sur les sols pauvres en éléments nutritifs dans les landes montagnardes.

Kio, P.R.O. 1976. What future for natural regeneration of tropical high forest? An appraisal with examples from Nigeria and Uganda. Commonwealth Forestry Review 55 (4): 309-318.
Nigéria: Economie, aménagement.

La régénération naturelle est plus intéressante sur le plan économique que les plantations (*Gmelina*, révolution de 40 ans), où les rendements de la deuxième révolution sont supposés baisser de 25 pour cent.

Kolesnichenko, M.V. et Chumakov, V.V. 1973. Basis for selection of species for admixture in mixed plantations of Canadian poplar. Lesnoi Zhurnal 16 (5): 12-16.
URSS: Sols. Eléments nutritfs
Betula verrucosa, Sambucus racemosa et *Ulmus pumila var. arborea* ont inhibé la croissance du peuplier. *Robinia pseudoacacia, Caragna arborescens, Lonicera tatarica, Alnus glutinosa, Cotinus coggyria* et *Fraxinus pennsylvanica* l'ont favorisée. On suggère d'inclure des espèces inhibantes (10-20 pour cent) pour stimuler une "réaction de réponse" chez le peuplier.

Kon, I. 1973. Growth of *Cryptomeria japonica* in mixture with *Pinus elliottii var elliottii* on the Arraial Estate, Parana, Brésil. Floresta 4 (2): 30-33.
Brésil: Rendement
Note d'information sur le comportement des essences après trois ans.

Kormanik, P.P. 1979. Biological means of improving nutrient uptake in trees. In the ecology of even-aged forest plantations. Ford, E.D., Malcolm, D.C. and Atterson, J. eds. Proceedings Div 1. IUFRO. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge.
Général: Sols, éléments nutritifs
Etude du rôle que jouent les micro-organismes et les champignons mycorrhizés dans la fixation d'azote.

Kramer, F. 1925. *Het verjongingsonderzoek van sandelhout* (*Santalum album*) op Java. (Recherche sur la régénération du santal (*Santalum album)* à Java.) Korte Meded. P.v.b.H. 10 et Tectona 18: 455-498. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 642.
Indonésie: Aménagement
Santalum album a été mélangé avec des cultures de plein champ et *Leucaena glauca*. Beaucoup de jeunes plants sont morts lorsqu'ils n'ont pas réussi à atteindre les racines des plantes établies dans la rangée intermédiaire. Des herbes basses autour des jeunes plants ont aidé à résoudre le problème. Une fois que leurs racines ont atteint les *Leucaena*, les jeunes santals se sont bien développés.

Krishnamurthy, K., Munegowda, M.K., et Rajagopal, D. 1990. Outbreak of Psyllid, *Heteropsylla cubana* Crawford on Leucaena and its outlook in alley cropping in India. In Leuceana Psyllid: Problems and Management. International Workshop, Bogor, Indonesia ed. Napompeth, B. and MacDicken, K.G. pp. 17-24.
Inde: Ravageurs.
Décrit la distribution de l'insecte, les dégâts qu'il cause et les tentatives de lutte.

Kunst, E.D. 1918. Toelichtingen bie de excursie der houtvesters in de 2de en 5de Inspectie-afdeeling naar Karanggedeh op 21 December 1918. (Explications données aux visites des forestiers régionaux appartenant à la deuxième et à la cinquième divisions d'inspection, à Karanggedeh le 21 décembre 1918.) In: Boschwesen, Dienst van het, 1918. Notulen van de gecombieerde dienstvergadering der tweede en vijfde inspectieaafdeeling van het Boschwesen te Samarang op den 20 December 1918. (Procès-verbal de la réunion de service combinée de la deuxième et de la cinquième divisions d'inspection du service forestier à Samarang, le 20 décembre 1918.) Inédit. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 606.

Indonésie: Aménagement
Si les feux sont évités, les mélanges d'essences qui se forment naturellement se développent vigoureusement. Les mélanges naturels sont préférables aux associations artificielles.

Lahiri, A.K. 1987. A note on the prospects of *Tectona grandis* and *Xylia dolabriformis* mixtures in North Bengal. Indian Journal of Forestry 10 (3): 232-233.
Inde: Aménagement
Mélange en layons de *Xylia dolabriformis* et *Tectona grandis*. Ecartement 2 x 2 m, quatre lignes de teck, quatre lignes de *Xylia* et quatre lignes contenant un mélange de *Schima wallichii, Chukrasia tabularis, Michaelia champaca*. Les deux dernières espèces sont sensibles au feu et ont tendance à disparaître. A 5 ans: hauteur moyenne 6 m, diamètre des espèces sensibles au feu 5,1 cm, diamètre des autres essences 7-8 cm.

Lamb, A.F.A. 1969. Artificial regeneration within the humid lowland tropical forest. Commonwealth Forestry Review 48 (1): 41-53.
Nigéria: Aménagement
Nauclea diderrichii a été utilisé en matrice avec *Meliaceae, Lovoa trichilioides, Khaya ivorensis, Entandrophragma utile, E. cylindricum, E. angolense*. 5 *Nauclea* pour un méliacée. Ecartement 3,7 m. *Nauclea* a été enlevé entre 12 ou 15 ans. Les méliacées ont été récoltés entre 60 et 70 ans. Sur les sols peu fertiles de l'Amazone, des rotations alternées d'essences d'ombre sont recommandées.

Lamb, A.F.A. 1991. Communication personnelle.
Nigéria: Aménagement
Lovoa a une croissance trop lente pour aller de pair avec *Nauclea*. *Cedrela odorata* n'est pas attaqué par *Hypsipyla* au Nigéria.

Lawton, R.M. 1991. Communication personnelle.

Leclercq, W.L., 1960. *Fomes annosus* and *Prunus serotina*. Ned. Bosb. Tidjschr. Vol 33 (2): 74-75
Pays-bas: Ecologie, ravageurs et maladies
Les risques potentiels de l'utilisation de *Prunus serotina* en mélange avec des conifères sont analysés.

Leslie, A.J. 1966. The problem of limited funds in tropical forestry. Commonwealth Forestry Review 45 (2): 156-159.
Tropiques: Aménagement, économie
Les ressources étant limitées, il n'est pas justifié de les affecter à des travaux extensifs dans les forêts naturelles, qui ont une faible rentabilité économique, aux dépens des travaux intensifs dans les plantations à haut rendement.

Leslie, A.J. 1987. Aspects économiques de l'aménagement des forêts tropicales. Unasylva 155 (1): 46-58.
Tropiques: Economie
Dans l'aménagement des forêts tropicales mixtes, les avantages "non monétaires" ne doivent pas être négligés. Les perspectives économiques dépendent dans une large mesure du taux d'intérêt choisi; le choix est subjectif, mais le taux approprié devrait se situer vers le bas de la gamme de taux plausibles.

Levy, G. 1982. Estimation de l'utilité d'une introduction d'aulne glutineux en mélange à de jeunes plants d'épicéa commun sur sol à hydromorphie temporaire superficielle. Annales des Sciences forestières 39 (1): 33-40
France: Sols. Aménagement

Informations sur deux ans provenant d'une expérience de mélange d'aulne et d'épicéa (1:5) dans des cuvettes sur sols à pseudogley. La nappe phréatique se trouvait à 5 cm en dessous de la surface. Evapo-transpiration supérieure de 19-34 pour cent aux témoins. L'abaissement de la nappe phréatique a amélioré l'enracinement, la montée d'azote et la survie de l'épicéa. En été l'abaissement de cett nappe peut avoir des effets négatifs sur l'épicéa.

Libby, W.J. 1982. What is the safe number of clones per plantation? In Resistance to Disease and Pests in Forest Trees. eds Heybroek, H.M., Stephan, B.R. and von Weissenberg, K. Proceedings Third International Workshop on the Genetics of Host Parasite Interactions in Forestry, September 1980. Wageningen, Netherlands, pp. 342-360.
Ecologie: ravageurs et maladies
Un ravageur peu longève s'adapte et se reproduit plus facilement au milieu de nombreux clones qu'au milieu d'un petit nombre de clones non reliés. Les plantations monoclonales sont une bonne stratégie et celles de 2 à 3 clones constituent probablement la plus mauvaise. La plantation de 7 à 25 clones est une stratégie solide, peut-être la meilleure.

Lohmander, P. 1990. Flexibilitet - en ledstjaerna foer all skoglig planering. Skogsfakta, inventering och ekonomi 23, Swedish University of Agricultural Sciences.
Suède: Economie
Il est impossible de prévoir à long terme les prix du bois et les coûts d'exploitation, de même que l'impact futur des changement écologiques. Un entretien souple est donc d'une importance capitale. Les peuplements mélangés permettent une plus grande souplesse. Les essences les plus valables sur le plan économique peuvent être encouragées lors des éclaircies ultérieures.

Lowe, R.G. 1991 Communication personnelle
Nigéria: Aménagement

Lundgren, B. 1980. Plantation forestry in tropical countries - physical and biological potentials and risks. Rural Development Studies 8. Swedish University of Agricultural Sciences, International Rural Development Centre, Uppsala, Sweden.
Tropiques: Sols
Dans les Tropiques, la foresterie artificielle devrait beaucoup se rapprocher d'une culture de courte durée, comparable à une culture agricole, et les forestiers se sont insuffisamment intéressés à l'aménagement du sol et de la station.

MacGregor, W.D. 1934 Silviculture of the mixed deciduous forests of Nigeria with special reference to the south-western provinces. Oxford Forest Memoirs 18. Oxford Forestry Institute (UK).
Nigéria: Aménagement
L'étude concerne essentiellement les forêts naturelles, mais les résultats des plantations mélangées et des plantations d'enrichissement sont commentés.

McColl, J.G. et Edmonds, R.L. 1983. Symbiotic nitrogen fixation by *Daviesa mimosoides* under Eucalyptus. In: IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity, Seattle, Washington, August 1982. General Technical Report, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. US Dept. of Agriculture Forest Service (1983), N. PNW-163, pp. 122-129.
Australie: Sols
Sur des sols rouges krasnozem, dérivés de sédiments ordoviciens très altérés, *E.dives* et *E. dalrympleana* poussent sur des crêtes exposées, avec un sous-étage

de *D. mimosoides*, qui fixe 4,5-7 kg/ha/an. Le mode de fixation de l'azote est étudié. Le taux de fixation de N est constant pour une tension normale du sol, et baisse lorsque les plantes atteignent le stade du flétrissement. La fixation de N augmente jusqu'à 0,01, puis diminue brusquement (conditions anaérobiques).

McIlroy, J.C. 1978. The effects of forestry practice on wildlife in Australia. A Review. Australian Forestry 41 (2): 78-94.
Australie: Faune et flore sauvages
D'une manière générale, les pratiques sylvicoles aboutissent au rétablissement ou à la mise en place d'une succession de communautés végétales et animales. Les plans d'aménagements ne sauraient se substituer totalement aux réserves et aux parcs nationaux.

McKinnel, F.H. 1990. Status of management and silviculture research on Sandalwood in Western Australia and Indonesia. In Proceedings of the Symposium on Sandalwood in the Pacific, April 1990, Honolulu, Hawaii. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-122. p 19-25.
Australie, Indonésie: Aménagement
Description générale de l'aménagement et de la recherche concernant le santal, en Australie occidentale et en Indonésie.

Maheut, J. et Dommergues, Y. 1959. La fixation par le reboisement de dunes de la presqu'île de Cap-Vert et l'évolution des sols. Bois et forêts des Tropiques N° 63: 3-16.
Sénégal: Sols
Casuarina equisetifolia accroît l'activité biologique et est donc considérée comme une espèce appropriée pour le reboisement des dunes. Une rotation des essences peut s'avérer nécessaire.

Magundikoro, I.A. et Depari, K.S. 1958.(Attaques d'insectes et de champignons dans la forêt de pins du nord de Sumatra.) Rimba Indonesia 10-12: 417-452.
Indonésie: Ecologie, ravageurs et maladies
Le mélange avec des espèces décidues est l'une des mesures recommandées pour réduire les attaques d'insectes sur *Pinus merkusii* dans cette zone.

Maheut, J. et Dommergues, Y. 1960. Les teckeraies de Casamance - Capacité de production des peuplements, caractéristiques biologiques et maintien du potentiel productif des sols. Bois et forêts des Tropiques 70: 25-42
Sénégal: Sols. Rendement
Il y a lieu de craindre un déclin de la productivité dans les teckeraies de Casamance à l'avenir. L'introduction de mélanges est l'une des mesures de prévention suggérées.

Malcolm, D.C. 1979. The future development of even-aged plantations: silvicultural implications. In: the ecology of even-aged forest plantations. Proceedings of the meeting of Division I, IUFRO, Edinburgh, Sept. 1978. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge (UK) 1979, pp. 481-504.
Royaume-Uni: Ecologie, aménagement

Malcolm, D.C. et Titus, B.D. 1983. Decomposing litter as a source of nutrients for second rotation Sitka Spruce established on peaty gley soils. In: IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity, Seattle, Washington, August 1982. General Technical Report, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, US Dept. of Agriculture, Forest Service (1983), N. PNW-163, pp. 138-145.

Royaume-Uni: Sols
Le fait de laisser des débris ligneux après la coupe, sur des sols tourbeux à gley, a encouragé une forte libération d'éléments nutritifs et la croissance d'adventices. Sans les débris ligneux, les éléments nutritifs avaient tendance à être perdus par ruissellement.

Malcolm, D.C., Hooker, J.E. et Wheeler, C.T. 1985. Frankia symbiosis as a source of nitrogen in forestry: a case study of symbiotic nitrogen- fixation in a mixed *Picea-Alnus* plantation in Scotland. In Symbiosis and Plant Nutrition. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh 85 (3/4): 263-282.
Royaume-Uni: Sols
Dans une plantation âgée de 16 ans établie sur un sol argileux modérément fertile, un mélange en layons d'*Alnus rubra* n'a pas amélioré la croissance de *P. sitchensis* par rapport à une plantation pure d'épicéa. La présence d'aulnes a accru de 585 kg/ha la teneur en N de la couche superficielle du sol.

Malcolm, D.C., Campbell, J.M. et Morgan, J.L. 1990. Synergism in mixed species stands on oligotrophic sites in Scotland. In Ecology of Mixed Species Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO Div 2.01 Symposium, Edinburgh.
Royaume-Uni: Sols
Les effets bénéfiques des mélanges de pins et de mélèzes avec des épicéas commencent à se manifester vers l'âge de 6-8 ans. Les différences des intensités et des modes d'enracinement, ainsi que l'augmentation des taux de minéralisation de N dans les horizons superficiels organiques semblent expliquer à elles seules l'accélération de la croissance dans les mélanges.

Mallet, E. 1988. Note sur la croissance de *Khaya senegalensis* en plantations en zone de forêt semi-décidue en Côte d'Ivoire. CTFT (inédit).
Côte d'Ivoire: Aménagement
Khaya senegalensis semble avoir une meilleure croissance dans les clairières, malgré des infestations d' *Hypsipyla robusta*. La forme des tiges est meilleure quand *Khaya* est mélangé avec *Leucaena leucocephala* ou *Cedrela odorata*, car les attaques de *H. robusta* sont retardées.

Mangoendihardjo, S., Wagiman, F.X., Suthoni, A. et Subyanto. 1990. Economic impact of Leucaena Psyllid infection on estate crops and teak forest plantation. In Leucaena Psyllid: Problems and Management. Workshop in Bogor, Indonesia. F/FRED Coordinating Unit, Bangkok, pp. 184-188.
Indonésie: Ravageurs
Donne des détails sur les zones infestées et sur les pertes financières subies.

Manil, G. 1971. (Problème du maintien de la fertilité des sols sous des plantations pures de conifères.) Bull. Soc. For. Belg. 78(5): 217-250.
Belgique: Sols
Etude de l'impact des plantations de conifères sur les sols et les écosystèmes.

Martin, B., Laplace, P et Quillet, G. 1989. L'UAIC Afocel-Armef Informations Forêt. N° 2 - 1989. Pointe-Noire, Congo.
Congo: Aménagement
Description de plantations clonales d'eucalyptus. Des mélanges spatiaux ont été réalisés en mélangeant des clones; 42 clones ont été utilisés, mais sur 50 pour cent de la surface plantée, 5 seulement ont été utilisés. Des mélanges se sont formés avec le temps grâce à la succession. Les avantages obtenus sont, entre autres, une large base génétique et l'uniformité des produits.

Martin, B. 1991. Les croisements contrôlés industriels: appui majeur à la voie clonale. Nouvelle stratégie pour les plantations forestières intensives. Mémoire, Thème 13, dixième Congrès forestier mondial, Paris 1991. Actes, Vol.5: 43-49
Congo: Foresterie clonale

Mathew, G. 1990. Cossid pests of teak in the Asian Region and the possibilities of their control. In Pests and Diseases of Forest Plantations in the Asia-Pacific Region. FAO, Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok. pp. 204-213.
Asie: Ravageurs
Etude de ces ravageurs et des méthodes de lutte.

Matziris, D. 1991. Choix et plantation des espèces et des provenances en fonction des stations et des objectifs. Mémoire, Thème 13.2, Dixième Congrès forestier mondial, Paris, 1991. Actes, Vol. 5: 77.84.
Comprend une recommandation en ce qui concerne l'utilisation des mélanges.

Merlin, M. et Van Ravenswaay, D. 1990. The history of human impact on the genus *Santalum* in Hawaii. In Proceedings of the Symposium on Sandalwood in the Pacific, April 1990, Honolulu, Hawaii. US Dept. of Agriculture Forest Service, General Technical Report PSW-122. pp. 46-60.
Hawaï: Aménagement, exploitation et conservation
Brève étude.

Mielikainen, K. 1985. The structure and development of pine and spruce stands with birch mixture. In: Broadleaves in Boreal Silviculture - An obstacle or an Asset? (Hagglund, B. and Petterson G. eds). Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Report 14: 189-206.
Finlande: Production
L'adjonction de *Betula pendula*, (25 à 50 pour cent), augmente le rendement de l'épicéa à tous les âges. Mélangé avec des pins, le bouleau n'accroît le rendement que s'il est enlevé tôt, entre 20 et 30 ans, et il réduit le rendement en bois de sciage. *Betula pubescens* n'accélère pas la croissance de l'épicéa, mais peut servir d'espèce de remplissage dans les plantations qui présentent des vides.

Miller, P.R et Eiderman, M.J. (eds). 1977. Photochemical oxidant air pollutant effects on a mixed conifer forest ecosystem.
EPA 600/3-77-104. USEPA, Corvallis, Oregon. pp. 338
Environnement: Pollution

Moffat, A.J. et Roswell, R.C. 1990. Effect of tree species and species mixtures on soil properties at Gisburn forest, Yorkshire. Soil Use and Management 6 (1): 46-51.
Royaume-Uni: Sols
Suivi d'une plantation mélangée expérimentale âgée de 32 ans, contenant des pins de Russie, des épicéas, des chênes, des aulnes, et de la végétation herbacée. Sous les conifères et les aulnes, le sol était légèrement plus acide que sous les chênes et la végétation herbacée. Le pH s'est abaissé sur toutes les parcelles. Sous les conifères, les horizons F et H étaient plus épais, mais l'horizon A plus mince. Les conifères et les aulnes ont probablement retardé la formation d'un horizon B pauvre en fer.

Mohns, B., Applegate, G.B. et Gilmour, D.A. 1988. Biomass and productivity estimations for community forest management: a case study from the hills of Nepal - II. Dry matter production in mixed young stands of Chir pine (*Pinus roxburghii*) and broad leaved species. Biomass 17: 165-184.
Népal: Rendements

La biomasse sur pied était de 15 t/ha (pins 7,74, feuillus 7,26) sur le versant sud, et de 41,77 t/ha (pins 29,73, feuillus 12,04) sur le versant nord. La production annuelle de matière sèche variait entre 4,50 t/ha/an (pins 2,27, feuillus 2,23) et 10,82 t/ha (pins 6,74 pin, feuillus 4,08).

Mooney, J.W.C., 1962. The tropical shelterwood system in the high forest of Ghana. Commonwealth Forestry Review 41 (3): 205-208.
Ghana: Aménagement
L'étude porte sur la nécessité de définir des objectifs clairs et sur l'aménagement d'essences incompatibles. La plupart des bois précieux sont des essences d'ombre à croissance lente. On peut obtenir des volumes supérieurs avec des espèces de lumière. La production est écoulée sur le marché local, plus que sur le marché d'exportation. Le mode de régénération par coupes progressives tropicales est considéré comme inapproprié pour la production d'essences de "qualité".

Mopri Bilan 1987. Essais comportement *Cedrela odorata*. CTFT (inédit).
Côte d'Ivoire: Rendement
Les peuplements purs de *Cedrela odorata* se sont avérés plus productifs que les peuplements mélangés de *C. odorata* et *Terminalia ivorensis*.

Moraes de Jesus, R. et Brouard, J.S. 1989. Eucalyptus-Leuceana mixture experiment. I. Growth and Yield. International Tree Crops Journal 5: 257-269.
Brésil: Rendement
Expérience portant sur *E. urophylla* et deux variétés de *L. leucocephala*. A l'âge de 7 ans, le taux de survie des eucalyptus variait de 75 pour cent (témoin) et 50 pour cent (mélange). Le taux de survie de *Leucaena* était de 95 pour cent. Le rendement de l'eucalyptus a été plus élevé dans les parcelles témoins que dans les parcelles mixtes, et dans celles-ci il a été plus élevé que celui de *Leucaena*. L'engrais inorganique a probablement réduit la fixation de N par *Leucaena*.

Morris, A.R. 1986. Soil Fertility and Long Term Productivity of *Pinus patula* in Swaziland. Unpublished Thesis for PhD, Reading University (UK). pp. 398.
Swaziland: Sols
Estimations de l'exportation de nutriments, de la teneur en éléments nutritifs du peuplement exploitable, de la teneur du sol en éléments nutritifs et de l'exportation de nutriments dans les bois récoltés.

Moss, D. 1979. Even-aged plantations as a habitat for birds. In: The ecology of even-aged forest plantations. Proceedings of the meeting of Division I, IUFRO, Edinburgh, Sept. 1978. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge (UK), 1979.
Royaume-Uni: Faune sauvage
La diversité faunistique augmente à la limite entre deux habitats. Le déclin d'une espèce s'explique sans doute davantage par la disparition de ses ressources alimentaires que par la présence d'arbres (par exemple on trouve des corbeaux et des moutons dans les landes). La diversité structurelle (tous les âges) est aussi importante que la diversité spécifique.

Muir, W.D. 1970. The problem of maintaining site fertility with successive croppings. Australian Journal of Science 32 (8): 316-324
Général: Sols
Le déclin de la productivité des cultures de la deuxième révolution semble limité aux sols naturellement peu fertiles.

Murray, M.D. et Miller, R.E. 1986. Early survival and growth of planted Douglas-fir with red alder in four mixed regimes. Pacific North West Research Station, US Dept. of Agriculture, Forest Service, pp. 13.
Etats-Unis: Aménagement
Le maintien jusqu'à 6-8 ans de 1 250 aunes d'Oregon à l'hectare n'a pas eu d'effets négatifs sur le sapin de Douglas dans la chaîne des Cascades.

Murray, M.D. et Leonard, P.C. 1990. Growth of trees and stand structure in mixed stands of Pacific Silver fir and western hemlock. US Dept. of Agriculture, Forest Service Research Paper PNW-RP-431 pp. 12.
Etats-Unis: Aménagement
Analyse de six peuplements mixtes de tsugas et de sapins argentés. Le tsuga (*Tsuga heterophylla*) a une croissance initiale en hauteur plus rapide, mais le sapin argenté (*abies amabilis*) a une croissance plus rapide à partir d'environ 35 ans. Il faut donc éviter d'éliminer le sapin au cours d'éclaircies précoces.

Muttiah, S. 1965. A comparison of three repeated inventories of Sundapola mixed selection working cycle and future management. Ceylon Forester 7 (1/2): 3-35.
Sri Lanka: Aménagement
Mélange de *Swietenia macrophylla* avec *Tectona grandis* et *Artocarpus integrifolius*. Age inconnu. *S. macrophylla*: 59 à 84 pour cent du peuplement (en nombre de tiges), *T. grandis* 2 à 15 pour cent et *A. integrifolius* 8 à 19 pour cent. Volume: 94 à 155 m^3/ha (diamètre: jusqu'à 58 cm), mais les arbres de plus de 78 cm de diamètre ont été abattus en 1955-60. Abondante régénération de l'acajou. Il est proposé de traiter la plantation comme une forêt jardinée, de manière à obtenir une structure de tous les âges.

Muttiah, S. 1991. Communication personnelle
Sri Lanka: Aménagement
Plantations de Sundapola établies vers 1901. La possibilité de conversion en une plantation inéquienne (pure) a été reconnue au début des années 50. Mais l'acajou n'aurait pas pu être établi sans le mélange. Il est probablement à déconseiller de s'orienter vers une plantation pure. Coupe effectuée avec grand soin.

Neil, P.E. 1990. Growing Sandalwood in Nepal - Potential Silvicultural methods and research priorities. In: Proceedings of the Symposium on Sandalwood in the Pacific, April 1990, Honolulu, Hawaii. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-122. pp. 72-75.
Népal, Inde: Aménagement
Brève description de propositions d'aménagement sylvicultural.

Nelson, T.C. 1964-65. Growth models for stands of mixed species composition. Proc. Soc. Amer. For. 1964, 1965, pp. 229-231.
Etats-Unis: Rendement
Un modèle de croissance pour les peuplements mélangés, basé sur une théorie simplifiée, est proposé.

Ng, F.S.P. 1991. Communication personnelle
Malaisie: Aménagement
Les plantations du Kepong ont été établies pour servir de placettes de démonstration sous *Albizia falcataria*, qui a été supprimé. Les diptérocarpacées ont eu une bonne croissance, mais les eucalyptus n'ont pas réussi. Des essences de sous-étage se sont régénérées naturellement. En 30 ans, une forêt mélangée avait été constituée. Au bout de 60 ans, elle a été utilisée comme zone de loisirs.

Ng, F.S.P., Zulkifly hin Haji Mokhtar, Ahmad Abdul Ghani bin Abdul Aziz 1982. *Leucaena leucocephala* as a tall cover crop for sawlog plantations. In: *Leucaena* Research in the Asian-Pacific region, Singapore 1982, pp. 113-118. IDRC, Canada.
Malaisie: Aménagement, peuplements de couverture.
Leucaena a été utilisé comme peuplement de couverture haut avec *Tectona grandis* et *Araucaria hunsteinii*. L'espèce s'avère prometteuse pour éliminer *Imperata*, mais moins efficace pour éliminer *Pueraria et Centrosema*.

Nielsen, P. 1991. (Forest Research Branch, Queensland)
Communication personnelle

Nogueira, J.C.B. 1977. Reflorestamento heterogeneo com essencias indigenas. Boletim. Tecnico, Instituto Florestal, Sao Paulo 24: 1-77
Brésil: Aménagement
Description du reboisement d'une petite surface de forêt fluviale dégradée. Au bout de 22 ans, une vigoureuse forêt tropicale semi-décidue s'était développée.

Norsdtroem, L. 1964. Ek och gran. (Chêne et épicéa). Skogen 21.
Suède: Aménagement
Présentation d'un régime sylvicultural permettant de régénérer les chênes dans un mélange par groupes avec des épicéas. L'objectif du régime est d'obtenir un peuplement pur de chênes de qualité supérieure.

Novais, R.F. de et Poggiani, F. 1983. Deposicao de folhas e nutrientes em plantacoes florestais puras e concoriadas de Pinus e Liquidambar. (Chute des feuilles et retour des éléments nutritifs dans des plantations pures et mixtes de *Pinus* et de *Liquidambar*). IPEF N° 23: 57-59.
Brésil: Sols
L'hétérogénéité des feuilles jonchant le sol du peuplement mélangé semble accélérer la décomposition de la litière et favoriser le recyclage des éléments nutritifs.

Nwoboshi, L.C. 1983. Potential impacts of some harvesting options on nutrient budgets of a *Gmelina* pulpwood plantation ecosystem in Nigeria. In: IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity, Seattle, Washington, Août 1982. General Technical Report, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, US Dept. of Agriculture Forest Service (1983), N° PNW-163.
Nigéria: Sols. Aménagement
Données sur les nutriments d'une plantation de *Gmelina arborea* âgée de 10 ans. Des informations sur le sol et sur l'érosion sont également fournies.

Odendaal, P.B. et Bigalke, R.C. 1979. Habitat selection by bushbuck in a disturbed environment. South African Forestry Journal 108: 39-41.
Afrique du Sud: Faune sauvage
Cinq animaux ont été suivis par radio. Une forêt indigène de feuillus a satisfait la totalité de leurs besoins. Les animaux préfèrent les zones ayant subi une coupe rase la nuit, et les plantations denses de *Pinus radiata* et *P. elliottii* le jour. Les plantations d'*Eucalyptus diversificolor* sont les moins appréciées.

Okafor, J.C. 1977. Development of forest tree crops for food supplies in Nigeria. Forest Ecology and Management 1 (3): 235-247.
Nigéria: Social
L'importance des arbres à fruits est soulignée. Leurs besoins sylviculturaux ne sont pas connus.

Oliver, C.D. 1980. Even-aged development of mixed-species stands. Journal of Forestry 78: 201-203.
Amérique du Nord: Aménagement
Les forêts stratifiées ne doivent pas être inéquiennes. Certains mélanges - par exemple, ceux de sapins de Douglas et de tsugas occidentaux - peuvent avoir une surface terrière plus élevée que les peuplements purs de l'une ou l'autre essence.

Palmer, J.R. 1986. Jari: Lessons for land managers in the tropics. Bois et forêts des Tropiques 212 (2): 16-27
Brésil: Aménagement
La préparation du site endommage le sol. Le site ne convient pas bien à *Gmelina* (25 pour cent seulement de la superficie sont appropriés).

Pandey, D. 1992. Assessment of tropical forest plantation resource. Department of Forest Survey, Swedish University of Agricultural Sciences (inédit).

Paschke, M.W., Jeffrey, O.D. et David, M.B. 1989. Soil nitrogen mineralization in plantations of *Juglans regia* interplanted with actinorhizal *Elaeagnus umbellata* ou *Alnus glutinosa*. Plant and Soil 118: 33-42.
Etats-Unis: Sols. Rendement
Etude de la minéralisation de l'azote sous des noyers de 18 ans plantés en peuplement pur ou en intercalaire 3:1 avec des oliviers d'automne et des aulnes. L'augmentation de la minéralisation de N a été sensible sous les oliviers, et moins marquée sous les aulnes. Jusqu'à 18 kg/ha/an = 13,5 pour cent des réserves totales en azote sous oliviers et 52 kg/ha/an seulement dans les placettes témoins. La croissance du noyer est liée à la minéralisation de l'azote.

Peace, T.R. 1957. Approach and perspective in forest pathology. Forestry 30: 47-56.
Général: Maladies
Analyse du problème. "Les hypothèses d'ordre général conduisent à des simplifications erronées. Nous savons malheureusement peu de choses sur la santé et les maladies des arbres."

Peck, K.M. 1990. Habitat preferences of birds: the importance of diversity in woodlands. In Ecology of Mixed Species Stands of Trees. British Ecological Society et IUFRO Div 2.01 Symposium, Edinburgh.
Royaume-Uni: Faune
Le nombre d'espèces (passereaux) est lié à la richesse et la diversité des essences forestières. Les préférences pour certains arbres changent avec les saisons car les ressources en aliments se modifient.

Perera, W.H. 1962. The development of forest plantations in Ceylon since the 17th century. Ceylon Forester 5(3): 142-151.
Sri Lanka: Aménagement
Introduction de *Swietenia macrophylla* sous *Artocarpus heterophyllus* âgés de 3 ans à partir de 1890. Plantation d'enrichissement de *S. macrophylla* et *Cedrela mexicana* et introduction de *S. macrophylla* sous une deuxième révolution de tecks.

Perry, D.A. 1979. Variation between and within tree species. In Ecology of Even-aged Plantations. Ford, E.D., Malcolm, D.C. et Atterson, J (eds). pp. 71-98.
Général: Ecologie

Perry, D.A. et Maghembe, J. 1989. Ecosystem concepts and current trends in forest management: time for reappraisal. Forest Ecology and Management 26: 123-140
Général: Ecologie, économie
Les critères économiques actuels négligent un certain nombre de facteurs importants, comme la viabilité durable et la diversité.

Perry, D.A., Bell, T. et Amaranthus, M.P. 1990. Mycorrhizal fungi in mixed-species forests and other tales of positive feedback, redundancy and stability. In: Ecology of Mixed Species Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO Div 2.01 Symposium, Edinburgh.
Etats-Unis: Sols
L'influence des champignons mycorrhizés sur la concurrence entre les différentes espèces végétales montre que ces champignons transforment une interaction négative en une interaction neutre ou positive (augmentation des rendements). Ils relient les arbres entre eux par leurs hyphes, dans lesquels le carbone et les éléments nutritifs circulent probablement.

Phillips, D.R. et Abercrombie, J.A. 1987. Pine-hardwood mixtures - A new concept in regeneration. Southern Journal of Applied Forestry. 11 (4) 192-197.
Etats-Unis: Aménagement
Ce document propose un régime, dans lequel des feuillus régénérés naturellement sont conservés en même temps que des jeunes plants de pin.

Pierlot, R. 1955. Le reboisement en placeaux espacés. Bulletin d'information de l'INEAC 4 (5): 325-338.
Zaïre: Aménagement
Système de régénération, consistant à planter en groupes denses espacés.

Poole, B. 1989. Forest health issues in South-East Asia. New Zealand Journal of Forest Science 19 (2/3): 159-162
Asie: Ecologie, ravageurs et maladies
Etude des insectes ravageurs importants d'Asie du Sud-Est.

Poore, M.D., Burgess, P.F., Palmer, J.R., Reitenbergen, S. et Synnott, T.J. 1989. No Timber without Trees. Earthscan Publications Ltd., London WC1H ODD. 252 pp.
Général: Aménagement
Examen général portant principalement sur les politiques d'aménagement des forêts naturelles.

Prasad, K.G., Singh, S.B., Gupta, G.N. et George, M. 1985. Studies in changes in soil properties under different vegetations. Indian Forester 111 (10): 794-7911
Inde: Sols
Après 40 ans, la concentration de carbone organique avait diminué dans la couche de 18 cm supérieure du sol. Forêt naturelle; plantation mélangée; plantation de teck 1,7:-1,5:0,8 pour cent P_2O_5 13:17:10 ppm. Mg total 1,6:1,5:0,9 mais le Mg échangeable a augmenté sous teck. Le sol serait moins fertile sous teck.

Pryor, S.N. et Savill, P.S. 1986. Silvicultural systems for broadleaved woodland in Britain. Oxford Forestry Institute (UK) Occasional Paper 32.
Royaume-Uni: Aménagement
Il n'est pas prouvé que la production est plus élevée dans les forêts jardinées, mais la thèse selon laquelle elle aurait une plus grande valeur est plus défendable.

Queensland 1990. Annual Report for 1989. Queensland Forest Department.
Australie: Aménagement
Contient un état des superficies plantées par espèces.

Rackham, O. 1990. Mixtures, mosaics and clones: the distribution of trees within European woods. In: Ecology of Mixed Species Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO Div 2.01 Symposium, Edinburgh.
Europe: Ecologie
Les peuplements naturels purs se rencontrent souvent dans des environnements extrêmes, *Pinus mugo*, *P. cembra* et *Alnus viridis* à des altitudes élevées, *Betula* dans l'extrême nord, *Cupressus sempervirens* sur les terrains calcaires orientés au sud en Crète, *Quercus Petraea* dans le climat atlantique de l'ouest de la Grande_Bretagne, *Alnus glutinosa* dans les vallées tourbières, *Quercus et Fagus* dans les zones broutées.

Radwan, M.A. et Debell, D.S. 1988. Nutrient relations in coppiced black cottonwood and red alder. Plant and Soil 106 (2): 171-177
Etats-Unis: Aménagement
Les plantations mélangées de *Populus trichocarpa* et *Alnus rubra* semblent prometteuses car la croissance du peuplier est accélérée.

Rai, S.N. 1990. Status and cultivation of Sandalwood in India. In: Proceedings of the Symposium on Sandalwood in the Pacific, April 1990, Honolulu, Hawaii. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-122. pp. 66-71.
Inde: Aménagement, écologie, rendements, commercialisation
Bref exposé sur la culture du santal.

Ram Prasad 1988. Sal plantation on bauxite mined out site of Madhya Pradesh. Journal of Tropical Forestry 4 (1): 68-73.
Inde: Sols
Diverses méthodes ont été essayées pour reverdir un terrain recouvrant d'anciennes mines. On a notamment planté des suifs (*Shorea robusta*) en mélange avec *Grevillea robusta*, *Euclayptus camaldulensis*, *Toona ciliata* et *Pinus kesiya*.

Ram Prasad et Camire, C. 1988. Afforestation of dolomite mines overburdens in Madhya Pradesh. Journal of Tropical Forestry 3 (2): 124-131.
Inde: Aménagement. Rendement
Cultivés avec des bambous, *Acacia auriculiformis, A. campylacantha, Gmelina arborea, Eucalyptus hybrid* et *Pongamia pinnata* ont eu une croissance en hauteur et en diamètre et un taux de survie plutôt meilleurs qu'en l'absence de bambous. *Albizia procera* a eu une croissance un peu moins bonne.

Ratcliffe, P.R. et Petty, S.J. 1988. The management of commercial forests for wildlife. Nat. Environ. Res. Council. Inst. Terrestrial Ecology (U.K.) Symposium Proceedings: 17: 177-187.

Raunio, A.L. 1991. Communication personnelle
Ethiopie: Aménagement
Grevillea robusta, planté dans un peuplement recépé d'*Eucalyptus grandis* peu dense - semble prometteur. On plante actuellement *Pinus radiata* en mélange à 25 pour cent avec *Pinus patula* ou avec *Cupressus lusitanica*. Les deux mélanges sont en layons. *Grevillea* n'est pas brouté par les céphalophes.

Reddell, P. 1990. Increasing productivity in plantings of *Casuarina* by inoculation with *Frankia*. In: Advances in *Casuarina* Research and Utilization, Desert Development Center, American University in Cairo, Box 2511, Cairo, Egypt.
Queensland, Zimbabwe: Sols
L'inoculation de *Frankia* peut entraîner une augmentation de 100 pour cent de la production de bois dans des peuplements de *C. cunninghamiana* âgés de 4 ans. Si les apports d'éléments nutritifs ne contiennent pas de P, la croissance peut être réduite de 75 pour cent.

Reddell, P., Rosbrook, P.A., Bowen. G.D. et Gwaze, D. 1988. Growth responses in *Casuarina cunninghamiana* plantings to inoculation with Frankia. Plant and Soil 108: 79-86
Australie, Zimbabwe: Sols
Une souche de *Frankia* a accru de 200 pour cent la croissance en hauteur à l'âge de 14 mois au Zimbabwe. Des accroissements de la production ligneuse allant jusqu'à 150 pour cent à l'âge de 45 mois ont été notés dans le Queensland. L'application de P a accru la production ligneuse, de 250 pour cent au maximum, par rapport aux témoins.

Reese, K.P. et Ratti, J.T. 1988. Edge effect: a concept under scrutiny. Trans. 53rd. North American Wildlife and Natural Resources Conference. pp. 123-136.

Rehmani, A.R. 1989. The great Indian bustard. Final Report. Bombay Natural History Society, India.

Rennie, P.J. 1962. Some long-term effects of tree growth on soil productivity. Commonwealth Forestry Review 41 (3): 209-213.
Royaume-Uni: Sols
Comparaisons de sols sous des feuillus et des conifères âgés de 70 ans sur des landes *Calluna*, dont les sols étaient appauvris. Les conifères ont accru la porosité dans la couche humifère plus que les feuillus. Les deux espèces ont appauvri les sols minéraux en dessous de 30 cm, mais les conifères plus que les feuillus. Les conifères ont abaissé le pH de 3,3 à 3,1, les feuillus l'ont fait monter à 3,5.

Robinson, J.B.D. 1967. The effect of exotic softwood crops on the chemical fertility of a tropical soil. East African Agricultural and Forestry Journal 33: 175-189.
Kenya: Sols
Comparaison d'une forêt naturelle, de conifères de la première et de la deuxième révolution et d'une plantation de feuillus succédant à des conifères.

Robinson, J.B.D., Hosegood, P.H. et Dyson, W.G. 1966. Note on a preliminary study of the effects of an East African softwood crop on the physical and chemical condition of a tropical soil. Commonwealth Forestry Review 45 (4): 359-365
Kenya: Sols
Examen de sols sous une plantation de *Cupressus lusitanica* âgés de 16 ans (volume sur pied 420 arbres/ha) et sous une forêt secondaire voisine.

Robinson, R.K. 1973. Micorrhyzas and "second rotation decline" in *Pinus patula* in Swaziland. South African Forestry Journal 84: 16-19.
Swaziland: Sols
Un rapport positif a été constaté entre le nombre moyen de racines mycorrhyzées, le degré d'infection et la vigueur du peuplement au cours des deux révolutions. Le manque de vigueur peut résulter d'une faible activité biologique, attestée par l'accumulation de litière, l'absence de lombrics et le manque de mycorrhyzes.

Rodgers, W.A. 1992. Managing forests for biodiversity in India: a review of concepts and practices. Manuscript. Wildlife Institute of India, Dehra Dun. 75 pp.

Ryan, E.A. et Alexander, I.J. 1990. Micorrhizal aspects of improved Sitka spruce growth in mixed stands. In: Ecology of Mixed Species Stands of Trees. British Ecological Society and IUFRO Div 2.01 Symposium, Edinburgh.
Royaume-Uni: Sols
Il est démontré que *Sullius variegatus*, un micorrhyze associé à *Pinus sylvestris* mais pas à *Picea sitchensis*, prolifère dans les plantations mélangées et peut dégrader rapidement les protéines, laissant 87 pour cent des produits de dégradation des protéines en solution, qui peuvent alors être absorbés par l'épicéa de Sitka.

Ryan, P.A. 1985. Hoop pine second rotation growth and nutrition. Paper presented to Second Rotation establisment: Problems, Possible Solutions and Identification of Research Needs Conference. Topic 2.2. Gympie, Queensland.
Australie: Rendement. Aménagement

Salwasser, H. 1985. Integrating wildlife into the managed forest. In: A Symposium on Forestry and Wildlife Management in Canada. Forestry Chronicle, 146-149.

Salswasser, H. 1990. Sustainability as a conservation paradigm. Cons. Biology 4 (3): 213-215.

Samraj, P., Chinnamani, S. et Haldorai, B. 1977. Natural versus man-made forest in the Nilgiris with special reference to run-off, soil loss and productivity. Indian Forester 103: 460-465.
Inde: Sols. Rendement
Sous *Eucalyptus globulus* et *Acacia mearnsii*, le ruissellement a été moins important que sous une forêt naturelle, mais plus élevé que dans les parcelles enherbées protégées et les parcelles de *Cytisus scoparius*. Rendements du mélange d'eucalyptus et d'acacias: 700 tiges/ha, 482 m^3/ha à l'âge de 10 ans; rendements des plantations pures: Eucalyptus: 322 m^3, 2 500 tiges/ha; Acacia: 125 m^3, 1 600 tiges/ha.

Sands, R. 1983. Physical changes to sandy soils planted to radiata pine. In: IUFRO Symposiun on Forest Site and Continuous Productivity. pp. 146-152.
Australie: Sols
Etudie la relation entre la croissance des racines et la qualité du sol. Le maintien de la matière organique du sol est fondamental pour la productivité, car la matière organique accroît la capacité au champ, la teneur en azote et la capacité d'échange de cations totale.

Savill, P.S. et Evans, J. 1986. Plantation silviculture in temperate regions with special reference to the British Isles. Clarendon Press, Oxford.
Région tempérée: Manuel
La foresterie artificielle est dominée par les plantations pures équiennes, en raison de leurs avantages économiques. Les cas où les mélanges peuvent être appropriés sont étudiés.

Schlesinger, R.C. et Williams, R.D. 1984. Growth response of black walnut to interplanted trees. Forestry Ecology and Management 9 (3): 235-243.
Etats-Unis: Rendement

A 13 ans, l'adjonction d'*Elaeagnus*, de *Robinia* et d'*Alnus glutinosa* a augmenté la croissance en diamètre du noyer noir en certains endroits (mais pas partout). *E. umbellata* a entraîné un accroissement de 56 à 351 pour cent dans 4 stations sur 5 dans l'Illinois, le Missouri et l'Indiana. Toutes les espèces ont entraîné un accroissement de 100 pour cent sur un site d'altitude.

Schubert, T.H. 1985. Preliminary results of Eucalyptus/legume mixtures in Hawaii. Nitrogen Fixing Tree Research Reports 3: 65-66.
Hawaï: Rendement
Récapitulation des mélanges *Eucalyptus/Albizia/ Acacia* étudiés par Debell et al. Décrit les essais sur les proportions de chaque essence utilisée en mélange. Dans les mélanges *Eucalyptus: Albizia* à 50:50 et 66:34, la croissance en diamètre de l'eucalyptus a été supérieure de 6 à 15 pour cent à celle qui a été constatée dans les mélanges contenant davantage d'eucalyptus, mais aucune information n'est fournie sur les volumes sur pied d'eucalyptus.

Schutz, C.J. 1982. Monitoring the long-term effects of management practices on site productivity in South African Forestry. South African Forestry Journal 120: 3-6.
Afrique du Sud: Aménagement, sols
Rien n'indique que le déclin de productivité est imputable aux pratiques d'aménagement. Il arrive que la litière s'accumule sur des sites pauvres portant des peuplements aménagés intensivement.

Schutz, J.P. 1989. Zum problem in Mischbestanden. Schweiz. Z. Fortswesen 140 (12): 1069-1083.
Suisse: Rendement
Les mélanges d'épicéas et de hêtres auraient une meilleure croissance que l'une de ces essences cultivée en peuplement pur.

Schutz, J.P. 1990. Die waldbaulichen Moeglichkeiten und Grenzen von Mischbestockungen. (Possibilités et limites sylviculturales des forêts mélangées). IUFRO World Congress, Montreal.
Suisse: Aménagement
Les tendances naturelles à la diversité doivent être encouragées.

Serrano, R.C., Villanueva, T.R. et Sims, B.D. 1976. Surface run-off and sedimentation under *Albizia falcataria*, *Anthocephalus chinensis* and mixed secondary stands. Pterocarpus 2 (1): 35-46.
Philippines: Sols
Ce sont les peuplements purs d'*Albizia falcataria* qui ont de loin fourni la meilleure couverture de protection.

Shainsky, L.J. et Radosevitch, S.R. 1988. Douglas fir and red alder competition in mixed and monoculture stands. Vegetation Competition and Responses. Proceedings 3rd Annual Vegetation Management Workshop. Vancouver B.C., Canadian Forest Service. pp. 2.
Amérique du Nord: Ecologie.
Etude des interactions entre les deux essences plantées à une densité allant de 1 à 16 arbres/m2. A ces densités, le sapin de Douglas a réduit la surface feuillue de l'aulne et ce phénomène s'est accentué au fur et à mesure que la densité du sapin de Douglas lui-même augmentait, mais les paramètres de croissance des deux essences ont été essentiellement affectés par les densités d'aulnes.

Singh, A.K. et Totey, N.G. 1985. Physico-chemical properties of bhata soils of Raipur (Madhya Pradesh) as affected by plantations of different species. Journal of Tropical Forestry 1(1): 61-69.
Inde: Sols
Les sols des plantations sont étudiés sous *Tectona grandis*, *Eucalyptus hybrid*, *Emblica officinalis* et "mélanges". La CEC, les cations échangeables et la matière organique sont plus élevés sous les plantations mélangées, mais la densité de peuplement et la croissance sont faibles. On peut se demander jusqu'à quel point les modifications du sol peuvent être attribuées à la couverture d'arbres.

Singh, A.K., Arun Prasad, Khatri, P.K. et Balvinder Singh 1987. Physico-chemical properties of soils developed over gneissic rocks under different forest covers in Nagri range of South Raipur (Madhya Pradesh). Journal of Tropical Forestry 3 (1): 37-47.
Inde: Sols
L'étude porte sur quatre couvertures forestières: teck, suif, mélanges avec suif et mélanges sans suif.

Singh, S.B., Nath, S. Pal, D.K. et Banerjee, S.K. 1985. Changes in soil properties under different plantations of the Darjeeling Forest Division. Indian Forester 111 (2): 90-98.
Inde: Sols
Les sols sous végétation mixte ont les meilleures propriétés.

Singh, S.P. et Sharma, R.S. 1983. Permanent sample plots in stands of mixed species. Indian Forester 109 (7): 449-457.
Inde: Rendements
Avec une proportion élevée de *Trewia nudiflora*, *Toona ciliata* et *Bombax ceiba*, les volumes ont été plus importants.

Siregar et al. 1986. Growth of *Swietenia macrophylla* and intercropped *Leucaena leucocephala* in the residual forest of *Melaleuca leucadendron*. Leucaena Research Report 7:82.
Indonésie: Rendement
Les résultats médiocres peuvent être dus à l'allélopathie de *Melaleuca leucadendron*, à la sécheresse ou à une carence en soufre.

Smelyanetz, V.P., Lopatina, N.V. et Lomakin, M.D. 1981. Forest resistance to insect pests in relation to plant population patterns. Zeitschrift fuer angewandte Entomologie 92: (3) 217-244.
URSS: Ecologie, ravageurs et maladies
Pinus silvestris peut être utilisé comme hôte alternant (pour distraire les insectes ravageurs) dans des cultures de *Pinus pallasiana*.

Smith, D.M. 1962. The practice of silviculture. John Wiley and Sons, 7th edition.
Manuel: Aménagement
Il faut avoir recours à des mélanges stratifiés si l'on veut maintenir des mélanges intimes dans les plantations. Il est pratiquement impossible de trouver des essences qui formeront des mélanges monostrates.

Smith, I.W., Marks, G.C., Featherston, G.R. et Geary, P.W. 1989. Effects of interplanted wattles on the establishment of eucalypts planted on forest sites affected by *Phytophtora cinnamoni*. Australian Forester 52 (2): 74-81.
Australie: Ecologie, ravageurs et maladies. Rendement.
Aucun effet des épicéas sur *P. cinnamoni* n'a pu être détecté. Les eucalyptus semblaient bien répondre, du point de vue de la croissance, à la plantation d'épicéas en intercalaires.

Soares, R.V. 1991. Conséquences écologiques et économiques des feux de forêt: l'exemple brésilien. Thème 5.3, Dixième Congrès forestier mondial, Paris, 1991. Actes Vol. 2: 471-480.
Brésil: Incendie

Solomon Islands 1988a. Notes on the use of mixtures and nurse crops in the establishment of plantations of high value spp. Forestry Note 30 7/88, Forest Department.

Solomon Islands 1988b. The status of *Securinega flexuosa* Muell. Arg. Forest Research Note 46 14/88, Forest Department.
Iles Salomon: Aménagement
Swietenia macrophylla a été planté avec *Securinega flexuosa*, *S. samoana*, *Leucaena leucocephala*, *Terminalia calamansanai*, *Schleinitschia novoguinensis*, *Glyricidia sepium* pour lutter contre le foreur des jeunes pousses *Hypsipylla*. Ecartement 3 m x 4 m ou 3 m x 5 m. *S.flexuosa* est l'espèce la plus prometteuse.

Soule, M.E. Ed. 1986. Conservation biology: science of scarcity and diversity. Sinauer Associates, Sunderland, Mass. U.S.A.

Spears, J.S. 1985. Deforestation issues in developing countries. The case for an accelerated investment program. Proceedings of the Twelfth Commonwealth Forestry Conference. pp 47-59.
Général: Economie

Sprent, J.I. 1985. Nitrogen fixation in arid environments. In: Plants for Arid Lands. George Allen and Unwin, London.
Général: Sols
Informations sur le ratio de nodulation des plantes fixatrices d'azote. Les sols arides ont souvent une forte teneur en azote sous forme de nitrate. Les espèces fixatrices d'azote à racines profondes (*Prosopis*) peuvent contribuer à accroître les concentrations de nitrate grâce à la minéralisation de la litière. Les légumineuses demandent de l'humidité et ne fixent pas l'azote lorsqu'elles sont sous stress.

Squire, R.O. 1983. Review of second rotation silviculture of *Pinus radiata* in southern Australia: establishment and expectations. In: IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity, Seattle, Washington, August 1982. General Technical Report, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, US Dept. of Agriculture Forest Service (1983), N. PNW-163.
Australie: Sols
L'amélioration des performances de la deuxième révolution au cours des années récentes est associée à l'augmentation des ressources en eau (paillage) et à l'accroissement des éléments nutritifs (application d'engrais, utilisation de légumineuses et maintien *in situ* de résidus d'abattage). L'azote peut améliorer l'absorption de l'eau par son effet sur les stomates.

Statham, P. 1990. The Sandalwood industry in Australia: a history. In: Proceedings of the Symposium on Sandalwood in the Pacific, April 1990, Honolulu, Hawaii. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-122. pp. 26-38.
Australie: exploitation
Historique de l'exploitation du santal en Australie.

Steinbeck, K. et Skinner, T.M. 1984. Growing short rotation forests in the southeastern USA. In: Bioenergy 84. Proceedings of conference June 1984 Goteborg, Sweden. Vol II. Biomass Resources. Elsevier Applied Science Publishers.
Etats-Unis: Sols
Mélanges de *Pinus occidentalis* et *Liquidambar styraciflua* avec *Alnus glutinosa* et *Robinia pseudoacacia*, deux essences fixatrices d'azote. Au bout de 5 ans, on n'a constaté aucune différence significative quant à l'impact des essences d'abres sur les éléments nutritifs, le pH ou la matière organique du sol. L'absence d'accrétion de N dans le sol est probablement due à la croissance rapide de *R. pseudoacacia* et au faible taux de survie de *A. glutinosa*.

Streets, R.J. 1962. Exotic forest trees in the British Commonwealth. Clarendon Press, Oxford.
Général: Aménagement

Styles, B.T. 1991. Communication personnelle

Sweet, G.B. et Burdon, R.D. 1983. The radiata pine monoculture: an examination of the ideologies. New Zealand Journal of Forestry 28 (3): 325-326.
Nouvelle-Zélande: Général

Tasmania Forestry Commission 1989. Forest Practices Code (draft). Forestry Commission, Tasmania. pp. 89.
Australie: Aménagement
Un code détaillé des méthodes d'exploitation des forêts naturelles.

Tham, A. 1988. Yield prediction after heavy thinning of birch in mixed stands of Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst.) and birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh). Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Yield Research, Report 23.
Suède: Production. Aménagement
Le rendement total le plus élevé a été obtenu quand l'épicéa était mélangé avec un peuplement d'abri de 800 bouleaux/ha. A des densités supérieures, la production d'épicéa était plus faible que dans un peuplement pur. Un peuplement d'abri de 500-600 bouleaux/ha est conseillé. Le peuplement d'abri doit être conservé pendant 20-30 ans.

Thomas, J.W. 1979. Wildlife habitats in managed forests, the Blue Montains of Oregon and Washington. Agric. Handbook N° 533. pp. 512. USDA: Forest Service.

Tisseverasinghe, A.E.K. et Satchithananthan, S. 1957. The management of Sundapola plantation. Ceylon Forester 3 (1): 82-93.
Sri Lanka: Aménagement. Rendement
Résumé des informations provenant d'une plantation mélangée d'*Artocarpus integrifolius* et de *Swietenia macrophylla*, âgée de 50 ans.

Tiwari, K.M. 1970. Interim results of intercropping miscellaneous species with main crop of taungya plantations to increase the productivity. Indian Forester 96 (9): 650-653.
Inde: Rendement
Des essences polyvalentes ont été introduites dans les espaces entre les lignes de suif de la plantation taungya. Un rendement supplémentaire d'environ 1 tonne/ha/an a été obtenu sur une révolution de 4 ans. Les essences utilisées sont *Albizia procera*, *Bauhinia variegata*, *Cassia fistula* et *Ougenia oojensis*.

Tourney, J.W. 1947. Foundations of silviculture upon an ecological basis. John Wiley and Sons.
Général: Manuel
Manuel contenant une étude détaillée des peuplements mélangés.

Tu, M.Z. et Yao, W.H. 1984. Studies on the influences of soil pH by different plant communities. Tropical and Subtropical Forest Ecosystem, Ding Hu Shan Forest Ecosystem Station, China 2: 110-113.
Chine: Sols
Une étude portant sur 26 plantations a montré qu'un mélange d'espèces légumineuses et non légumineuses a accru le pH. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec *Dalbergia odorifera* et *Cassia siamea*. Il est conseillé de planter *Calamus tetradactylus* pour accroître le pH et la rentabilité.

Turner, J. 1983. Maintenance and improvement of forest productivity in Australia: In: IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity, Seattle, Washington, August 1982. General Technical Report, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, US Dept. of Agriculture Forest Service (1983), N° PNW-163.
Australie: Sols. Aménagement
Décrit les activités sylvicoles (préparation du site, désherbage, application d'engrais) visant à accroître la productivité. Les principaux gains de productivité sont obtenus pendant la phase d'établissement.

Turvey, N.D., Attiwill, P.M., Cameron, J.N. et Smethurst, P.J. 1984. Growth of planted pine trees in response to variation in the densities of naturally regenerated acacias. Forest Ecology and Management (7): 103-107.
Australie: Sols. Aménagement
Aucune amélioration de croissance n'a été détectée pour le pin. On présume que l'acacia n'est pas l'espèce fixatrice d'azote la plus appropriée.

Uhart, E. 1962. Le reboisement et le développement de Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques N° 83: 15-29.
Madagascar: Aménagement
Une politique de reboisement pratiquée à Madagascar est commentée.

Un, C.R., Bing, J.Y. et Yung, N.Y. 1979. Study in mixed planting. Quarterly Journal of Chinese Forestry.
Chine: Aménagement
Mélanges de *Taiwania cryptomerioides* et *Paulownia taiwania*.

Velez, R. 1991. L'usage du feu en sylviculture. Mémoire, Thème 5.2. Dixième Congrès forestier mondial, Paris, 1991. Actes Vol 2: 461-470.
Général: Feu

Villamar, C.A. 1979. Silvipasture establishment for range type production of water buffalo. Sylvatrop Phillippine Forest Research Journal 4 (1) pp. 17-21.
Philippines: Aménagement
Leucaena leucocephala (1 360/ha, 82 pour cent de survie) et *Gmelina arborea* (202/ha, 52 pour cent de survie) dans des prairies de *Stylosanthes guyanensis* et de *Themeda triandra*.

Vink, A.T. 1970. Forestry in Suriname. Landbosbeheer, Suriname Forest Service.
Suriname: Aménagement
Des systèmes assez intensifs de plantations d'enrichissement et de plantations par bandes sont décrits.

Voogd, C.N.A. de 1928. Over kunstmatige menging van djati met wildhout. (A propos des mélanges artificiels de teck). Tectona 21: 527-533. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 612.
Indonésie: Aménagement
Des effets positifs peuvent être obtenus en mélangeant des essences qui pousseront juste en dessous des tecks. Les essences du mélange doivent rester vertes pendant la saison sèche, être faciles à cultiver et fournir un produit commercialisable.

Voron, P. 1979. The effect of industrial air pollution on the health of forest plantations in the Carpathian foothills. Lesovodstvo i Agrolesomeiioratsiya 53: 53-57
URSS: Environnement
Dans une étude sur les effets de la pollution, les peuplements mélangés se sont avérés plus résistants que les peuplements purs.

Waage, J. 1990. Exploration of biological control agents of *leucaena Psyllid* in tropical America. F/FRED Coordinating Unit, Bangkok. pp. 144-152.
Amérique centrale: Ravageurs
Décrit l'insecte et ses prédateurs dans leur aire d'extension naturelle.

Watt, A. 1990. Insect pest population dynamics effects of tree species diversity. In: Ecology of Mixed Species Stands of Trees. British Ecological Society et IUFRO Div 2.01 Symposium, Edinburgh.
Royaume-Uni: Environnement, ravageurs et maladies

Way, M.J. 1977. Pest and disease status in mixed stands vs. monocultures; the relevance of ecosystem stability. In: The Origin of Pest, Parasite, Disease and Weed Problems. pp. 127-138, Blackwell, Oxford.
Environnement: Ravageurs et maladies
Il est souligné que la diversité ne constitue pas en elle-même une garantie contre les ravageurs et les maladies. La diversité peut réduire les attaques en fournissant un camouflage, des barrières, des risques ou des hôtes alternants.

Wepf, W. 1955. Het begrip menging in djaticulturen. (Les mélanges dans les plantations de teck). Tectona 43: 290-294. Présenté dans Indonesian Forestry Abstracts, PUDOC, Wageningen, 1982. Abstract 596.
Indonésie: Aménagement
Le but du mélange est d'obtenir un sous-bois luxuriant. Il est préférable d'utiliser la communauté végétale naturelle.

Whitehead, D. 1981. An ecological overview of plantation forestry. New Zealand Journal of Forestry 26 (1): 14-19.
Nouvelle-Zélande: Environnement, écologie
Les dangers écologiques de la foresterie de plantation sont examinés. Certaines critiques qui sont faites aux forêts artificielles ne seraient pas justifiées.

Whitehead, D. 1982. Ecological aspects of natural and plantation forests. Forestry Abstracts 143 (10): 615-624.
Nouvelle-Zélande: Environnement, écologie
Une diversité importante n'entraîne pas toujours une stabilité et une productivité élevées. Il existe des peuplements purs qui ont une structure stable.

Whitmore, J.L. 1973. Myths regarding Hypsipyla and its host plants. In: First Symposium on Integrated Control of Hypsipyla. IICA-CTEI-Turrialba, Costa Rica.
Environnement, ravageurs et maladies
Des études quantificatives doivent être effectuées pour savoir si les jeunes plants peu ombragés sont attaqués par Hypsipyla (et, dans l'affirmative, dans quelle mesure).

Whitmore, J.L. 1991. Communication personnelle

Whitmore, T.C. 1984. Tropical Rain Forests of the Far East (2nd ed.). Oxford University Press (UK) pp. 352.
Extrême-Orient: Ecologie
Manuel d'écologie des forêts ombrophiles.

Wilcox, B.A. 1982. *In situ* conservation of genetic resources: determinants of minimum area requirements. In: World National Parks Congress, Bali 18-30. New Directions.

Wilde, S.A. 1964. Changes in soil productivity induced by pine plantations. Soil Science 97: 276-278.
Etats-Unis: Sols
Analyse de 156 peuplements de *Pinus banksiana*, *P. resinosa*, *P. strobus*, âgés de 10 à 50 ans. Le meilleur indicateur de la fertilité du sol reboisé est de loin la teneur en matière organique, qui est étroitement liée à la CEC et aux ressources totales en azote. Après l'âge de 35-40 ans, les peuplements de pin corrigent habituellement les carences temporaires du sol dues à la coupe, au brûlis etc.

Will, G.M. 1964. Dry matter production and nutrient uptake by *Pinus radiata* in New Zealand. Commonwealth Forestry Review 43: 57-70
Nouvelle-Zélande: Sols. Rendement
Enracinement à 6 m de profondeur en sols ponceux. Vitesse de croissance élevée due à l'abondance des précipitations (1 500 mm) et à un ensoleillement important. Accroissement annuel de la matière sèche compris entre 20 tonnes/ha (Classe de fertilité stationnelle II) et 45 tonnes (Classe de fertilité stationnelle I). Croissance maximale au cours des 10 premières années. Ensuite il n'est pas nécessaire d'apporter des engrais, car la décomposition de la litière et des rémanents couvre pratiquement les besoins des arbres.

Will, G.M. et Ballard, R. 1976. Radiata pine soil degrader or improver? New Zealand Journal of Forestry 21 (2): 248-252.
Nouvelle-Zélande: Sols
Lorsqu'une dégradation des sols a été constatée sous des forêts pures de conifères, elle résulte d'un mauvais aménagement et de l'exploitation. Elle peut être corrigée par des apports d'engrais.

Williamson, M. 1990. War and forests: South Vietnam. New Zealand Forestry: 18-21.
Viet Nam: Aménagement
Diptérocarpacées (*Dipterocarpus alatus* et *Hopea odorata*) sous un peuplement de protection d'*Acacia auriculiformis*.

Wilson, E.O. (Ed), 1988. Biodiversity. National Academic Press, Washington, D.C. 521 pp.

Wilson, W.L. et Johns, A.D. 1982. Diversity and abundance of selected animal species in indisturbed forest, selectively logged forest and plantations in East Kalimantan, Indonesia. Biological Conservation 24: 205-218.
Indonésie: Faune et flore sauvages
Petites plantations (âgées de 6 à 24 mois) de *Pinus*, *Eucalyptus*, *Gmelina*, *Anthocephalus* et *Paraserianthes*. La faune sauvage utilisant ces plantations vient de la forêt avoisinante, un petit nombre d'espèces seulement peut survivre dans une monoculture.

Wilten, W. 1955. Aspects de la sylviculture au Mayumbe. Bull. Agric. Congo-Belge Vol 46 (2): 319-328.
Zaïre: Aménagement, régénération
Les méthodes de culture de *Terminalia superba* sont expliquées.

Wimbush, S.H. 1945. The management of cypress plantations in Kenya. Forest Department of Kenya, Pamphlet N° 11.
Kenya: Aménagement. Environnement, ravageurs et maladies.
Les plantations pures de cyprès étant considérées comme risquées, il est recommandé de mélanger les cyprès avec des feuillus. *Grevillea robusta* est l'une des essences conseillées. Un régime d'aménagement est proposé.

Woinarsky, J.C.Z. 1979. Birds of a eucalyptus plantation and adjacent natural forest. Australian Forester Vol. 42 (4): 243-247.
Australie: Faune sauvage
L'étude compare la diversité dans une plantation d'*Eucalyptus botryoides* et dans une forêt naturelle adjacente composée d'un mélange d'essences d'*Eucalyptus dives*. Diversité légèrement plus élevée dans la forêt naturelle.

Wood, P.J. et Dawkins, H.C. 1971. Forest monocultures in the tropics - ecological anxieties. Mimeographed Report, Oxford Forestry Institute Library pp. 3
Tropiques: Aménagement
Il est rare que des plantations soient établies dans des forêts plurispécifiques. L'érosion peut être importante sur les sols sableux. Les plantations à racines profondes transpirent davantage d'eau que les prairies, mais l'effet du pacage, du piétinement des bêtes ou du brûlis est plus important que le type de couverture. L'exclusion de grands animaux sauvages provoque une concentration excessive ailleurs.

Wuelisch, G. von, Muhs, H.J. et Gebarek, T. 1990. Competitive behaviour of clones of *Pice abies* in monoclonal mosaics vs. intimate clonal mixtures. Scandinavian Journal of Forest Research, 5 (3): 397-402.
Allemagne: Rendement
L'effet de la concurrence entre les clones de différentes provenances, dans des cultures monoclonales ou mélangées, est étudié. Des différences de compétitivité ont été détectées. Les réactions positives de compétitivité peuvent augmenter les rendements et réduire les risques, grâce à la diversité génétique.

Young. A. 1976. Tropical Soils and Soil Survey. Cambridge University Press (UK).
Tropiques: Sols
Manuel sur les sols tropicaux.

Zhai, M.P., Xia, Z.Y. et Cao, Y.Y. 1987. Element contents and their annual and seasonal variations in the leaves of trees in *Pinus tabulaeformis* plantations. Scientia Silvae Sinicae 23 (3): 286-298.
Chine: Sols
Les concentrations de N, P, K, Ca et Mg dans les feuilles de *Acer truncatum* dépassaient de 5 à 317 pour cent celles qui ont été relevées dans les pins. On en déduit que l'érable se prête à la culture en mélange avec le pin.

Zang Xian, Xu Guang, Zhen Hong, Zhon Xu et Zhon Chong, 1980. Repeated planting of *Cunninghamia lanceolata* and soil toxicity. In Ecological studies on the artificial *C. lanceolata* forests. Institute of Forestry and Pedology. Academia Sineca.
Chine: Sols
Les plantations répétées de *C. lanceolata* entraînent une "fatigue des sols" attribuée à "une activité plus intense sur l'oxydation de certains composés polyphénolés contenant du méthoxyle".

Zwaan, J.C. de. 1981. The silviculture of blackwood (*Acacia melanoxylon*). South African Forestry Journal 121: 38-43.
Afrique du Sud: Aménagement
Etude des performances et des besoins de l'acacia d'Australie. On essaie actuellement un mélange avec *Pinus radiata* car on pensait que cette espèce avait un enracinement plus profond et résistait mieux au vent, mais elle s'est avérée tout aussi vulnérable au déracinement par le vent. Des mélanges acacia d'Australie/eucalyptus (*E. diversicolor* et *E. microcorys*) ont également mal réussi et l'acacia d'Australie a été étouffé.

Zwolinski, J.B. 1990. Intensive silviculture and yield stability in tree plantations: an ecological perspective. South African Forestry Journal 155: 33-36.
Général: Environnement, écologie.
Place la sylviculture des plantations dans un contexte écologique et recommande quelques méthodes écologiquement rationnelles.

ANNEXE 2

SOLS

Les plantations monospécifiques sont considérées comme dangereuses parce qu'elles sont notamment accusées d'entraîner une perte de fertilité et une dégradation des sols. Il est donc intéressant d'étudier de façon assez détaillée les caractéristiques dominantes des sols qui sont le plus souvent boisés dans les régions tropicales et subtropicales, ainsi que l'interaction entre les cultures arborées et le sol.

Quelques caractéristiques des sols tropicaux

Les sites qui sont utilisés pour établir des plantations forestières ne sont souvent disponibles à cette fin, dans les zones tropicales comme ailleurs, que parce qu'ils ne se prêtent pas à l'agriculture ou parce qu'ils ont été dégradés par de mauvaises pratiques agricoles. Ces sols tendent à avoir certaines caractéristiques communes.

Les ferralsols et les acrisols sont les groupes de sols les plus importants que l'on trouve dans les Tropiques où ils représentent à eux deux 37 pour cent du total. Il s'agit de sols âgés, souvent profonds, mais fortement altérés et qui, de ce fait, sont pauvres en minéraux primaires, qui fournissent les réserves d'éléments nutritifs nécessaires au cycle de vie des végétaux. Ces sols perdent par lessivage leurs éléments nutritifs, en particulier sur les sites à forte pluviosité; en outre ils sont acides, ce qui empêche la couche superficielle fertile de retenir les éléments nutritifs sous une forme assimilable par les végétaux. Néanmoins, lorsqu'ils sont sous une végétation forestière non perturbée, ces sols peuvent porter un volume de végétation important sur les sites à forte pluviosité car les ressources en éléments nutritifs qui se trouvent en solution dans la couche arable se maintiennent grâce à la décomposition et à la minéralisation rapides de la litière. Même pendant leurs phases les plus sèches (*miombo* en Afrique, *cerrado* en Amérique du Sud), où les incendies sont fréquents, ces sols peuvent garder une fertilité adéquate si la teneur en matière organique n'est pas épuisée outre mesure.

Lorsque ces sites subissent des perturbations, soit parce qu'ils sont utilisés pour l'agriculture, soit parce qu'ils sont défrichés en vue d'établir des plantations forestières, la structure du sol risque d'être endommagée, en particulier si l'on emploie des engins lourds. L'exposition du sol et la suppression de matière organique, dues par exemple à la pratique du brûlage, endommagent la structure du sol et favorisent la perte d'éléments nutritifs par lessivage.

Les arénosols et les régosols représentent une petite proportion des sols tropicaux. Il s'agit de sols sableux de texture grossière qui ont une faible teneur en éléments nutritifs et une faible capacité de rétention d'eau; de ce fait ils ne peuvent être utilisés que marginalement en agriculture, et sont souvent disponibles pour les plantations forestières.

Les lithosols et d'autres sols à la phase lithique (pierreuse et peu profonde) sont communs dans les Tropiques. Ces sols sont souvent soumis à un mauvais aménagement agricole sur les flancs de coteaux abrupts. Bien qu'ils soient rarement bien adaptés aux plantations forestières commerciales à grande échelle, la foresterie peut être le meilleur moyen de les utiliser pour les régénérer. L'accumulation de matière organique favorise la formation de sol.

Les nitosols, qui sont des sols tropicaux rouges argileux, sont plus fertiles que les ferralsols et les acrisols et ils sont le plus souvent utilisés pour l'agriculture, mais dans les montagnes d'Afrique de l'Est, de nombreuses plantations de conifères ont été établies sur des nitosols qui ne se prêtaient pas aux cultures agricoles, en raison des pentes abruptes ou des altitudes élevées et des basses températures. Ces sols ont moins tendance à présenter des carences en éléments nutritifs, mais ils sont exposés à l'érosion lorsqu'ils sont mal aménagés.

Les vertisols sont des argiles cassants lourds et souvent noirs, qui se forment dans les zones où la saison sèche est longue, par exemple dans le Dekkan (Inde), le Gezira (Soudan), les plaines du Kano (Kenya). Bien qu'ils tendent à être plutôt pauvres en azote, en potassium échangeable et en phosphore utilisable, ils ont une capacité d'échanges de cations élevée et peuvent être utilisés avec succès en agriculture. Toutefois, en raison de leur forte teneur en argile, ils sont difficiles à travailler, et sont parfois disponibles pour établir des plantations forestières. Leur teneur en matière organique tend à être faible.

Les cambisols et les luvisols sont des sols relativement jeunes et fertiles qui sont essentiellement réservés à l'agriculture.

Eléments nutritifs du sol

Les seize éléments chimiques qui sont essentiels à la croissance des végétaux sont généralement classés en quatre catégories (Young 1976).

Eléments — L'oxygène, l'hydrogène et le carbone, qui sont fournis par l'air et par l'eau, ne sont généralement pas considérés comme des éléments nutritifs.

			Forme assimilable
Eléments nutritifs primaires	Azote	N	NH_4^+ & NO_3^-
	Phosphore	P	H_2PO_4
	Potassium	K	K
Eléments nutritifs secondaires	Calcium	Ca	Ca^{2+}
	Magnésium	Mg	Mg^{2+}
	Soufre	S	SO_4^{2-}
Oligo-éléments	Fer	Fe	Fe^{2+}, Fe^{3+}
	Bore	B	Divers anions
	Zinc	Zn	Zn^{2+}
	Cuivre	Cu	Cu^{2+}
	Manganèse	Mn	Mn^{2+}
	Molybdène	Mo	MoO_4^{2-}
	Chlore	Cl	Cl^-

Source: Young (1976)

L'azote est l'élément nutritif le plus souvent déficitaire dans les Tropiques. Il provient presqu'entièrement de la minéralisation de la matière organique. Sous sa forme organique, il n'est pas assimilable par les plantes et doit être converti en une forme minérale par des champignons et des bactéries; le processus de conversion s'effectue en

trois étapes; décomposition en ammoniac (NH_3), conversion du cation d'ammonium (NH_4^+) par des bactéries nitrifiantes, d'abord en nitrites (NO_2^-), puis en nitrates (NO_3^-), forme sous laquelle il est essentiellement absorbé par les végétaux. Sous cette forme, il est très soluble et exposé au lessivage, c'est pourquoi il est essentiel que l'approvisionnement soit continu; les avantages des apports massifs d'engrais azoté artificiel sont presque tous perdus par lessivage.

L'azote est introduit dans le cycle nutritif grâce à l'activité des bactéries fixatrices d'azote, qui sont soit des *Azotobacter* autonomes (rares dans les Tropiques), soit des *Rhizobium* symbiotes qui prolifèrent sur les racines de certaines légumineuses et des bactéries non symbiotes qui vivent sur plusieurs genres. L'ammoniac fixé dans le sous-sol peut contribuer dans une certaine mesure à maintenir la teneur en azote et, d'après les estimations, la pluviométrie pourrait y contribuer à concurrence de 5 kg/ha/an au maximum (Ewell 1986).

Le phosphore est indispensable aux végétaux et est présent dans le sol à des concentrations beaucoup plus faibles que l'azote. Presque tout le P est retenu dans le sol sous une forme non assimilable par les végétaux, mais il est converti lentement en une forme utilisable (anion de phosphate). Comme la conversion s'effectue beaucoup trop lentement pour fournir aux plantations en bonne santé les quantités dont elles ont besoin, le recyclage de phosphore dans la matière organique est très important pour l'approvisionnement en ce nutriment. Dans de nombreux sols, et en particulier dans les sols acides, le P a tendance à se fixer sur les particules d'argile, ce qui constitue un problème. Le taux de libération est extrêmement lent et, s'il est avantageux que le phosphore soit ainsi disponible pendant une longue période, il n'est pas utilisable aux moments où les cultures ont besoin de l'absorber rapidement, en période de croissance. Mais le P organique est moins facilement fixé que le P inorganique. C'est pour cette raison, entre autres, qu'il est important de maintenir la teneur de matière organique du sol.

Les concentrations de potassium dans le sol sont supérieures aux ressources en phosphore et les carences sont moins fréquentes. Le potassium est absorbé par les plantes en tant que cation, est facilement lessivé et peut être insuffisant dans les sols des forêts ombrophiles et dans les sols sableux des savanes.

Le calcium et le magnésium sont absorbés en tant que cations et peuvent de ce fait manquer dans les sols fortement lessivés.

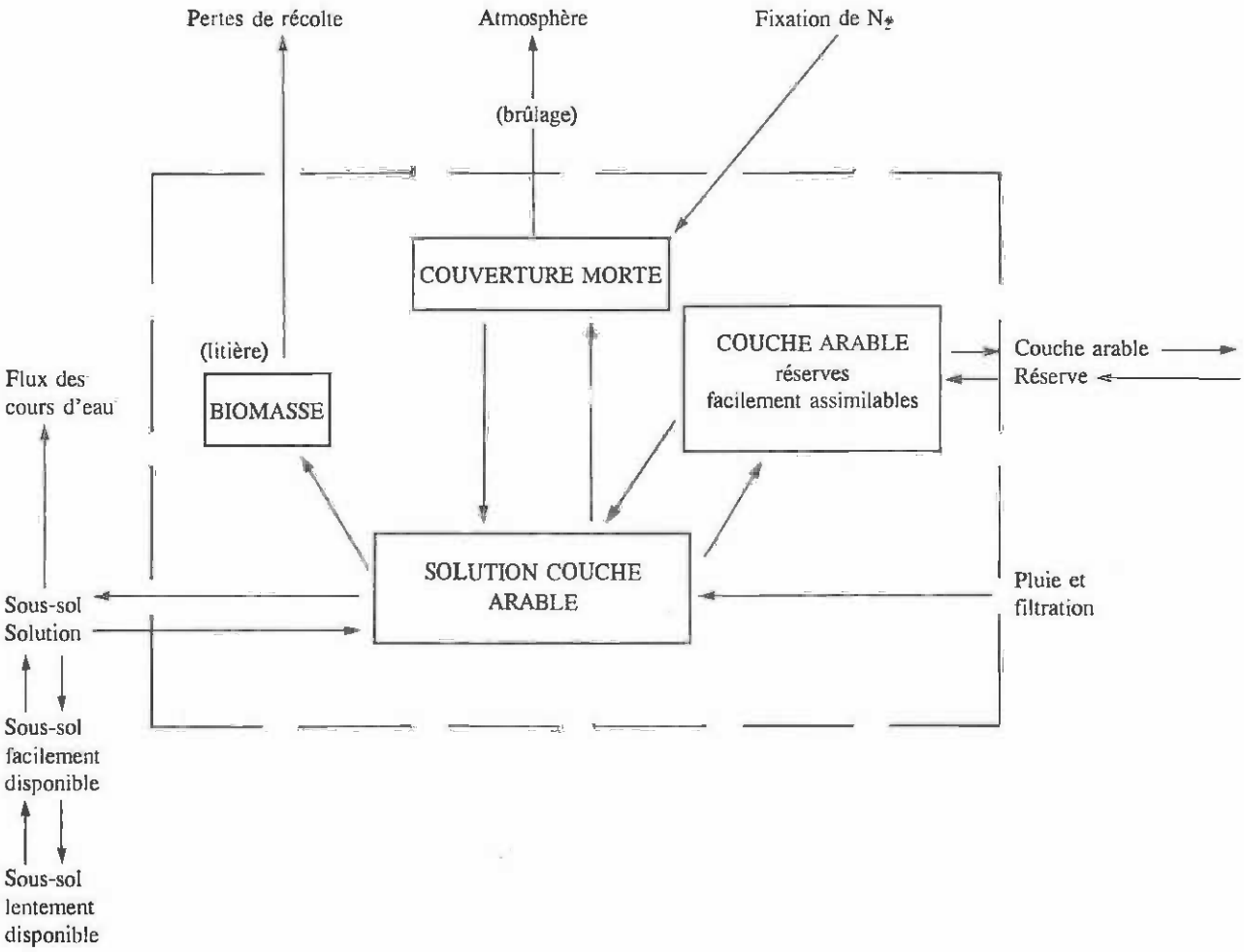
Le soufre est absorbé en tant qu'anion et peut être perdu par lessivage et par volatilisation au cours des opérations de brûlage. Les réserves de soufre peuvent être insuffisantes dans les sols pauvres en matière organique.

La matière organique a un effet important sur la présence et l'assimilabilité des éléments nutritifs dans la solution de la couche superficielle de sol. Elle influe aussi sur la structure et la capacité de rétention hydrique des sols. Il existe une interaction complexe non seulement entre ces éléments nutritifs (la carence en P inhibe l'absorption de N, etc.; l'excès de calcium inhibe l'absorption de Fe et peut provoquer la chlorose), mais aussi entre la teneur organique des sols, les ressources en eau et les éléments nutritifs.

Modèle de circulation des éléments nutritifs dans le sol

Un modèle de circulation des éléments nutritifs peut aider à comprendre l'interaction entre les cultures et les sols. La figure 1, qui décrit les conditions dans les plantations de pins de l'Usutu, au Swaziland, peut servir de modèle général.

Figure 1 Modèle de circulation des éléments nutritifs, Usutu, Swaziland



Source: Morris (1986)

Le forestier s'intéresse essentiellement à la composante biomasse (et d'habitude spécifiquement à la fraction de la biomasse constituée par les tiges d'arbre), mais pour un régime donné de température, de pluviométrie et de concurrence, la croissance de la biomasse dépend des ressources en éléments nutritifs provenant de la couche arable. A un moment déterminé, la quantité d'éléments nutritifs retenus en solution est peu importante par rapport aux réserves totales du sol en éléments nutritifs et les concentrations de P, en particulier, peuvent être faibles par rapport aux quantités retenues dans la biomasse vivante et morte.

Tableau 1: Eléments nutritifs présents dans la couche arable

		N&P utilisables et K, Ca & Mg échangeables				
		N	P	K	Ca	Mg
		(Kg/ha)				
		Usutu, Swaziland - pins				
Couche supérieure 1 m	1ère révolution	3 170	5	828	288	456
	2ème révolution	2 789	7	842	279	342
Biomasse 17 ans		551	73	383	238	88
Litière	2ème révolution	2 122	113	130	308	146

Source: Morris (1986)

		Nigéria - *Gmelina arborea*				
Couche supérieure 1 m		1 215	2	12	347	57
Biomasse 14,5 ans		157	12	337	66	93
Litière		6	1	3	5	5

Source: Chijioke (1980)

		Nigéria - *Gmelina arborea*				
Réserves du sol		1 725	54	-	3 491	1 508
Biomasse 10 ans		960	371	-	2 425	614
Litière		30	1	-	48	11

Source: Nwoboshi (1983)

Par rapport aux éléments nutritifs retenus dans la biomasse et la litière réunies, les ressources du sol en N et Ca semblent suffisantes; la proportion de K et de Mg dépend de la station et des essences, mais la teneur en P assimilable est très réduite. Ces quantités et ces proportions varient en fonction des stations et des essences, mais on peut penser que, pour quelques éléments nutritifs, notamment P, les ressources présentes dans la solution peuvent facilement devenir insuffisantes, en particulier aux moments où la croissance est la plus forte durant la phase de développement des plantations. Il est essentiel de maintenir la teneur de la couche arable en éléments nutritifs assimilables pour assurer une bonne croissance des arbres.

Les apports d'éléments nutritifs proviennent de:

- Pluies et effet de filtration du feuillage. Dans l'Usutu, cet effet a été considéré comme peu important, mais on a calculé un chiffre général qui peut être appliqué à toutes les plantations des Tropiques: 5-18 kg/ha/an pour N et <1 kg/ha/an pour P. (Ewel 1986)

- Altération des minéraux primaires et migration du sous-sol vers la couche arable. Les quantités impliquées sont difficiles à estimer et varient sans doute en fonction des ressources de minéraux primaires contenues dans le sous-sol, mais le rythme de remplacement est toujours lent. Il est peu probable que cette source d'éléments nutritifs soit suffisante pour compenser les pertes d'éléments nutritifs dans les plantations forestières à révolution courte, sur les sols fortement altérés.

- Fixation d'azote. Cette question sera étudiée plus en détail dans une section ultérieure de la présente annexe. Sur quelques sites tropicaux, des quantités aussi importantes que 58 kg/ha/an d'azote seraient fixées. Ce processus peut améliorer de façon importante les disponibilités en azote.

Les pertes d'éléments nutritifs proviennent:

- De l'exportation de grumes lors de la coupe. Elles peuvent être très élevées, mais il est possible de les réduire en laissant des branches, des brindilles, des écorces et des feuilles en place.

Tableau 2: Pertes d'éléments nutritifs au moment de la coupe

		Age		N	P	K	Ca	Mg
						(kg/ha)		
Usutu	Pins	17	(1)	257	43	159	123	37
Nigéria	Gmelina	6	(2)	182	38	136	108	51
	Gmelina	14	(2)	138	11	169	155	52
Brésil	Pins	6	(2)	99	21	31	25	17
Nigéria	Gmelina	10	(3)	754	282	-	2 174	528

Sources: (1) Morris (1986); (2) Chijioke (1980); (3) Nwoboshi (1983)

Ces chiffres montrent que les quantités peuvent varier en fonction des essences et des lieux, mais on peut constater que les pertes d'éléments nutritifs sont importantes.

Sur une longue révolution, il est possible qu'une grande partie des éléments nutritifs perdus au moment de la coupe soit remplacée grâce à la fixation de l'azote et à l'altération de la roche mère, mais une succession de révolutions courtes draine les éléments nutritifs. Le phosphore s'accumule à des concentrations plus élevées dans les tiges des jeunes pins, de sorte que les révolutions courtes risquent particulièrement d'épuiser les ressources en P.

- Du brûlage des rémanents. Cette pratique peut être adoptée pour défricher le site avant l'établissement de la plantation et à chaque récolte. Les pertes de nutriments impliquées ont été calculées dans l'Usutu. Le brûlage des rémanents accroît initialement les disponibilités de certains éléments nutritifs (P, K, Ca, Mg), sous forme de cendres, mais N et S sont volatilisés et perdus. Presque tous les éléments nutritifs libérés par la cendre sont perdus par lessivage avant de pouvoir être absorbés par les jeunes plants.

Tableau 3: Pertes d'éléments nutritifs par brûlage - Usutu

	Kg/ha				
	N	P	K	Ca	Mg
Pinus patula 17 ans	266	19	11	16	15

Source: Morris (1986)

- Du lessivage. Les pertes par lessivage, sous couverture forestière, ont été considérées comme faibles dans les plantations de l'Usutu (Morris 1986), mais elles peuvent être importantes sur les sols sableux et lorsque les précipitations sont élevées, en particulier pendant la phase de défrichement. Le maintien d'une couverture vivante, y compris de celle qui est issue de la ré-invasion des sites défrichés par la végétation indigène, contribuera à réduire le lessivage.

- Du ruissellement: des volumes de sols importants, mais aussi des éléments nutritifs assimilables contenus dans la couche arable peuvent être perdus par ruissellement. A Trinidad, les pertes peuvent atteindre 153 tonnes/ha par an, ce qui correspond à 1 cm de couche arable (Bell 1973). Dans l'Usutu, toutefois, les pertes d'éléments nutritifs dues à l'érosion et au ruissellement ont été considérées comme peu importantes (Morris 1986).

Réservoirs à nutriments. Le cycle des éléments nutritifs

→ Solution du sol → Biomasse → Litière → Solution du sol

est très important. Compte tenu de la lenteur du remplacement des éléments nutritifs dans l'écosystème, du potentiel de pertes élevées lors de la coupe et du défrichement par brûlis, ainsi que du rythme variable de la demande, qui dépend de la saison et du stade de développement de la plantation, la matière organique présente dans la couche arable joue un rôle de "tampon" extrêmement important. Si les éléments nutritifs sont retenus dans la litière et ne sont pas disponibles en solution dans la couche arable, des carences en éléments nutritifs se produisent. A Usutu, on a estimé que, dans une plantation âgée de 17 ans située à 1 150 m d'altitude, le poids des éléments nutritifs contenus dans la couverture morte était, en kg/ha, de: N - 557, P - 30, K - 34, Ca - 81 et Mg - 38; à 1 450 m d'altitude, ces chiffres étaient approximativement multipliés par deux. Le taux de production de la litière, comparable aux deux altitudes, était à peu près équivalent au taux d'accumulation de la litière à l'altitude la plus élevée, ce qui indique que la décomposition était très lente, à 1 450 m.

Rôle des facteurs biologiques

Activité de la microfaune

Dans les zones tempérées, les lombrics sont sans doute les animaux qui ont été le plus longuement étudiés. Ils jouent un rôle important dans la fragmentation de la litière feuillue et son incorporation dans la couche superficielle; dans un peuplement d'épicéas en Angleterre, le nombre et le poids des lombrics ont été augmentés par l'introduction d'aulnes et surtout de pins dans le peuplement plus encore; la minéralisation de N et de P a également été accrue (Brown et Harrison 1983). Les lombrics sont moins communs dans les zones tropicales où leur fonction est remplie dans une large mesure par les termites, qui fragmentent la litière et minéralisent même les éléments nutritifs qu'elle contient. Alors que les lombrics brassent le sol à la verticale, les termites provoquent une concentration latérale d'éléments nutritifs dans les termitières et peuvent ainsi épuiser les ressources en matière organique de la couverture morte (Young 1976; Trapnell in Chaffney 1978). D'autres espèces de la microfaune - mille-pattes, acariens, coléoptères - fragmentent généralement la litière qui est alors plus facilement décomposée par la microflore. L'activité de la microfaune est fortement influencée par les éléments nutritifs et les produits chimiques contenus dans les feuilles, comme les phénols. L'introduction dans un peuplement pur d'essences dont les feuilles sont appréciées par la microfaune encourage l'ectivité de celle-ci, ce qui accélère la décomposition de la litière et l'incorporation de la matière organique dans le sol et permet un recyclage plus rapide des éléments nutritifs. Au Costa Rica, dans une parcelle simulant un mélange secondaire de nombreuses essences, 50 pour cent en poids de la litière feuillue de *Cordia alliodora* (et 50 pour cent des éléments autres que l'azote et le soufre) s'étaient décomposés en l'espace de six semaines; dans une plantation pure, au bout de 15 semaines, seulement 22 pour cent du poids de la litière et moins de 50 pour cent des éléments nutritifs (à l'exception du phosphore et du potassium) s'étaient décomposés (Babbar et Ewell 1989).

Microflore

Les bactéries favorisent puissamment la décomposition de la matière organique et jouent un rôle essentiel dans le cycle de l'azote; les champignons ont aussi une influence. Des antagonismes se produisent entre les espèces de la microflore et une modification de la couverture morte peut changer l'équilibre microbiologique et favoriser des organismes antagonistes des bactéries fixatrices d'azote (Florence 1967). Dans le sud-est des Etats-Unis, la conversion de peuplements mélangés feuillus/pins à courtes aiguilles en peuplements purs de pins a abaissé le pH; cette modification a sans doute inhibé l'activité des bactéries et des actinomycètes antagonistes des *Phytophtora cinamoni*, ce qui pose à présent un problème dans ces peuplements. *Fomes annosus* est également présent et est sans doute favorisé par l'abaissement du pH de la litière de pins (Florence 1967). Le rôle symbiotique que jouent les myccorhizes en encourageant l'absorption des éléments nutritifs est bien connu; *Suillis variegatus*, qui prolifère sur *Pinus silvestris*, mais pas sur les épicéas, peut être très efficace pour dégrader les protéines, dont jusqu'à 87 pour cent restent en solution dans le sol où elles peuvent être absorbées par l'épicéa. Ce phénomène peut expliquer l'amélioration de la croissance de l'épicéa lorsque des pins sont introduits dans le peuplement (Ryan et Alexander 1990). Dans les forêts d'Usutu, la forme et le nombre de mychorrizes présents sur *P. patula* a changé dans des peuplements de la deuxième révolution dont la croissance s'était arrêtée. Ce changement des mycorrhizes et

l'arrêt de la croissance ont été attribués à l'accumulation de la litière, qui a sans doute entraîné à la fois une réduction des éléments nutritifs utilisables et une augmentation des toxines (Robinson 1973).

Fixation de l'azote

Les effets de la fixation de l'azote ont été largement étudiés en Amérique du Nord (Binkley 1983, 1984, 1990; Binkley et Greene 1983; Hansen et Dawson 1982; Friederich et Dawson 1984; Schlesinger et Williams 1984). Les études ont généralement portées sur l'influence de l'aulne (*Alnus rubra*, *A. sinuata* et *A. glutinosa*) et de l'olivier d'automne (*Elaeagnus umbellata*), sur le sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), le noyer (*Juglans nigra*) et les peupliers. Des effets bénéfiques ont été constatés lorsque les sols étaient pauvres en azote, mais contenaient suffisamment d'autres éléments nutritifs pour que les espèces fixatrices d'azote enregistrent une bonne croissance. Les légumineuses ont besoin d'humidité et, lorsqu'elles sont stressées, elles ne fixent pas l'azote (Sprent 1985); toutefois, d'après certains auteurs, l'aulne et *Robinia pseudoacacia* libéreraient de l'azote lorsqu'ils sont stressés par la concurrence (Dawson et al. 1983; Friederich et Dawson 1984). L'espèce fixatrice d'azote doit être cutivée en association étroite avec l'essence bénéficiaire et on a démontré que la croissance était liée aux quantités de N fixées dans la couche superficielle fertile (Paschke et al. 1989). Mais certains ont soutenu (Ewel 1986) que les espèces fixatrices d'azote consomment le plus souvent tout l'azote qu'elles fabriquent et ne le restituent que dans leur litière, et on a constaté que la litière feuillue de *A. glutinosa* et *E. umbellata*, utilisée comme paillis, a renforçé la croissance des peupliers sur les sols de prairie (Carlson et Dawson 1984). Cette constatation est déroutante. D'autres expériences ont montré que l'augmentation des quantités d'azote (586 kg/ha) utilisable, qui est imputable à l'activité de *A. glutinosa*, a été sans effet sur la croissance de *Picea sitchensis* (Malcolm et al. 1985).

Sur les sols riches en azote, la présence de plantes fixatrices d'azote peut être néfaste, en raison de la concurrence pour la lumière, l'humidité et les autres éléments nutritifs. En Australie, l'introduction d'acacias dans des peuplements de *Pinus radiata* et de *P. elliottii*, sur podsols sableux, a ralenti la croissance en raison de l'augmentation de la concurrence, alors même que les sols avaient une faible teneur en azote (Turvey et al. 1984). En revanche, sur des sols rouges kraznozem recouvrant des crêtes exposées, *Daviesia mimosoides*, en sous-étage de peuplements naturels d'*Eucalyptus dives* et de *E. diversicolor*, aurait eu une influence bénéfique sur la croissance, alors que *D. mimosoides* avait un ratio de nodulation de 50 pour cent seulement et ne fixait qu'entre 4 et 7 kg de N par hectare et par an (McNoll et Edmonds 1983).

A Hawaï, des espèces fixatrices d'azote (*Albizia falcataria* et *Acacia melanoxylon*) ont été introduites dans des plantations d'*Eucalyptus saligna* établies sur une exploitation de canne à sucre abandonnée et les bons résultats obtenus ont été longuement décrits (DeBell et al. 1985, 1987, 1989). Sur un site recevant 5 000 mm de pluies, la teneur en azote de la couche arable a été augmentée et les eucalyptus ont eu une croissance soutenue; en revanche sur un site aride, l'introduction de ces essences n'a eu aucun impact et sur un troisième site, les *Albizia* sont morts. Dans le Niligiris (Inde), un rapport signale que *Acacia menziesii* aurait eu un effet bénéfique lorsqu'il poussait sous *Eucalyptus globulus*, mais ce document est moins fiable (Samraj et al. 1977).

L'introduction de légumineuses arbustives *Erythrina*, *Gliricidia*, *Acacia auriculiformis*, *A. crassiocarpa* et *A. polystachya* dans des plantations d'eucalyptus établies près de Chittagong (Bangladesh) a été proposée (Davidson 1986), mais aucun effet n'a été signalé.

La fixation de l'azote est souvent associée aux légumineuses, bien que la nodulation des césalpinioidées soit irrégulière (Sprent 1985), mais on sait en fait que près de 200 espèces non légumineuses appartenant à 20 genres fixent l'azote autrement que par symbiose (nodules du type aulne); ces espèces non légumineuses comprenaient 24 espèces de *Casuarina* qui sont probablement les essences les plus intéressantes pour les zones tropicales (Bond 1983). Les quantités fixées varient considérablement.

Tableau 4: Quantités d'azote fixées par quelques espèces

	Kg/ha/an	
Casuarina equisetifolia en Afrique du N	58	(Kormanik 1979)
Elaeagnus umbellata	178	(Paschke et al. 1989)
Acacia holosericea	6,4	(McColl et al. 1983)
A. pulchella var. *glaberrima*	2,2	
A. mearnsii	0,8	
A. verniciflua	32	(Turkey et al., 1984)

Allélopathie

Il est relativement rare que la croissance d'une essence soit inhibée par les exsudats d'une autre essence, toutefois le juglone secrété par les noyers aurait cet effet (von Althen 1968). En Indonésie, on signale dans un rapport que plusieurs essences, dont *Leucaena leucocephala* et *Swietenia macrophylla* se sont mal développées sous *Melaleuca leucadendron* et l'allélopathie est considérée comme une cause possible de ce phénomène. En Australie, on a remarqué que, sous des *Grevillea robusta* âgés, la germination des jeunes plants de la même essence était inhibée (Florence et Lamb 1974).

Carences en éléments nutritifs

En fonction du type de sol, du climat, de la méthode d'établissement pratiquée et de la nature de la culture, des carences de n'importe quel élément nutritif peuvent apparaître. Toutefois, dans les Tropiques, ce sont probablement N, P, K et peut-être aussi Ca qui sont le plus souvent déficitaires (Lundgren 1980). Les éléments nutritifs disponibles en solution dans le sol peuvent être insuffisants par rapport aux besoins de la biomasse. N et P, en particulier, ne sont libérés que lentement par le sol; c'est pourquoi le recyclage de la litière est une source importante d'approvisionnement en ces nutriments. Les besoins de la biomasse et les quantités de nutriments prélevées dans la solution varient en fonction du stade de développement de la culture.

Prenons comme exemple les plantations de pins d'Usutu:

- Au début de chaque révolution, après la récolte, la litière se trouve exposée; de ce fait la matière organique se décompose rapidement et les éléments nutritifs s'accroissent, mais comme les jeunes plants ont un volume racinaire réduit, ils peuvent souffrir d'une carence en éléments nutritifs, en particulier en K et en P; dans le même temps, les éléments nutritifs assimilables sont lessivés et emportés;

- Jusqu'à l'âge de sept ans, les quantités d'éléments nutritifs dont les arbres ont besoin pour maintenir leur production de biomasse s'accroissent rapidement et K risque de manquer;

- De 7 à 12 ans, les besoins liés à la production de biomasse sont encore élevés mais la litière commence à s'accumuler et, si la décomposition est lente, le recyclage des éléments nutritifs peut être entravé, et P peut devenir insuffisant;

- A partir de 12 ans, les besoins de la biomasse restent relativement constants, mais la litière continue de s'accumuler; N et P peuvent manquer, de même que Ca, à des altitudes plus élevées.

Un mélange d'essences peut s'avérer utile (mais pas nécessairement à Usutu):

- Au moment de l'établissement, une autre espèce "de remplissage" peut absorber les éléments nutritifs excédentaires et aider à les recycler; on peut obtenir cet effet en laissant pousser des adventices ou en constituant une couverture vivante;

- Le mélange peut favoriser la décomposition de la litière d'aiguilles sous les pins, à partir de l'âge de sept ans; on peut obtenir cet effet en plantant moins serré et en encourageant un sous-étage naturel.

Un auteur a comparé des forêts indigènes et des plantations de *Gmelina* au Nigéria, et des forêts naturelles et des plantations de pins et de *Gmelina* en Amérique du Sud (Chijioke 1980). Il n'a pas réussi à démontrer que, dans les plantations monospécifiques, les réserves du sol en éléments nutritifs s'épuisaient plus rapidement que dans des forêts mélangées ayant la même production de biomasse, la même longueur de révolution et la même proportion d'arbres enlevée au moment de la coupe. Malgré les quantités importantes de N immobilisées par *Gmelina* et par les pins, les concentrations d'azote dans le sol étaient excellentes et la récolte ne représentait pas un danger pour l'équilibre futur en azote. L'immobilisation de K, en plus grandes quantités, et éventuellement de P, pourrait devenir un facteur limitant.

Au Kenya, des mesures ont été effectuées afin de comparer des sols sous des conifères de deuxième et de troisième révolutions et des sols sous forêts indigènes (Robinson 1967; Robinson et al. 1966). Elles n'ont pas permis de tirer des conclusions définitives, mais seule une légère baisse des ressources en éléments nutritifs a pu être détectée dans les plantations de cyprès et de pins et certains signes indiquaient que la teneur diminuait pendant la phase d'établissement de chaque révolution, du fait que les

sols étaient cultivés (méthode "taungya"), alors que la fertilité augmentait pendant la période où les arbres étaient sur pied. Sur un site, la densité apparente a diminué et le pH a augmenté sous les plantations, ce qui indique une amélioration générale de l'état des sols.

ANNEXE 3

MELANGES D'ESSENCES

La présente annexe présente la plupart des mélanges qui sont mentionnés dans la bibliographie. Lorsque c'était possible, on a donné des indications sur les résultats obtenus. La plupart des mélanges recensés ont été établis à titre expérimental. Les mélanges ci-après ont probablement été utilisés comme pratique sylvicole générale.

Queensland

Araucaria cunninghamii Pins

mais la pratique a été abandonnée

Viet Nam

Eucalyptus tereticornis en ét. supérieur et *Acacia auriculiformis*

plus de 10 000 ha auraient été établis, mais on ne dispose d'aucune information sur les résultats obtenus jusqu'à présent.

Kenya

Cyprès *Grevillea robusta*

Pratique abandonnée vers le milieu des années 50.

Togo

Eucalyptus torelliana *E. tereticornis*

considéré comme une réussite.

Sri Lanka

Swietenia macrophylla *Tectona grandis*
Artocarpus integrifolius

Excellents résultats à Sundapola.

On utilise couramment des essences de protection pour fournir de l'ombre aux acajous dans de nombreux pays tropicaux. En Afrique de l'Ouest, cette pratique a été abandonnée dans les pays francophones, mais elle est poursuivie au Nigéria.

Indonésie

Teck *Leucaena leucocephala* utilisé comme peuplement de protection pour le teck

Aujourd'hui gravement touché par *Heteropsylla cubana*.

ESSENCE PRINCIPALE	ESSENCE D'ACCOMPAGNEMENT (abri)	SOURCE

AUSTRALIE - Queensland

Araucaria cunninghamii *Pinus elliottii* **Nielsen 1991**

La plantation de pins colonnaires sous des pitchpins américains a amélioré la croissance (augmentation de l'absorption d'azote).

P. taeda, P. patula

A. bidwillii *P. elliottii* **Nielsen 1991**

- Victoria

Flindersia brayleyana Araucaria cunninghamii

F. brayleyana a pu se reprendre et former un peuplement quand il a été libéré.

E. sieberi avec *Acacia longifolia* **Smith et al. 1989** et aussi *E. botryoides & E. sideroxylon*

effet bénéfique sur la croissance en hauteur de l'eucalyptus.

Pinus radiata *Acacia spp.* **Turvey et al. 1984**
ou
Pinus elliottii

Les effets des acacias issus d'une régénération naturelle ont été étudiés. Aucun effet positif n'a été constaté.

BANGLADESH

Calamus spp *Shorea robusta* **Davidson 1986**
Pinus oocarpa

BRESIL

Eucalyptus urophylla *Leucaena leucocephala* **Moraes de Jesus 1989**

Piptadenia macrocarpa **Garrido & Poggiani 1979**
Astronium urundeuva
Moqinia polymorpha
Colubrina rufa
Tabebuia impetiginosa

Pinus caribaea v. hondurensis *Liquidambar styraciflua* **Novais & Poggiani**

L'hétérogénéité des feuilles semble accélérer la décomposition de la litière et le recyclage des éléments nutritifs.

BURKINA FASO

Dalbergia sissoo *Eucalyptus tereticornis* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1967. Les traitements ont favorisé D. sissoo.

Eucalyptus camaldulensis *Gmelina arborea* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1980.

BURUNDI

Eucalyptus grandis *Acacia elata* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1987. Faible taux de survie de *A. elata*.

CAMEROUN

Khaya senegalensis *Dalbergia sissoo* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1986.

Azadirachta indica *Dalbergia sissoo* **CTFT 1991**
Khaya senegalensis
Expérimentation mise en place en 1983.

Khaya senegalensis *Eucalyptus camaldulensis* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1983. Faible taux de survie de *Khaya*.

Pinus elliottii *Entandrophragma cylindricum* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1975. 90 pour cent *Pinus*.

Entandrophragmam cylindricu *Pinus elliottii* **CTFT 1991**

" *Mansonia altissima*
Expérimentation mise en place en 1975. En 1977, *P. Elliottii* a été remplacé par *M. altissima*. Croissance lente et taux de survie élevé pour E. cylindricum.

CHINE

Eucalyptus exserta avec *Acacia auriculiformis* **Barnes 1991**

CONGO

Acacia auriculiformis *Eucalyptus tereticornis* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1984.

Araucaria hunsteinii *Pinus caribaea* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1980. Des écarts de hauteur constants ont été constatés.

Entandrophragma angolense *Letestua durissima* **CTFT 1991**
Acacia auriculiformis
Expérimentation mise en place en 1982. Bon état mais croissance médiocre pour *A. auriculiformis*.

Tectona grandis *Terminalia superba* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1988. Mélange intime.

COTE D'IVOIRE

Aucoumea klaineana *Tarrietia utilis* **CTFT 1991**
Khaya ivorensis "
Tieghemella heckelii "
Expérimentation mise en place en 1964. *T. utilis* constitue le peuplement de protection et pousse bien. Croissance rapide de *T. keckelii* sur sols sableux.

Gmelina arborea *Acacia auriculiformis* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1985. Graves attaques d'insectes.

Triplochiton scleroxylon — *Gmelina arborea* — **CTFT 1991**
" — *Khaya ivorensis*
" — *Chlorophora spp.*
" — *Mansonia altissima*
Les expérimentations sur *Gmelina arborea* ont été mises en place en 1961, les autres en 1928.

Terminalia ivorensis — *Cedrela odorata* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1977. *C. odorata* étouffe *T. ivorensis*.

Khaya grandifoliola — *Cedrela odorata* — **CTFT 1991**
Khaya ivorensis — "
Khaya senegalensis — "
Expérimentations mises en place en 1977. *Cedrela* constitue le peuplement-abri et a la croissance la plus rapide. Résultats médiocres de *K. senegalensis*.

Aucoumea klaineana — *Tarrietia utilis* — **CTFT 1991**
Khaya ivorensis — "
Expérimentation mise en place en 1965. Résultats prometteurs pour *K. ivorensis*, mais non pour *A. klaineana*.

Triplochiton scleroxylon — *Tectona grandis* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1961.

Terminalia ivorensis — *Terminalia superba* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1981. Mélange prometteur.

Terminalia ivorensis — *Cedrela odorata* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1965. Mélange intime à faible densité de peuplement sous une forêt annelée avec phytocite. La faible densité de plantation a eu des effets négatifs sur la forme de la tige de *Cedrela*.

Khaya senegalensis — *Terminalia ivorensis* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1965. Densité de plantation: 64 arbres/ha.

Terminalia ivorensis — *Entandrophragma utile* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1965. Quarante et un arbres/ha ont été plantés dans une forêt annelée avec phytocite.

Terminalia ivorensis — *Terminalia superba* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1977. Mélange en layons. Eclaircies sélectives en 1980 et 1982. Plantation de 252 *T. ivorensis* et 160 *T. superba* à l'hectare.

Cedrela odorata — *Terminalia ivorensis* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1965. Mélange intime.

Triplochiton scleroxylon — *Khaya ivorensis* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1964. Mélange intime.

Tieghemella spp. — *Triplochiton scleroxylon* — **CTFT 1991**
" — *Khaya ivorensis*
Expérimentation mise en place en 1964. Mélange intime avec *Khaya* ou *Tieghemella*.

Cedrela odorata — *Gmelina arborea* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1976. Mélange en layons. Au bout de 4 ans, *C. odorata* était co-dominant.

Khaya ivorensis — *Tarrietia utilis* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1963. Mélange prometteur.

Triplochiton scleroxylon — *Terminalia superba* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1963.

Khaya ivorensis — *Tarrietia utilis* — **CTFT 1991**
Khaya anthotheca "
Expérimentation mise en place en 1981.

Acacia auriculiformis — *Acacia mangium* — **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1985.

Acacia auriculiformis — *Cocos nucifera* — **CTFT 1991**
Acacia mangium
Casuarina equisetifolia
Expérimentation mise en place en 1985. Deux lignes de chaque essence, séparées par deux lignes de *C. nucifera*. La meilleure croissance a été le fait de *A. auriculiformis*.

FIDJI

Cedrela odorata — *Leucaena leucocephala* — **Streets 1962**

Tectona grandis — *Swietenia macrophylla* — **Streets 1962**

GUYANE FRANCAISE

Carapa procera — *Gmelina arborea* — **CTFT 1991**
ou — *Neopometia spp.*
Swietenia macrophylla
ou
Swietenia mahogani
Expérimentation mise en place en 1978. Dix pour cent de *Carapa* ou de *Swietenia* ont été mélangées avec des essences non attaquées par *Hypsipyla*. *Swietenia* a eu une croissance médiocre.

HAWAI

Eucalyptus grandis)	(*Albizia falcataria*	**DeBell et al. 1985**
Eucalyptus saligna)	(*Acacia melanoxylon*	

Moins bons résultats pour *A. melanoxylon* que pour *A. falcataria.*

INDE

Tectona grandis	*Dalbergia larifolia*	**Indian Forest**
"	*Tephrosia candida*	**Service 1934**
"	*Cajanus*	
"	*Leucaena glauca*	
"	*Swietenia macrophylla*	
"	*Cedrela toona*	
"	"Espèces de bambous"	
"	*Pterocarpus marsupium*	
"	*Artocarpus hirsuta*	

Tephrosia est une essence de sous-bois qui semble efficace si elle est introduite la troisième année. L'introduction de *S. macrophylla* en sous-étage dans des plantations agées de 37 ans n'avait pas donné de résultats encourageants et il en a été de même avec *Cedrela toona. D. latifolia* s'avère plus prometteuse quand elle est plantée au même tuteur que le teck que quand le mélange est effectué par bandes.

Terminalia myriocarpa	*Lagerstroemia flos-reginae*	**Indian Forest Service 1934**

S'est converti en peuplements purs de *T. myriocarpa* à croissance plus rapide.

Lagerstroemia flos-reginae	*Mesua ferrea*	**Indian Forest Service 1934**

Résultats plus prometteurs qu'avec le mélange ci-dessus. *M. ferrea,* qui est une essence d'ombrage, est cultivée en sous-étage.

Dalbergia sissoo	*Eucalyptus spp.*	**Indian Forest Service 1934**
	Morus nigra	

Plantation irriguée au Penjab. Pertes importantes de *M. nigra* dues au gel.

Tectona grandis	*Melocanna bambusoides*	**Indian Forest Service 1934**
"	*Cephalostachyum pergracile*	
"	*Gmelina arborea*	
"	*Xylia dolabriformis*	
"	*Acacia catechu*	
"	*Dalbergia sissoo, Acacia catechu*	
"	*Dalbergia latifolia*	
"	*Pterocarpus marsupium*	
"	*Pterocarpus dahlbergioides*	
"	*Artocarpus hirsuta*	
"	*Swietenia macrophylla*	
"	*Bambusa tulda*	

Les mélanges de *M. bambusoides* et de teck semblent avoir été une réussite sur le plan économique dans les collines du Chittagong. C'est peut-être aussi le cas pour les mélanges avec *C. pergracile.* En ce qui concerne *T. grandis* et *G. arborea,* des rapports signalent que les deux essences s'étouffent l'une l'autre. Du point de vue des attaques

d'insectes, le mélange n'est pas souhaitable. *X. dolabriformis* est généralement dominé en hauteur par le teck. Les mélanges avec *A. catechu* tendent à se séparer et à former des groupes purs. Un mélange intime de *T. grandis, A. catechu et D. sissoo* a été essayé. Il a abouti à un mélange de *T. grandis et D. sissoo*, dont la croissance aurait été bonne, même si certains rapports signalent le contraire. Le mélange avec *D. latifolia* n'a pas été une réussite, principalement en raison de l'abroutissement. Les expériences de mélanges avec *P. marsupium* sont décevantes. Des rapports signalent que le mélange avec *A. hirsuta* donne de bons résultats sur le plan sylvicole. Du point de vue économique, l'intérêt du mélange est discutable. Selon les rapports concernant le mélange avec *P. dahlbergioides,* l'une des deux espèces sera probablement éliminée. Les peuplements mélangés comprenant *S. macrophylla* sont considérés comme des échecs, *S. macrophylla* étant éliminée sur sols fertiles et vice-versa. Les mélanges avec *B. tulda* ont abouti à l'élimination des tecks.

Bombax malabricum *Acacia catechu* **Indian Forest Service 1934**
Le mélange semble intéressant sur le plan économique.

Dipterocarpus turbinatus *Gmelina arborea* **Indian Forest Service 1934**
G. arborea devait servir de peuplement de protection. Les *Gmelina* doivent être éclaircis avant d'atteindre une taille commercialisable. Sur le plan sylvicole, ce mélange n'a pas été un échec. Les mélanges par bandes alternées auraient donné de bons résultats.

Dipterocarpus turbinatus *Tephrosia candida* **Indian Forest Service 1934**
T. candida sert de peuplement de protection. Ce mélange aurait été plus satisfaisant que celui avec *Gmelina arborea.*

Acacia auriculiformis)
A. campylacantha)
Gmelina arborea) Bambou **Ram Prasad & Camire 1988**
Eucalyptus hybrides)
Pongamia pinnata)
toutes ces essences ont enregistré une croissance un peu meilleure avec le bambou. *Albizia procera* a eu une croissance plutôt moins bonne avec le bambou.

Cinamomum zeylanicum *Tectona grandis* **Streets 1962**

Dalbergia sissoo en mélange avec diverses essences indigènes. **Streets 1962**

Eucalyptus globulus *Acacia mearnsii* **Samraj et al. 1977**

Shorea robusta *Grevillea pteridifolia* **Ram Prasad 1988**
Eucalyptus calmadulensis
Toona ciliata
Pinus kesiya

Swietenia macrophylla *Tectona grandis* **Streets 1962**
mélange essayé entre 1879 et 1896, mais abandonné à cause des dégâts dus à *Hypsipyla* et aux cerfs.

- **Malabar**

Swietenia macrophylla — *Tectona grandis* — **Streets 1962**
planté sous des *T. grandis* âgés de 30 à 40 ans, au moment de la dernière éclaircie.

Terminalia arjuna — avec *Casuarina equisetifolia* — **Streets 1962**

- **Bengale N.**

Xylia dolobriformis — *Tectona grandis* — **Lahiri 1987**
et *Shima wallichii*
Chukrasia tabularis
Michaelia champaca

Leucaena leucocephala — *Acacia nilotica* — **Bhatia & Kapoor 1984**
Des effets positifs du mélange ont été constatés.

INDONESIE

Pinus spp. — *Pittospermium monticolum* — **Alphen de Veer 1950b**
" — *Schima walichii*
" — *Tarema incerta*
" — *Eugenia spp.*
" — *Quercus spp.*
" — *Leucosyke spp.*
L'introduction de feuillus a été recommandée pour former un sous-étage dans des plantations de conifères établies en vue d'approvisionner une fabrique de pâte à papier. Il est conseillé d'ajouter plus d'une essence.

Altingia excelsa — *Castanopsis tungurrest* — **Bakhoven 1930**
" — *Castanopsis javanica*
" — *Podocarpus imbricata*
Mélanges recommandés pour l'établissement de plantations ne contenant pas de tecks dans les montagnes.

Swietenia macrophylla — *Tectona grandis* — **Becking 1928**

Tectona grandis — *Leucaena glauca* — **Becking 1928**
Des effets positifs ont été relevés.

Tectona grandis — *Schleichera oleosa* — **Deventer 1913**
Mélange recommandé pour l'établissement de forêts mixtes de tecks.

Tectona grandis — *Leucaena glauca* — **Eidmann 1932**
" — *Antidesma bunius*
" — *Pterocarpus indiensis*
" — *Schoutenia ovata*
" — *Cinnamomum iners*
" — *Gluta renghas*
" — *Eugenia subglauca*

" *Swietenia macrophylla*
" *Dalbergia latifolia*

Etude portant sur les plantations en sous-étage. *L. glauca* est adapté. *D. latifolia* l'est peut-être encore plus.

Cupressus spp. *Myrica javanica* **Harencarspel 1908**
ou *Wenlandia rufescens*
Casuarina spp. *Wenlandia junghuniana*
Pittosporum ferrugine
Glochidion varium
Albizia falcataria

Mélanges intimes avec des espèces de cyprès ou de *Casuarina*. Les mélanges par groupes avec des essences qui n'atteignent pas une grande hauteur sont préférables aux mélanges intimes.

Tectona grandis *Leucaena glauca* **Hart 1930b**

Ce mélange n'est favorable que dans ces circonstances particulières.

Santalum album *Leucaena glauca* **Kramer 1925**

Une fois que les racines du *S. album* ont rejoint celles de *Leucaena,* les espèces se sont bien développées.

Tectona grandis *Leucaena glauca* **Kunst 1918**

A condition d'éviter les incendies, les mélanges ont une croissance vigoureuse. Les mélanges naturels sont plus faciles à aménager et donnent de meilleurs résultats que les mélanges artificiels.

Diospyros celebica *Tectona grandis* **Alrasjid 1985**

Swietenia macrophylla) **Siregar et al. 1986**
Aleurites moluccana)
Spathodea campanulata)
Lagerstroemia speciosa) *Melaleuca leucodendron*
Durio zibenthinus)
Artocarpus heterophyllus)
Leucaena leucocephala)

Tous ces mélanges ont été un échec. Allélopathie de *M. leucodendron*?

KENYA

Cupressus lusitanica *Dombeya (?goetzenii)* **Streets 1962**

Grevillea robusta **Graham 1949**

concurrence sur une base d'égalité entre les essences jusqu'à l'âge de 15 ans, mais des éclaircies massives doivent être pratiquées, en raison du développement excessif des houppiers qui entraîne une courbure du fût des cyprès.

MALAISIE (Ouest)

Flindersia brayleyana en une forêt secondaire haute		**Streets 1962**
Swietenia macrophylla	*Gmelina arborea*	**Streets 1962**
Swietenia macrophylla	*Albizia falcataria*	**Streets 1962**
Teck	*Leucaena leucocephala*	**Ng et al. 1982**
Araucaria hunsteinii	"	

Assez prometteur pour lutter contre *Imperata* sur les sites les plus fertiles.

MYANMAR

Tectona grandis	*Pterocarpus macrocarpus*	**Streets 1962**

NEPAL

Schima wallichii	*Pinus roxburghii*	**Gilmour et al. 1990**

et autres feuillus indigènes issus d'une régénération naturelle.

NOUVELLE-CALEDONIE

Agathis lanceolata	*Acacia mearnsii*	**CTFT 1990**
"	*Albizia falcataria*	
"	*végétaux herbacés*	
"	*Arbres feuillus*	

Expérimentation mise en place en 1978. A l'ombre de *Albizia* ou de l'*Acacia, Agathis* pousse bien.

Agathis moorei	*Acacia mangium*	**CTFT 1991**
"	*Albizia falcataria*	
"	*Casuarina equisetifolia*	
"	*Leucaena leucocephala*	

Expérimentation mise en place en 1981. On pense que le taux de mortalité élevé et la croissance médiocre de *A. moorei* sont dus au sol.

Santalum austrocaledonicum	*Pinus caribaea*	**CTFT 1991**
"	*Arillastrum gummiferum*	
"	*Araucaria excelsea*	
"	*Araucaria luxurians*	
"	*Leucaena leucocephala*	
"	*Dalbergia sissoo*	
"	*Albizia falcataria*	
"	*Acacia auriculiformis*	
"	*Khaya senegalensis*	
"	*Tipuana tipu*	
"	*Acacia spirorbis*	
"	*Albizia lebbeck*	
"	*Casuarina equisetifolia*	

" *Casuarina deplancheana*
" *Casuarina stricta*
" *Agathis ovata*

Expérimentation mise en place en 1980. Bons résultats avec *Albizia falcataria, Khaya senegalensis, Acacia spirorbis, Albizia lebbeck* et *Casuarina* spp. Résultats médiocres avec *Pinus caribaea* et *Araucaria* spp.

Agathis lanceolata *Albizia falcataria* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1986.

Araucaria subulata *Albizia falcataria* **CTFT 1991**
Expérimentation mise en place en 1986.

NIGER

Acacia tortilis **CTFT 1991**
Acacia nilotica
Balanites aegyptiaca
Anogeissus leiocarpus
Dalbergia sissoo
Expérimentation mise en place en 1984. Huit parcelles de 25 arbres (5 de chaque espèce), plantées sans aucun ordre.

NIGERIA

Azidarachta indica *Crotolaria striata* **MacGregor 1934**
à 4 mois, la croissance en hauteur réduite d'environ 50 pour cent (de 4.04 m à 2,4 m).

Cholophora excelsa Teck **MacGregor 1934**

Cola cordifolia Teck **MacGregor 1934**
essence étouffée, mais en bonne santé; taux de survie 80 pour cent; essence introduite pour corriger les effets négatifs sur le sol.

Erythrophleum ivorense *Nauclea diderrichii* **Henry 1960**
Mélange non réussi.

Khaya grandifoliola Teck **MacGregor 1934**
A l'âge de 20 ans, domine nettement le teck en hauteur (21 m) - bon mélange.

K. grandifoliola *Triplochiton scleroxylon* **MacGregor 1934**
Dominé en hauteur par *T. scleroxylon* qui devra être éclairci.

K. senegalensis *Dalbergia sissoo* **MacGregor 1934**
D. sissoo attaqué par des champignons.

K. senegalensis	Teck	**MacGregor 1934**

Dégâts de foreurs importants sur *Khaya*.

Lophira alata	Teck	**Henry 1960**

Mélange non réussi.

Mansonia altissima	*Crotolaria striata*	**MacGregor 1934**

Mitragyna ciliata ne donne de bons résultats que dans les zones de plaine, quel que soit le mélange.		**Henry 1960**

Tectona grandis	avec *Cassia siamea*	**Streets 1962**

PHILIPPINES

Tectona grandis	*Leucaena leucocephala*	**Granert & Cadampog 1980**
Swietenia macrophylla	*L.leucocephala*	

SENEGAL

Eucalyptus camaldulensis	*Acacia holosericea*	**CTFT 1991**
"	*Albizia lebbeck*	
"	*Anacardium occidentale*	
"	*Azadirachta indica*	
"	*Cassia siamea*	
"	*Casuarina equisetifolia*	
"	*Prosopis chilensis*	

Expérimentation mise en place en 1979. Seul le mélange *E. camaldulensis* - *A. indica* a eu une croissance normale.

ILES SALOMON

Swietenia macrophylla	*Securinega flexuosa*	**Solomon Islands 1988b**

Expérimentation mise en place en 1988. Résultats prometteurs.

Leucaena leucocephala

la forme de *S. macrophylla* serait supérieure, mais *L. leucocephala* est sensible aux attaques de *Phellinus noxius* et de *Heteropsylla cubana*.

Terminalia calamansanai

Le houppier de *T. calamansanai* se développe trop et est trop vigoureux. Les essences suivantes ne semblent pas avoir été essayées, mais ont été considérées comme non adaptées en raison du développement excessif de leurs houppiers - *Paraserianthes falcataria, Anthocephalus chinensis*.

SRI LANKA

Swietenia macrophylla	*Artocarpus integrifolius*	**Streets 1962**

Swietenia macrophylla	*Tectona grandis* *Artocarpus integrifolius*	**Muttiah 1965**

TAIWAN

Taiwania cryptomerioides *Paulownia taiwania*	en mélange	**Un et al. 1979**

TANZANIE

Cinamomum camphora	*Juniperus procera*	**Streets 1962**

TRINIDAD

Tectona grandis	*Copaifera officinalis* *Cedrela mexicana* *Cordia alliodora*	**Bell 1973**

Toutes ces essences ont tendance à être éliminées par le teck, en raison de l'ombre.

Hyronima caribaea
Tabebuia serratifolia
Byrsonima spicata
Terminalia obovata

régénération naturelle normalement coupée au cours des opérations sylvicoles.

OUGANDA

Chlorophora excelsa	Eucalyptus	**Dawkins 1949**

satisfaisant quand *C. excelsa* est établi à proximité de drains (stations de lutte contre la malaria).

Cassia siamea

concurrence excessive entre les racines.

Vernonia amygdalina

N'élimine pas l'herbe par son ombre; sans intérêt sur le plan économique.

Harungana madagascariensis

sensible à la sécheresse.

Markhamia platycalyx

peu efficace pour éliminer l'herbe par son ombre, mais intéressant sur le plan économique.

Les adjonctions suivantes ont été considérées comme un échec pour des raisons non spécifiées:

Artocarpus sp)
Canarium schweinfurthii)
Caoutchoutier de céara)
Clausena anisata)
Cassia bicapsularis)
Euphorbia tirucalli)
Ficus spp)

Toona serrata)
T. ciliata)

Chlorophora excelsa & *Khaya grandifoliola* — *Phyllanthus discoideus* & *Gmelina arborea*
bons résultats sur les "meilleurs" sites.

Chlorophora excelsa — Eucalyptus — **Streets 1962**

Mélanges non enregistrés dans la banque de données, mais relevés au cours d'une visite au CTFT de Nogent-sur-Marne en 1991.

Mélange	Pays	Période
Acacia auriculiformis/ Eucalyptus camaldulensis	Bénin	1986
Acacia auriculiformis/ Leucaena leucocephala	Bénin	1986
Eucalyptus tereticornis/ Eucalyptus torreliana	Bénin	1986
Eucalyptus tereticornis/ Eucalyptus camaldulensis	Bénin	1986
Eucalyptus tereticornis/ Leucaena leucocephala	Bénin	1986
Acacia auriculiformis/ Eucalyptus torreliana	Bénin	1986
Tectona grandis/ Acacia maconochieana	Bénin	1988-1989
Tectona grandis/ Acacia tenuissima	Bénin	1988-1989
Tectona grandis/ Acacia tumida	Bénin	1988-1989
Tectona grandis/ Anogeissus leiocarpus	Bénin	1988-1989
Tectona grandis/ Azadiracta indica	Bénin	1988-1989

Tectona grandis/ *Cedrela odorata*	Bénin	1988-1989
Tectona grandis/ *Chlorophora excelsa*	Bénin	1988-1989
Tectona grandis/ *Khaya grandifolia*	Bénin	1988-1989
Tectona grandis/ *Khaya senegalensis*	Bénin	1988-1989
Tectona grandis/ *Terminalia ivorensis*	Bénin	1988-1989
Tectona grandis/ *Terminalia superba*	Bénin	1988-1989
Khaya senegalensis/ *Holoptelea grandis*	Bénin	1988-1989
Khaya grandifolia/ *Holoptelea grandis*	Bénin	1988-1989
Diospyros mespiliformis/ *Gmelina arborea*	Bénin	1988-1989
Chlorophora excelsa/ *Afzelia africana*	Bénin	1988-1989
Afzelia africana/ *Acacia amliceps*	Bénin	1988-1989
Pinus patula/ *Callitris spp.*	Burundi	
Khaya senegalensis/ *Dalbergia sissoo*	Cameroun	1984-1986
Acacia senegalensis/ *Khaya senegalensis/* *Azadirachta indica*	Cameroun	1987
Schizolobium parahybum/ *Cordia alliodora*	Equateur	1977
Tarrieta utilis/ *Khaya ivorensis*	Côte d'Ivoire	1926-1960

Triplochyton scleroxylon/ Khaya ivorensis	Côte d'Ivoire	1961-1964
Triplochyton scleroxylon/ Tieghemilla heckelii	Côte d'Ivoire	1961-1964
Triplochyton scleroxylon/ Gmelina spp.	Côte d'Ivoire	1961-1964
Triplochyton scleroxylon/ Terminalia superba	Côte d'Ivoire	1961-1964
Triplochyton scleroxylon/ Tectona grandis	Côte d'Ivoire	1961-1964
Acacia mangium/ Acacia auriculiformis	Côte d'Ivoire	1985-1988
Terminalia superba/ Terminalia ivorensis	Côte d'Ivoire	1985-1989
Terminalia superba/ Tectona grandis	Côte d'Ivoire	1985-1989
Eucalyptus camaldulensis/ Indigofera teysmannii	Madagascar	1951-
Eucalyptus camaldulensis/ Cassia siamea	Madagascar	1951-
Eucalyptus camaldulensis/ Acacia cyanophylla	Madagascar	1951-
Eucalyptus microtheca/ Indigofera teysmannii	Madagascar	1951-
Eucalyptus robusta/ Acacia mangium	Madagascar	1988
Lophira alata/ Swietenia macrophylla	Nigéria	1918-1939
Lophira alata/ Tectona grandis	Nigéria	1918-1939
Tectona grandis/ Lophira alata	Nigéria	1949-1960

Tectona grandis/ *Nauclea diderrichii*	Nigéria	1949-1960
Tectona grandis/ *Lovoa trichilioides*	Nigéria	1949-1960
Tectona grandis/ *Swietenia macrophylla*	Nigéria	1949-1960
Erythrophleum ivorense/ *Nauclea diderrichii*	Nigéria	1949-1960
Nauclea diderrichii/ *Khaya ivorensis*	Nigéria	1949-1960
Nauclea diderrichii/ *Lovoa trichilioides*	Nigéria	1949-1960
Nauclea diderrichii/ *Entandrophragma angolense*	Nigéria	1949-1960
Nauclea diderrichii/ *Entandrophragma cylindricum*	Nigéria	1949-1960
Lovoa trichilioides/ *Khaya ivorensis*	Nigéria	1949-1960
Acacia melanoxylon/ *Pinus radiata*	Rwanda	
Eucalyptus camaldulensis (microtheca)/ *Prosopis juliflora*	Sénégal	
Eucalyptus camaldulensis (microtheca)/ *Acacia holoserica*	Sénégal	
Eucalyptus spp./ *Gmelina arborea*	Sénégal	1983
Tectona grandis/ *Leucaena glauca*	Togo	1910
Tectona grandis/ *Khaya senegalensis*	Togo	1910
Tectona grandis/ *Cassia siamea*	Togo	1910

Tectona grandis/ *Albizzia zygia*	Togo	1910
Tectona grandis/ *Erytrophleum guinensii*	Togo	1910
Acacia mangium/ *Eucalyptus tereticornis*	Togo	1982-1988
Acacia auriculiformis/ *Eucalyptus torreliana*	Togo	1982-1988
Eucalyptus tereticornis/ *Eucalyptus torreliana*	Togo	1988
Eucalyptus saligna/ *Markhamia platycalyx*	Ouganda	1918-1930
Eucalyptus robusta/ *Grevillea robusta*	Ouganda	1960-1965
Eucalyptus robusta/ *Cupressus lusitanica*	Ouganda	1960-1965
Eucalyptus robusta/ *Eucalyptus spp.*	Ouganda	1960-1965
Eucalyptus robusta/ *Toona ciliata*	Ouganda	1960-1965
Aucoumea klaineana/ *Cassia siamea*	Zaïre	1942-1943
Haronga paniculata/ *Smithia bequaerti*	Zaïre	avant 1953
Haronga paniculata/ *Dodonea viscosa*	Zaïre	avant 1953
Haronga paniculata/ *Sesbania spp.*	Zaïre	avant 1953
Eucalyptus spp./ *Bridelia ferruginea*	Zaïre	avant 1953
Eucalyptus spp./ *Bridelia micrantha*	Zaïre	avant 1953

Smithia bequaerti/ Bridelia ferruginea	Zaïre	avant 1953
Smithia bequaerti/ Sakersia laurentii	Zaïre	avant 1953
Smithia bequaerti/ Myrica salicifolia	Zaïre	avant 1953
Smithia bequaerti/ Lacnopylis spp.	Zaïre	avant 1953
Smithia bequaerti/ Trema spp.	Zaïre	avant 1953
Smithia bequaerti/ Markhamia spp.	Zaïre	avant 1953
Dodonea spp./ Bridelia spp.	Zaïre	avant 1953
Dodonea spp./ Trema	Zaïre	avant 1953
Dodonea spp./ Haronga spp.	Zaïre	avant 1953
Markhamia lutea/ Smithia spp.	Zaïre	avant 1953
Markhamia lutea/ Dodonea spp.	Zaïre	avant 1953

ANNEXE 4

SANTAL

Les arbres appartenant à la famille des santalacées sont des hémi-parasites des racines et, bien que l'on ait observé qu'ils parasitaient les graminées et pouvaient parfois exister indépendamment d'un hôte, ils sont presque toujours associés à d'autres arbres et arbustes. C'est pourquoi on a considéré que les plantations mixtes étaient essentielles pour l'établissement et l'aménagement des santals.

Le genre *Santalum* pousse sur une vaste zone géographique.

Australie (1)	*S. spicatum, S, acuminatum,*
du Cap d'York au Victoria et	*S. lanceolatum, S. murrayanum,*
jusqu'à l'Australie occidentale	*S. obtusifolium.* (4)
Nouvelle-Guinée (1)	*S. macgregori*
Nouvelle-Calédonie & Vanuatu (1)	*S. austrocaledonicum*
Fidji (1)	*S. yasi*
Tonga (4)	*S. yasi*
Hawaï (3)	*S. elipticum, S.freycinetianum*
Tahiti, Marquises, Iles Henderson,	*S. haleakalae, S. paniculatum*
Iles Australes, Iles de Cook,	*S. insulare*
Iles de la Société (4)	
Indonésie orientale (1) (à présent presque entièrement limité au Timor-Occidental)	*S. album*
Inde (2) (essentiellement sur le plateau du Dekkan dans le Karnataka et le Tamil-Nadu, mais pousse dans tout le pays)	*S. album*
Juan Fernandez (4)	*S. fernandezianum* (disparu)

(1) McKinnell (1990)
(2) Rai (1990)
(3) Hirano (1990)
(4) Applegate et al. (1990)

Les grumes de qualité supérieure sont utilisés pour la sculpture et c'est *S. album* qui produit les bois de la meilleure qualité car il a un grain serré et une forte teneur en huile; les prix peuvent atteindre 9 400 dollars E.-U. la tonne en Inde. Les bois de qualité inférieure sont vendus sur le marché de l'encens variant entre 2 000 et 5 000 dollars E.-U. la tonne, mais les racines et les billes de *S. Spicatum* et *S. album*, qui ont une teneur en huile plus élevée, peuvent atteindre 7 000 dollars E.-U. la tonne. L'Australie fournit la quasi-totalité du marché mondial de l'encens par l'intermédiaire de Taïwan et de Hong Kong. Les copeaux de bois et le bois pulvérisé se vendent environ 2 300 dollars E.-U. la tonne. L'huile de santal est essentiellement produite en Inde, où une tonne de duramen de *S. album* peut produire 60 kg d'huile, qui se vend à l'exportation au prix minimum de 1 500 dollars E.-U. le kg. L'huile est essentiellement destinée aux parfumeries de France et de New York (Applegate et al. 1990).

Les rendements en huile de duramen varient en fonction des espèces (McKinnell 1990).

5-7 pour cent	*S. album et S. yasi*
3-6 pour cent	*S. austrocaledonicum*
2 pour cent	*S. spicatum*

S. album a une densité en bois de 930 - 950 kg/m^3.

Certaines espèces, comme *S.acuminatum* et *S. lanceolatum* qui poussent en Australie, ont un rendement en huile tellement faible que celle-ci n'est habituellement pas distillée (McKinnell 1990).

S. album est l'essence la plus précieuse. Elle est exploitée depuis plusieurs siècles en Inde et en Indonésie, dans les îles de Timor (Timor-Occidental), de Sumba et de Flores et elle est actuellement introduite dans de nombreux pays (Hawaï (Hirano 1990), Java et Bali (Applegate et al. 1990), Australie occidentale (McKinnel 1990)). On a soutenu que *S.album* était une espèce introduite en Inde, mais cette théorie a été écartée du fait que cet arbre fait partie intégrante de la littérature, de l'éthique et de la culture indienne (Rai 1990).

D'après certains documents, le santal était utilisé en Inde il y a 4 000 ans (Rai 1990) et il y a 1 500 ans à Hawaï (Merlin et Ravenswaay 1990), mais l'exploitation a pris un essor considérable avec l'exploration du Pacifique par les occidentaux au XVIIIe siècle. Vers 1870, le santal avait pratiquement disparu de nombreuses îles du Pacifique et c'est tout récemment que des mesures ont été prises pour règlementer son exploitation afin de conserver l' espèce. Bien qu'en Australie occidentale, la densité de peuplement de *S. spicatum* soit faible (2/ha), cet arbre pousse dans une aire si étendue que, bien que la coupe ait pratiquement échappé à toute réglementation au cours du siècle dernier et au début du XXe siècle, il existe encore des volumes importants de cette espèce. L'histoire de l'exploitation du santal en Australie occidentale (Statham 1990) donne une bonne idée des fluctuations du commerce. Les exportations de *S. spicatum* ont commencé en 1843 et ont atteint 9 600 tonnes pendant quelques années à la fin du XIXe siècle et au début du XXe siècle. A partir du début des années 20, époque où l'on exportait jusqu'à 14 300 tonnes par an, les ventes extérieures ont commencé à baisser, tombant à environ 1 000 tonnes par an à la fin des années 30. Pendant la deuxième guerre mondiale, les exportations ont été interrompues, mais elles sont à présent remontées à 1 800 tonnes par an et ont représenté 11,5 millions de dollars australiens en 1989. L'exploitation est aujourd'hui rigoureusement réglementée, mais malgré tout, on a estimé que le capital sur pied naturel ne durera plus qu'une soixantaine d'années (McKinnell 1990). Actuellement, environ la moitié de la récolte de santal est constituée par du bois mort, mais la pratique qui consiste à exploiter l'arbre entier, y compris la bille et les racines, qui sont les parties les plus riches en huile, n'a pas été abandonnée (McKinnell 1990). Même en 1954, le Département forestier déclarait dans un rapport que les résultats, qui provenaient généralement de travaux expérimentaux, ne justifiaient pas la culture du santal à grande échelle (Statham 1990); pourtant, on a encouragé les "arrachages" pour remplacer des arbres par des santals à drupes. Plus récemment le Sandalwood Research Institute a étudié la possibilité d'introduire *S. album*, une espèce qui devrait avoir une révolution de 30 ans, alors que celle de *S. spicatum* dure entre 60 et 80 ans; ces expériences sont prometteuses (McKinnell 1990).

Santalum spp. peut pousser sur une vaste gamme de sols et supporte des températures comprises entre 0 et 40°C et une pluviométrie allant de 500 à 3 000 mm (Neil 1990). En Inde cet arbre est considéré comme une espèce des forêts sèches décidues et lorsqu'une station devient mésoïque, le santal se rabat sur des sites plus secs, mais il est très exposé au feu (Rai 1990). Dans le Queensland, on a constaté qu'il pousse dans des bois peu denses, mais qu'il tend à être plus commun à la lisière extérieure des forêts sèches basses (scrubs) de *Melaleuca acacioides* et *Excoecaria parvifolia* (gutta percha), près des lignes de drainage. Sur ces sites, à l'interface des broussailles de *M. acacioides* et de la forêt claire, l'herbe est rare et il n'y a pas d'incendies alors qu'ils sont fréquents dans les bois clairs fortement enherbés (Applegate et al. 1990b). En Australie occidentale, *Santalum* pousse sur des sites à faible pluviosité et ne semble se régénérer qu'après plusieurs années humides consécutives.

Le santal est un hémiparasite des racines et on sait qu'il exploite au moins 300 espèces de végétaux, des graminées aux arbres; on a aussi constaté qu'il parasite d'autres santalacées (Rai 1990). Il s'attache à son hôte au moyen de suçoirs et semble prélever N, P, et des acides aminés de base sur son hôte alors qu'il puise Ca et K dans le sol (Neil 1990). Aucune étude ne traite de son influence sur l'hôte, mais il ne semble pas l'affaiblir. Du reste, l'arbre hôte doit être choisi avec soin et ne pas être suffisamment vigoureux pour étouffer le santal.

Lorsque le santal est cultivé en pépinière, il faut laisser le jeune plant s'attacher à un hôte, ce que l'on fait en élevant le santal et l'hôte dans le même pot (Neil 1990, Rai 1990). Toutefois, en Australie occidentale, cette technique n'est utilisée qu'à des fins de recherche et le risque de rompre la liaison entre le santal et l'hôte au repiquage est trop élevé pour que des plantations commerciales puissent être établies suivant cette méthode; pour les plantations commerciales, l'ensemencement direct en pleine terre est préconisé, mais 1 pour cent seulement des semences donnent naissance à un arbre (McKinnell 1990). En Inde, on utilise un bambou évidé pour l'ensemencement direct dans des fourrés (Rai 1990). Malgré l'expérience de l'Australie occidentale, plusieurs pays ont constaté que c'est avec un système de "double hôte" que l'on obtient les meilleurs résultats, lorsque l'on cultive artificiellement le santal. Au stade de la pépinière, on utilise un hôte primaire qui doit être un arbuste peu longève à croissance lente; *Cajanus cajan* en Inde (Rai 1990), *Sesbania grandiflora*, *Breynia cerrua*, *Amaranthus* spp., *Medicago* spp. et tomate, *calotropis*, *Capsicum* à Timor (Neil 1990; McKinnell 1990), *Althernanthera sessilis* dans l'archipel du Vanuatu (Bule et Daruhl 1990), *Gastrolobium microcarpum* et *Acacia pulchella* dans la zone productrice de blé en Australie occidentale et *Atriplex rhagodioides*, *Cratystylis subspinescens* et *Mariana polysterygia* dans la zone aride (McKinnell 1990). *M. polysterygia* est considéré comme un hôte particulièrement approprié parce qu'il est épineux et assure une protection contre l'abroutissement auquel le santal est particulièrement exposé. Au moment du repiquage en pleine terre, le jeune plant doit être établi à proximité d'un hôte secondaire pérenne; dans ce but, on plante généralement sur un rang le santal et l'hôte primaire et sur le rang suivant l'hôte secondaire, à un écartement de 2 à 3 m (Rai 1990). Les essences secondaires recommandées sont *Albizia* spp., les acacias (en particulier *A. nilotica*) et d'autres légumineuses comme *Bauhinia biloba*, *Dalbergia sissoo* et *Terminalia* spp. en Inde (Neil 1990); *Casuarina equisetifolia*, *Pongamia pinnata*, *Melia azedarach*, *Wrightia tinctoria* et *Cassia siamea* (Rai 1990), en revanche *Cassia fistula* et *Acacia auriculiformis* sont considérés comme des hôtes médiocres (Ananthia et al. 1988); *Albizia falcataria*,

A. lebbek, *Acacia spirorbis*, *Dalbergia* spp., *Casuarina* spp. et *Khaya senegalensis* sont recommandés en Nouvelle-Calédonie, mais *Pinus caribaea* et *Araucaria* spp. ont donné des résultats médiocres (CTFT 1991); *Acacia acuminata* et *A. aneura* donnent de bons résultats en Australie occidentale (McKinnell 1990).

1. *Acacia mearnsii* au Kenya. Plantation industrielle destinée à la production de tanin, de charbon de bois, de perches et de bois de feu. Ecartement réduit, sous-bois peu fourni. CSIRO.

2. Recrû d'un taillis pur d'*Eucalyptus globulus* sur des souches plantées en 1863. Absence de sous-étage bien que le peuplement soit peu dense. Tamil-Nadu, Inde. CSIRO

3. Mélange de *Tarrieta utilis* et de *Khaya sp.* (25 ans) à Yapo, Côte d'Ivoire. CTFT.

4. Peuplement pur de *Terminalia superba* (8 ans). Bien que l'écartement entre les arbres soit réduit, le sous-bois s'est développé. Tene, Côte d'Ivoire. CTFT

5. Peuplement pur de *Maesopsis eminii* (19 ans). Un sous-étage vigoureux s'est développé sous ce peuplement peu dense à couvert clair. Anguenedou, Côte d'Ivoire. CTFT.

6. Peuplement pur de *Pinus caribaea* (22 ans). Grâce à des éclaircies régulières, un sous-bois dense a pu se développer. Yapo, Côte d'Ivoire. CTFT

7. Un jeune mélange de tecks et de *Terminalia superba* (3 ans). Tene, Côte d'Ivoire. CTFT.

8. Forêt pure de teck (env. 12 ans), Navagotha, Sri Lanka. Pas de sous-bois; la litière feuillue prend feu facilement par temps sec. F. Ng

9. Peuplement mélangé de teck, *Swietenia macrophylla* et *Artocarpus heterophyllus* (env. 80 ans). Sundapola, Sri Lanka. F. Ng.

10. Régénération d'acajous, qui tendront à devenir l'espèce dominante de cette plantation mixte. Sundapola, Sri Lanka. F. Ng.

CAHIERS TECHNIQUES DE LA FAO

ÉTUDES FAO: FORÊTS

1 Contrats d'exploitation forestière sur domaine public, 1977 (A E F)
2 Planification des routes forestières et des systèmes d'exploitation, 1977 (A E F)
3 Liste mondiale des écoles forestières, 1977 (A/E/F)
3 Rév. 1. Liste mondiale des écoles forestières, 1981 (A/E/F)
3 Rév. 2. Liste mondiale des écoles forestières, 1986 (A/E/F)
4/1 La demande, l'offre et le commerce de la pâte et du papier – Vol. 1, 1977 (A E F)
4/2 La demande, l'offre et le commerce de la pâte et du papier – Vol. 2, 1977 (A E F)
5 The marketing of tropical wood, 1976 (A E)
6 Manuel de planification des parcs nationaux, 1978 (A E** F)
7 Le rôle des forêts dans le développement des collectivités locales, 1978 (A Ar E F)
8 Les techniques des plantations forestières, 1979 (A* Ar C E F)
9 Wood chips – production, handling, transport, 1976 (A C E)
10/1 Estimation des coûts d'exploitation à partir d'inventaires forestiers en zones tropicales – 1. Principes et méthodologie, 1980 (A E F)
10/2 Estimation des coûts d'exploitation à partir d'inventaires forestiers en zones tropicales – 2. Recueil des données et calculs, 1980 (A E F)
11 Reboisement des savanes en Afrique, 1981 (A F)
12 China: forestry support for agriculture, 1978 (A)
13 Prix des produits forestiers 1960-1977, 1979 (A/E/F)
14 Mountain forest roads and harvesting, 1979 (A)
14 Rev. 1. Logging and transport in steep terrain, 1985 (A)
15 AGRIS foresterie – Catalogue mondial des services d'information et de documentation, 1979 (A/E/F)
16 Chine: industries intégrées du bois, 1980 (A E F)
17 Analyse économique des projets forestiers, 1980 (A E F)
17 Sup. 1. Economic analysis of forestry projects: case studies, 1979 (A E)
17 Sup. 2. Economic analysis of forestry projects: readings, 1980 (A C)
18 Prix des produits forestiers 1960-1978, 1980 (A/E/F)
19/1 Pulping and paper-making properties of fast-growing plantation wood species – Vol. 1, 1980 (A)
19/2 Pulping and paper-making properties of fast-growing plantation wood species – Vol. 2, 1980 (A)
20 Amélioration génétique des arbres forestiers, 1985 (A C E F)
20/2 A guide to forest seed handling, 1985 (A E)
21 Influences exercées par les essences à croissance rapide sur les sols des régions tropicales humides de plaine, 1982 (A E F)
22/1 Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers – Vol. 1. Estimation des volumes, 1980 (A C E F)
22/2 Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers – Vol. 2. Etude et prévision de la production, 1980 (A C E F)
23 Prix des produits forestiers 1961-1980, 1981 (A/E/F)
24 Cable logging systems, 1981 (A C)
25 Public forestry administrations in Latin America, 1981 (A)
26 La foresterie et le développement rural, 1981 (A E F)
27 Manuel d'inventaire forestier, 1981 (A F)
28 Small and medium sawmills in developing countries, 1981 (A E)
29 La demande et l'offre mondiales de produits forestiers 1990 et 2000, 1982 (A E F)
30 Les ressources forestières tropicales, 1982 (A E F)
31 Appropriate technology in forestry, 1982 (A)
32 Classification et définitions des produits forestiers, 1982 (A/Ar/E/F)
33 Exploitation des forêts de montagne, 1984 (A E F)
34 Espèces fruitières forestières, 1982 (A E F)
35 Forestry in China, 1982 (A C)
36 Technologie fondamentale dans les opérations forestières, 1982 (A E F)
37 Conservation et mise en valeur des ressources forestières tropicales, 1983 (A E F)
38 Prix des produits forestiers 1962-1981, 1982 (A/E/F)
39 Frame saw manual, 1982 (A)
40 Circular saw manual, 1983 (A)
41 Techniques simples de carbonisation, 1983 (A E F)
42 Disponibilités de bois de feu dans les pays en développement, 1983 (A Ar E F)
43 Systèmes de revenus forestiers dans les pays en développement, 1987 (A E F)
44/1 Essences forestières, fruitières et alimentaires – 1. Exemples d'Afrique orientale, 1984 (A E F)
44/2 Essences forestières, fruitières et alimentaires – 2. Exemples de l'Asie du Sud-Est, 1986 (A E F)
44/3 Food and fruit-bearing forest species – 3. Examples from Latin America, 1986 (A E)
45 Establishing pulp and paper mills, 1983 (A)
46 Prix des produits forestiers 1963-1982, 1983 (A/E/F)
47 Enseignement technique forestier, 1989 (A E F)
48 Evaluation des terres en foresterie, 1988 (A C E F)
49 Le débardage de bœufs et de tracteurs agricoles, 1986 (A E F)
50 Transformations de la culture itinérante en Afrique, 1984 (A F)
50/1 Changes in shifting cultivation in Africa – seven case-studies, 1985 (A)
51/1 Etudes sur les volumes et la productivité des peuplements forestiers tropicaux – 1. Formations forestières sèches, 1984 (A F)
52/1 Cost estimating in sawmilling industries: guidelines, 1984 (A)
52/2 Field manual on cost estimation in sawmilling industries, 1985 (A)
53 Aménagement polyvalent intensif des forêts au Kerala, 1985 (A E F)
54 Planificación del desarrollo forestal, 1984 (E)
55 Aménagement polyvalent intensif des forêts sous les tropiques, 1985 (A E F)
56 Breeding poplars for disease resistance, 1985 (A)
57 Coconut wood – processing and use, 1985 (A E)
58 Sawdoctoring manual, 1985 (A E)
59 Les effets écologiques des eucalyptus, 1986 (A C E F)
60 Suivi et évaluation des projets de foresterie communautaire, 1989 (A E F)
61 Prix des produits forestiers 1965-1984, 1985 (A/E/F)
62 Liste mondiale des institutions s'occupant des recherches dans le domaine des forêts et des produits forestiers, 1985 (A/E/F)
63 Industrial charcoal making, 1985 (A)
64 Boisements en milieu rural, 1987 (A Ar E F)
65 La législation forestière dans quelques pays africains, 1986 (A F)

66 Forestry extension organization, 1986 (A C E)
67 Some medicinal forest plants of Africa and Latin America, 1986 (A)
68 Appropriate forest industries, 1986 (A)
69 Management of forest industries, 1986 (A)
70 Terminologie de la lutte contre les incendies de forêt, 1986 (A/E/F)
71 Répertoire mondial des institutions de recherche sur les forêts et les produits forestiers, 1986 (A/E/F)
72 Wood gas as engine fuel, 1986 (A E)
73 Produits forestiers – Perspectives mondiales: projections 1985-2000, 1986 (A/E/F)
74 Guidelines for forestry information processing, 1986 (A)
75 An operational guide to the monitoring and evaluation of social forestry in India, 1986 (A)
76 Wood preservation manual, 1986 (A)
77 Databook on endangered tree and shrub species and provenances, 1986 (A)
78 Appropriate wood harvesting in plantation forests, 1987 (A)
79 Petites entreprises forestières, 1988 (A E F)
80 Forestry extension methods, 1987 (A)
81 Guidelines for forest policy formulation, 1987 (A C)
82 Prix des produits forestiers 1967-1986, 1988 (A/E/F)
83 Trade in forest products: a study of the barriers faced by the developing countries, 1988 (A)
84 Produits forestiers – Perspectives mondiales: projections 1987-2000, 1988 (A/E/F)
85 Programmes d'enseignement en matière de vulgarisation forestière, 1988 (A/E/F)
86 Forestry policies in Europe, 1988 (A)
87 Petites opérations de récolte du bois et d'autres produits forestiers par les ruraux, 1989 (A E F)
88 Aménagement des forêts tropicales humides en Afrique, 1990 (A F P)
89 Review of forest management systems of tropical Asia, 1989 ((A)
90 Foresterie et sécurité alimentaire, 1993 (A Ar E F)
91 Outils et machines simples d'exploitation forestière, 1990 (A E F)
(Publié uniquement dans la Collection FAO: Formation, n° 18)
92 Forestry policies in Europe – an analysis, 1989 (A)
93 Energy conservation in the mechanical forest industries,1990 (A E)
94 Manual on sawmill operational maintenance, 1990 (A)
95 Prix des produits forestiers 1969-1988, 1990 (A/E/F)
96 Planning and managing forestry research: guidelines for managers, 1990 (A)
97 Produits forestiers non ligneux: Quel avenir? 1992 (A E F)
98 Les plantations à vocation de bois d'œuvre en Afrique intertropicale humide, 1991 (F)
99 Cost control in forest harvesting and road construction, 1992 (A)
100 Introduction à l'ergonomie forestière dans les pays en développement, 1994 (A E F)
101 Aménagement et conservation des forêts denses en Amérique tropicale. 1992 (A F P)
102 Gérer et organiser la recherche forestière, 1993 (A E F)
103 Les plantations forestières mixtes et pures dans les régions tropicales et subtropicales, 1995 (A E F)
104 Forest products prices, 1971-1990, 1992 (A)
105 Compendium of pulp and paper training and research institutions, 1992 (A)
106 Evaluation économique des impacts des projets forestiers, 1994 (A F)
107 Conservation des ressources génétiques dans l'aménagement des forêts tropicales – Principes et concepts, 1994 (A F)
108 A decade of energy activities within the Nairobi programme of action, 1993 (A)
109 FAO/IUFRO directory of forestry research organizations, 1993 (A)
110 Actes de la réunion d'experts sur la recherche forestière, 1993 (A/E/F)
111 Forestry policies in the Near East region: analysis and synthesis, 1993 (A)
112 Evaluation des ressources forestières 1990 – Pays tropicaux, 1994 (A E F)
113 Conservation *ex situ* de pollen et de graines, et de cultures *in vitro* de plantes ligneuses pérennes, 1994 (A F)
114 Analyse d'impacts de projets forestiers: problèmes et stratégies, 1995 (A F E)
115 Forestry policies of selected countries in Asia and the Pacific, 1993 (A)
116 Les panneaux à base de bois, 1993 (F)
117 Mangrove forest management guidelines, 1993 (A)
118 Biotechnology in forest tree improvement, 1994 (A)
119 Les produits bois reconstitués, liants en environnement, 1994 (F)
120 Decline and dieback of trees and forests – A global overview, 1994 (A)
121 Ecología y enseñanza rural – Manual para profesores rurales del area andina, 1994 (E)
122 Readings in sustainable forest management, 1994 (A)
123 Enseignement forestier – Tendances récentes et perspectives, 1994 (A F)
124 Forest resources assessment 1990, Global syntesis, (E**)
125 Prix de produits forestiers 1973-1992, 1995 (A/E/F)
126 Climate change, forest and forest management - an overview, 1995 (A)

Disponibilité: mai 1995

A – Anglais
Ar – Arabe
C – Chinois
E – Espagnol
F – Français
P – Portugais
Multil. – Multilingue
* Epuisé
** En préparation

On peut se procurer les Cahiers techniques de la FAO auprès des points de vente des publications de la FAO, ou en s'adressant directement à la Section distribution et ventes, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie.