

L'étude tente de déterminer la meilleure façon de valoriser les surfaces cultivées en cocotier par l'adjonction de cultures intercalaires. Les modèles architecturaux du cocotier et du cacaoyer conduisent à des maquettes tridimensionnelles simulant l'association des deux plantes. Le maïs et la patate douce sont aussi étudiés. Une analyse économique calcule les avantages et les inconvénients de chaque association.

Le contenu de cet article est issu d'un rapport intitulé Contract Ts3-Ct92-0132 « Coconut-based farming systems. Operational and economic analysis models ». Final report, Cirad-cp, mars 1998.

Les cultures associées avec le cocotier

Modèle de fonctionnement et d'analyse économique

Braconnier S.¹, **Chipungahelo G**², **Margate R.Z.**³, **Kleih U.**⁴

¹ CIRAD-CP, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

² Mikocheni Agricultural Research Institute (auparavant National Coconut Development Programme), POB 6226, Dar es Salaam, Tanzanie

³ Philippine Coconut Authority, Davao Research Center, Bago, Oshiro, Davao City, Philippines

⁴ Natural Resources Institute, University of Greenwich, Chatham Maritime, Kent ME4 4TB, Royaume-Uni

La cocoteraie mondiale couvre une superficie d'environ 11,5 millions d'hectares. Les petites plantations (< 3-4 ha) fournissent 96 % de la production mondiale de coprah. Sur ces petites exploitations, le cocotier est presque toujours associé à d'autres cultures. Les planteurs, soit en raison d'une vieille habitude culturelle, soit sous l'effet d'une pression foncière grandissante, essaient de valoriser les surfaces cultivées par l'intensification des systèmes de production.

Les motivations sont très variées. Une culture en association avec le cocotier peut être envisagée pour contrôler des adventices, restaurer ou améliorer la fertilité des sols, produire du bois de chauffage, nourrir du bétail, diversifier les cultures ou, encore, augmenter la rentabilité de la plantation. Cependant, même si cette pratique est très répandue, les résultats agronomiques restent spécifiques des sites expérimentaux.

Leur transposition est rendue difficile par l'absence d'observations précises sur les modalités de l'association et la méconnaissance des phénomènes de compétition entre les cultures.

Dans les associations à base de cocotier, ce dernier est, dans la majorité des situations, la plante dominante. La première étape de notre étude est la caractérisation par de nombreux paramètres, de cette strate dominante, afin de pouvoir élaborer un modèle architectural capable de calculer des maquettes informatiques représentant des plantations de cocotiers.

Une seconde partie est consacrée à l'approfondissement des connaissances du fonctionnement du cocotier. L'élaboration d'un modèle de fonctionnement, même simplifié, nécessite, en effet, de mieux connaître et d'estimer les entrées (principalement la photosynthèse) et les sorties (tous les phénomènes de respiration, la production, la croissance...) du système considéré.

La troisième partie concerne, plus particulièrement, les associations de culture à base de cocotier. Une attention particulière est portée à l'association cocotier/cacaoyer, pour laquelle la modélisation de l'architecture des systèmes racinaires et aériens, ainsi que les consommations en eau des cultures, en plantation pure et en association, sont étudiées de manière approfondie. En outre, un essai multilocal, associant le cocotier au maïs, permet d'apprécier les contraintes s'exerçant d'une plante par rapport à l'autre. Des essais associant le cocotier à d'autres cultures (haricot-mungo, haricot dolique, pois d'Angola, ananas...) apportent également des résultats intéressants concernant les fonctions de production des plantes associées au cocotier.

Enfin, une dernière partie est consacrée à l'étude d'un modèle d'analyse économique des systèmes de culture en association avec le cocotier.

Modélisation de l'architecture du cocotier

Le modèle architectural du cocotier est le modèle de Corner (Hallé *et al.*, 1978), qui se définit par la présence d'un axe unique feuillé avec des inflorescences latérales. Le travail de description architecturale d'un arbre porte donc, avant tout, sur les mensurations et la géométrie de ses constituants (Margate et Eroy, 1997 ; Dauzat et Eroy, 1997). Certaines mesures préliminaires servent à dégager des caractéristiques architecturales propres à la variété étudiée. Ce sont principalement : les longueurs respectives du pétiole et du rachis ; l'arcure des palmes ; la position des folioles sur le rachis ; l'évolution de la longueur des folioles en fonction de leur position ; l'angle « vertical » et « horizontal » d'insertion des folioles en fonction de leur position ; la forme des folioles en fonction de leur rang relatif.

Ces observations sont assez lourdes mais il n'est pas, *a priori*, nécessaire de les réitérer sur chaque nouveau site. A l'inverse, d'autres mesures ont pour but de caractériser une cocoteraie donnée, et concernent : la hauteur, le diamètre et le dévers du stipe ; le nombre de palmes ; la longueur de leur rachis ; l'inclinaison des palmes (mesurée à la base du rachis) ; le nombre de folioles de part et d'autre du rachis ; la longueur des plus grandes folioles de part et d'autre du rachis.

Ces mesures sont rapides et ne posent pas de problème particulier. Les observations ont été réalisées sur les variétés :

- GOA x GRL, un hybride de deux Grands (Grand Ouest Africain et Grand Rennell). Ces travaux ont été réalisés en 1992 (Girard, 1992) ;
- trois variétés du Vanuatu : une naine, NRV (Nain Rouge Vanuatu), une variété grande, GVT (Grand du Vanuatu), ainsi que l'hybride des deux, NRV x GVT. Ces travaux ont été effectués à Santo, en 1993-1994 ;
- le Laguna Tall, variété grande locale des Philippines (Dauzat et Eroy, 1997).

A partir des descriptions effectuées sur les stipes, les palmes et les folioles, des « maquettes informatiques » ont pu être créées, pour le GOA x GRL, le NRV x GVT et le Laguna Tall.

Simulations de modèles tridimensionnels de cocotiers

Bien que le logiciel de simulation Amap puisse être utilisé pour générer des cocotiers avec toute la précision désirée, le choix a été fait d'écrire un programme spécifique pour les raisons suivantes :

- la « paramétrisation » des données architecturales est spécifique au cocotier, donc plus simple ;
- le même programme génère simultanément des maquettes détaillées d'arbres et des maquettes simplifiées ;
- le programme étant de dimension beaucoup plus réduite, son installation sur micro-ordinateur nécessite moins de mémoire centrale.

L'ensemble des données architecturales permet donc de générer des maquettes tridimensionnelles de cocotier, qui tiennent compte de la variabilité naturelle des individus. Il est alors possible de générer le processus stochastique d'une population d'arbres et de reconstituer une plantation.

L'intérêt principal est de pouvoir choisir et tester le dispositif de plantation. Par exemple, dans le cas du Laguna Tall, nous avons étudié, par simulation informatique, des dispositifs de plantation en carré de 10, 9, 8,5 et 8 m de côté, ainsi que des dispositifs en triangles équilatéraux de 11, 10, 9 et 8,5 m de côté. Il est, bien sûr, possible de combiner chacun de ces dispositifs avec des élagages ou des abattages plus ou moins importants, de façon à recréer des schémas de plantations que l'on peut retrouver dans la réalité.

Caractérisation du climat radiatif sous cocoteraie

Cette étude consiste à déterminer la quantité de Rpu (Rayonnement photosynthéti-

quement utile) ou PAR (*Photosynthetically active radiation*) transmise à travers la strate arborée. La mesure directe par capteurs PAR a été préférée à la mesure indirecte par photographie hémisphérique.

Le protocole d'étude comprend un capteur placé au-dessus du couvert végétal, mesurant le PAR incident, et 32 capteurs répartis au sol, sous le couvert, à l'intérieur de deux triangles élémentaires adjacents (Girard, 1992). Cet échantillonnage très dense a été choisi pour analyser la répartition du rayonnement transmis au cours de la journée ; l'objectif étant ensuite de confronter ces résultats aux simulations informatiques.

En effet, grâce au développement, par le laboratoire de modélisation du Cirad¹, des modèles radiatifs spécifiques Mir et Transrad, les transferts radiatifs ont été simulés (Dauzat et Eroy, 1997).

Validation du modèle et expériences de simulation

Outre la validation visuelle du modèle architectural, il est indispensable d'obtenir une validation par d'autres voies. Les premières simulations pour la variété Laguna Tall ont mis en évidence le peu d'influence des propriétés optiques des feuilles et du sol sur la transmission du rayonnement. Elles ont permis de caler le modèle à partir de l'angle formé par les deux limbes de chacune des folioles. En effet, cette dernière donnée n'a pas pu être mesurée au champ. Après différents tests, la valeur de cet angle a été fixée à 35° pour le Laguna Tall. Le modèle fournit alors des simulations qui sont très proches des valeurs mesurées, quel que soit l'âge étudié (figure 1).

L'obtention d'un modèle architectural correct, utilisé pour effectuer des simulations de transfert radiatif, permet de répondre à certaines interrogations. La transmission du rayonnement a été étudiée en fonction :

- des conditions radiatives sur la transmission du rayonnement. Il est, en effet, intéressant de connaître l'influence d'une journée très ensoleillée, ou à l'inverse très couverte, sur la transmission du rayonnement ;
- de la latitude et du jour de l'année. Ces simulations peuvent donner des indications sur les effets saisonniers et sur le choix d'implantation de nouvelles plantations ;
- de l'âge des cocotiers, et du dispositif de plantation (en triangle ou en carré).

¹ Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

Ces simulations montrent que le taux de transmission d'une plantation en carré est supérieur à celui obtenu par un dispositif en triangle ;

- de la direction de plantation (cas d'une plantation en triangle). L'étude montre son influence négligeable sur le taux de transmission du rayonnement PAR ;
- de la densité et du dispositif de plantation. Ce dernier n'a pas une influence prononcée sur la transmission du rayonnement ;
- de l'élagage des palmes. Par cette technique, le taux de pénétration de la lumière peut être augmenté de 25 à 40 %, avec un élagage des feuilles de rang > 18. L'élagage est potentiellement une solution afin de réduire la compétition pour la lumière entre les cocotiers et les cultures associées. A condition de vérifier l'effet dépressif à long terme de cette pratique culturale sur le cocotier.

Conclusion

Le modèle architectural du cocotier, et les simulations de transfert radiatif, sont des outils très importants. Connaissant les cultures qui vont être associées au cocotier, et surtout leurs besoins en lumière, on peut tester les différents dispositifs (triangle, carré, ligne...), les densités, et les pratiques culturales (différents abattages ou élagages), afin de déterminer le meilleur dispositif de plantation du cocotier pour optimiser la captation de la lumière par les cultures. Ces programmes fonctionnent pour

l'instant sur station Silicon Graphics. Il est prévu, à moyen terme, d'élaborer une version utilisable sur micro-ordinateur, de façon à permettre un meilleur accès.

Approfondissement des connaissances sur le fonctionnement du cocotier

L'élaboration d'un premier modèle de fonctionnement du cocotier nécessite une bonne connaissance de la plante. Des observations ont été réalisées sur les échanges gazeux foliaires, la répartition des biomasses et le système racinaire.

Les échanges gazeux

Les mesures sur les différents sites ont été faites avec un matériel identique : l'auto-analyseur de CO₂ ADC, modèle LCA4. Auparavant, un important travail de mise au point méthodologique a été effectué afin de standardiser les observations et d'obtenir des valeurs fiables.

Au Vanuatu (Braconnier, 1998), la photosynthèse nette du cocotier NRV x GVT, en conditions hydriques non limitantes, possède les caractéristiques suivantes (figure 2) :

- un point de compensation lumineux à 50 $\mu\text{mole.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$;
- une intensité maximale de l'ordre de 17 $\mu\text{mole.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$;
- un plateau de saturation atteint pour des rayonnements PAR supérieurs à 1 100 $\mu\text{mole.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$;

Avec ce type d'appareil, la courbe de saturation de la photosynthèse par le gaz carbonique est étudiée pour une gamme de concentrations en CO₂ allant de 180 à 1 500 vpm.

En outre, l'utilisation de chambres de mesures appropriées permet d'évaluer les paramètres suivants :

- respiration des folioles = - 0,64 $\mu\text{mol CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$;
- respiration du stipe = - 40 $\mu\text{g CH}_2\text{O.kg ms}^{-1}.\text{j}^{-1}$ (ms : matière sèche).

Il est évident que les valeurs données ci-dessus sont considérablement modifiées par tout changement des conditions climatiques (*Vapour Pressure Deficit* : déficit de saturation de l'air entre la feuille et l'atmosphère, rayonnement, température) ou toute modification des facteurs trophiques de l'arbre (alimentation en eau, nutrition en chlorure...). En Tanzanie, par exemple, la valeur moyenne de la photosynthèse du Grand Est Africain ne dépasse pas 10 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Chipungahelo et Ngereza, 1998).

Des observations réalisées sur des palmes de rangs différents permettent de donner l'évolution des échanges gazeux avec l'âge physiologique de la palme.

Des mesures de masse surfacique, réalisées pendant plusieurs journées au cours de l'année, montrent que, chez le cocotier, ce paramètre n'augmente pratiquement pas au cours de la journée. Il ne semble donc pas y avoir de stockage des assimilats sur les lieux de synthèse.

Etude des biomasses du cocotier

Une étude statique est tout d'abord réalisée, afin de connaître le poids sec des différents organes d'un cocotier, et leur importance relative (Braconnier, 1996). Ces données sont ensuite utilisées pour connaître la dynamique de répartition de la matière sèche sur une année. Dans ces différentes études, le système racinaire n'a pas été pris en compte.

Les palmes représentent des lieux de consommation en hydrates de carbone importants jusqu'au rang 7, et les régimes jusqu'au rang 20. Au-delà, la consommation en assimilats est due essentiellement aux phénomènes de respiration d'entretien.

Sur pied, la couronne de palmes représente la moitié de la biomasse totale, et les régimes seulement le sixième (figure 3). Ces rapports sont considérablement modifiés par les observations dynamiques. En effet, la biomasse des feuilles émises pendant une année ne représente plus que le tiers de la biomasse totale produite par les



Figure 1. Valeurs de PAR simulées et mesurées pour différents traitements d'une expérimentation au Drc (les moyennes horaires du PAR sont données en $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). / Simulated and measured PAR values obtained for the different treatments of the DRC experiments (mean hourly PAR values are given in $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

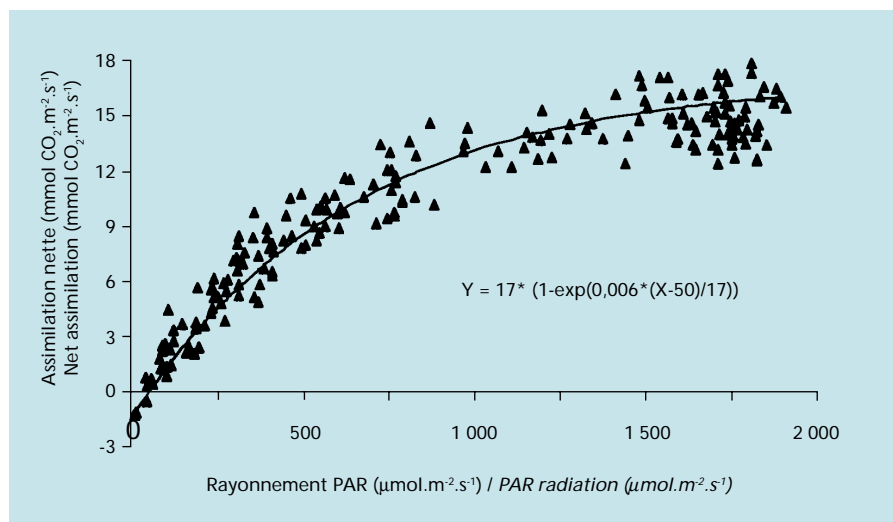


Figure 2. Evolution de la photosynthèse nette du cocotier NRV x GVT en fonction du rayonnement PAR. / Evolution of net photosynthesis in VRD x VTT coconut palms according to PAR.

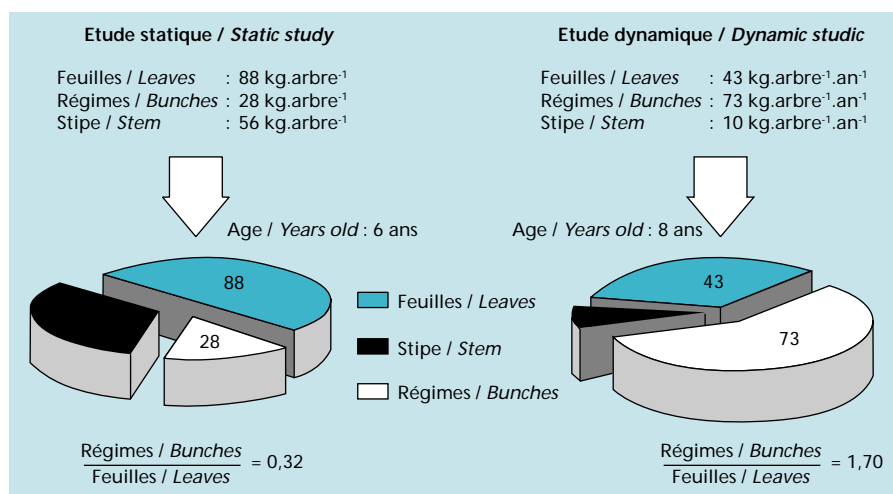


Figure 3. Observations des biomasses cocotier NRV x GVT. / Biomass studies for VRD x VTT coconut palm.

parties aériennes, alors que les régimes comptent pour plus de la moitié. En terme de fonctionnement de la plante, le principal puits est donc représenté par les régimes qui consomment, à eux seuls, près de 60 % des hydrates de carbone. Il est évident que ces proportions seront modifiées lorsque l'on tiendra compte du système racinaire (de sa dynamique de croissance et de renouvellement).

Nutrition minérale

L'observation des échanges gazeux foliaires confirme le rôle primordial de l'ion chlorure dans les mécanismes de tolérance à la sécheresse du cocotier (Braconnier, 1998). En sai-

son sèche, cet ion permet au cocotier de maintenir ses échanges gazeux foliaires à un niveau élevé et de mieux tolérer la contrainte hydrique. Les mesures réalisées en saison humide ne mettent pas en évidence un effet de la carence en chlorure sur la photosynthèse intrinsèque du cocotier. L'ion Cl semble donc intervenir essentiellement en saison sèche, et sur la régulation stomatique.

En Indonésie, grâce à des expérimentations de nutrition minérale (Bonneau et al., 1997), la production du cocotier peut être directement reliée aux apports d'engrais. Ce type de relation pourra, à terme, être intégré dans un module « nutrition minérale »

inclus dans un modèle global de fonctionnement du cocotier.

Etude du système racinaire

Les observations sont réalisées selon deux approches (Colas, 1997). La première est statique et consiste à étudier le système racinaire à un moment donné de la vie de l'arbre. La seconde est dynamique et s'appuie sur des observations directes de la croissance des racines, à différents âges, par l'intermédiaire de rhizotrons. L'exploitation des résultats de ces deux approches, et l'utilisation de l'outil de modélisation et de simulation développé par l'Amap, ont permis la réalisation de maquettes numériques tridimensionnelles du système racinaire du cocotier. Cette partie, couplée au modèle de simulation des organes aériens, peut générer des maquettes entières de cocotier (figure 4).

Cependant, les premières validations du modèle architectural du système racinaire montrent que le nombre de racines primaires émises en simulation est surestimé par rapport à la réalité. Ce modèle doit donc être amélioré pour obtenir une représentation fidèle de la réalité. En outre, des mesures de masses linéaires sont indispensables pour obtenir une estimation de la biomasse totale racinaire, paramètre encore inconnu pour le moment.

Modèle de fonctionnement du cocotier

Le modèle de base, servant de point de départ pour l'élaboration d'un modèle de fonctionnement du cocotier, est Simpalm décrit par Dufrêne (1989), sur palmier à huile. L'objectif est de l'adapter au cocotier, et d'y intégrer la dimension architecturale de la plante afin de développer un modèle physiologique.

Les résultats exposés précédemment (observations des échanges gazeux, études des biomasses, des forces de source et de puits...) permettent le paramétrage du modèle Simpalm pour le cocotier. Cependant, les premières simulations conduisent à un bilan carboné irréaliste : le résultat final est négatif. Il est donc indispensable de reconsidérer les termes du bilan. Si l'on connaît relativement bien l'entrée du modèle (la photosynthèse), les consommations, notamment les coûts de fabrication de matière sèche et les coûts respiratoires des différentes parties de la plante, restent encore mal appréciées. En outre, il est



Figure 4. Maquette tridimensionnelle du système aérien et du système racinaire d'un cocotier GVT âgé de 5 ans. / Three-dimensional mock-up of aerial parts and root system of a 5-year-old VTT.

indispensable d'approfondir nos connaissances du système racinaire, notamment sa biomasse et le coût de sa fabrication et de son entretien.

Ce premier modèle de fonctionnement du cocotier est donc très perfectible, mais il est raisonnable de penser que dans deux ans, une nouvelle version, beaucoup plus complète et réaliste sera disponible.

Etude des associations culturelles

Les associations culturelles avec le cocotier sont très variées, mais le nombre de celles prises en compte a volontairement été restreint. Une attention particulière est portée à l'association du cocotier au cacaoyer, ainsi qu'à celle avec le maïs.

Association du cacaoyer au cocotier

L'objectif était d'obtenir un modèle architectural complet (parties aériennes et racinaires) de chaque plante, ainsi qu'un premier modèle de fonctionnement.

Modélisation architecturale

La description dynamique de la structure aérienne du cacaoyer, et l'utilisation du modèle Amap, permettent de restituer des maquettes numériques tridimensionnelles de cacaoyer. La sensibilité des paramètres architecturaux aux variations du climat

radiatif, induite par la présence, ou non, d'une culture dominante, est étudiée (Mialet-Serra, 1998).

Le système racinaire du cacaoyer est étudié en même temps que celui du cocotier et, globalement, selon les mêmes techniques (observations statiques et dynamiques). Les travaux portent en premier lieu sur le cacaoyer en culture pure, puis sur son association au cocotier.

Ces travaux aboutissent à la réalisation de maquettes numériques tridimensionnelles du système racinaire. Associées aux simulations des parties aériennes, elles permettent de créer des cacaoyers virtuels entiers (Colas, 1997) (figure 5).

Comme dans le cas du cocotier en culture pure, la possibilité de simuler des scènes pourra permettre d'estimer les phénomènes de compétition entre cacaoyers (compétition spatiale des couronnes) pour des densités de plantation variables, d'effectuer des calculs numériques de transmission de la lumière, de prédire des rendements en fonction du dispositif de plantation choisi.

Au niveau racinaire, l'amélioration des connaissances, notamment de la biomasse totale, des zones et des cinétiques d'absorption, devrait permettre d'étudier les phénomènes de compétition racinaire entre les deux plantes.

Approfondissement des connaissances sur le fonctionnement du cacaoyer

- les échanges gazeux. La principale caractéristique des échanges gazeux foliaires du cacaoyer est leur faible intensité. Chez l'Amelonado, la photosynthèse nette maximale, la transpiration et la conductance stomatique sont, en moyenne, respectivement de $2,66 \pm 1,63 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $1,80 \pm 0,67 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ et $0,095 \pm 0,067 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Il est important de noter que ces valeurs sont, également, très hétérogènes ($\text{cv} = 61\%$ pour l'assimilation nette). Elles dépendent de l'emplacement du cacaoyer (arbre de bordure ou non), et de l'ensoleillement initial de la feuille (feuille d'ombre ou feuille de lumière) (Bastide, 1996).

L'intensité maximale de la photosynthèse est obtenue pour des rayonnements relativement faibles : dès $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, la photosynthèse a atteint son plateau de saturation. Le cacaoyer peut donc très bien s'accommoder de rayonnements lumineux faibles, et supporter l'association avec des plantes pérennes dominantes comme le cocotier. Le rayonnement ne paraît pas être le premier facteur limitant de sa production ;

- les biomasses. Une étude, réalisée sur des cacaoyers Amelonado âgés de 9 et 10 ans, montre que la variabilité entre individus est importante ($\text{cv} = 35\%$). Néanmoins, certaines caractéristiques se dégagent :

- la biomasse totale est de l'ordre de 35 kg, dont la répartition est reportée dans le tableau. Les branches représentent le tiers du total, les tiges et le tronc sont équivalents à 20 % chacun. Les parties pivot, racines et feuilles sont équivalentes à 10 % chacune ;
- des observations dynamiques laissent penser que la totalité de l'appareil foliaire est renouvelée au moins une fois par an. Il en résulte que la durée de vie d'une feuille est inférieure à une année. En outre, la production moyenne de fruits cumulée d'un cacaoyer de 10 ans est d'environ 20 kg de matière sèche, valeur comparable à la quantité de feuilles produites dans le même temps (proche de 25 kg) ;
- la masse surfacique des feuilles reste voisine de $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;

- la consommation en eau. L'étude est réalisée sur le site indonésien (Mouchet et Fortier, 1998). La consommation en eau est obtenue soit directement, par mesure du flux de sève au moyen de la technique des aiguilles de 8 (Granier, 1985), soit indirectement par des mesures de profils hydriques afin d'obtenir un bilan d'eau au niveau de la plantation.

Ces dernières sont obtenues avec une sonde captive (Troxler, modèle Sentry AP200). Il s'avère que cet équipement



Figure 5. Maquette numérique d'un cacaoyer âgé de 2 ans. / Numerical mock-up of a 2-year-old cocoa tree.

Répartition de la matière (kg ms / arbre) sèche chez des cacaoyers Amelonado âgés de 9-10 ans. / Dry matter distribution (kg ms / tree) in Amelonado cocoa trees aged 9-10 years.

Feuilles	Fruits	Tiges	Branches	Tronc	Pivot	Racines	Total
3,5 ± 1,2	0,4 ± 0,4	6,9 ± 4,1	11,0 ± 3,8	6,6 ± 2,5	3,6 ± 1,5	3,0 ± 1,1	35 ± 12,0
10 %	1 %	20 %	31 %	19 %	10 %	9 %	100

n'est pas adapté aux conditions de mesure, principalement du fait de la teneur en argile élevée des sols étudiés. Néanmoins, l'estimation des humidités via la tension de l'eau du sol est tentée. Le modèle Fao (Food and Agricultural Organization of the United Nations) est alors utilisé pour obtenir les valeurs des stocks hydriques.

D'après les valeurs, l'évapotranspiration (Etr) avoisine l'évapotranspiration potentielle (Etp) tant que la réserve en eau du sol est supérieure à 75 % de la réserve utile. En dessous de cette valeur, l'eau est extraite avec difficulté, entraînant la baisse du rapport Etr/Etp.

La méthode directe par mesure de flux de sève conduit à des consommations journalières en eau très faibles : de l'ordre de 10 l H₂O.j⁻¹. La cinétique journalière de flux présente un maximum à 10 h, puis diminue du fait de l'augmentation de la demande climatique. Le cacaoyer réduit donc fortement sa transpiration foliaire par la régulation stomatique ;

- le fonctionnement de la plante. Le fonctionnement du cacaoyer semble plus complexe que celui du cocotier, et de nombreux points restent à éclaircir. Des observations réalisées en culture pure, sous des ombrages artificiels, démontrent que le premier facteur limitant de la production du cacaoyer n'est pas le rayonnement. La relation entre la production et le rayonnement reçu par la plante n'est donc pas aussi simple que dans le cas du maïs par exemple (Braconnier, 1998). Il semble que la production soit davantage conditionnée par la mise en place et le fonctionnement des sites florifères, encore insuffisamment connus.

A ce stade des connaissances, élaborer un modèle préliminaire de fonctionnement du cacaoyer est impossible.

Etude de l'association

Les observations, effectuées en culture pure, permettent de créer des maquettes tridimensionnelles d'associations cocotier/cacaoyer.

Les utilisations de ces maquettes peuvent donc être multiples, et permettront de faire

l'économie de certaines expérimentations coûteuses (par exemple des essais de densité). Cet aspect est particulièrement important lorsqu'il s'agit de l'association cocotier/cacaoyer (figure 6), qui est la reconstitution d'une plantation associée cocotier/cacaoyer, suivant un dispositif classique.

Au niveau racinaire, les observations réalisées sur l'association cocotier/cacaoyer montrent qu'aucune modification majeure de l'architecture des systèmes racinaires n'est provoquée par leur interaction physique. Les deux systèmes cohabitent et aucun phénomène d'allélopathie n'est observé. Les vitesses de croissance des

racines des plants, en culture pure et en association, ne sont pas différentes.

La comparaison des consommations en eau du cacaoyer, en culture pure et en association, ne fait apparaître aucune différence significative : la valeur est de 10 l d'eau par jour et par cacaoyer.

Dans le cas du cocotier, la technique de mesure des flux de sève, mise au point sur des dicotylédones, semble prometteuse : on obtient, en effet, de bons résultats qualitatifs (Sterkers, 1996) mais il reste à étalonner la mesure pour pouvoir quantifier le phénomène.

Bien que nous soyons très avancés dans la modélisation architecturale de chaque plante, un modèle de fonctionnement global de l'agrosystème cocotier/cacaoyer n'est, pour le moment, pas envisageable. En effet, d'importantes connaissances restent encore à acquérir, non seulement au niveau du fonctionnement de chacune des deux plantes mais, également, au niveau de la compétition des systèmes racinaires.

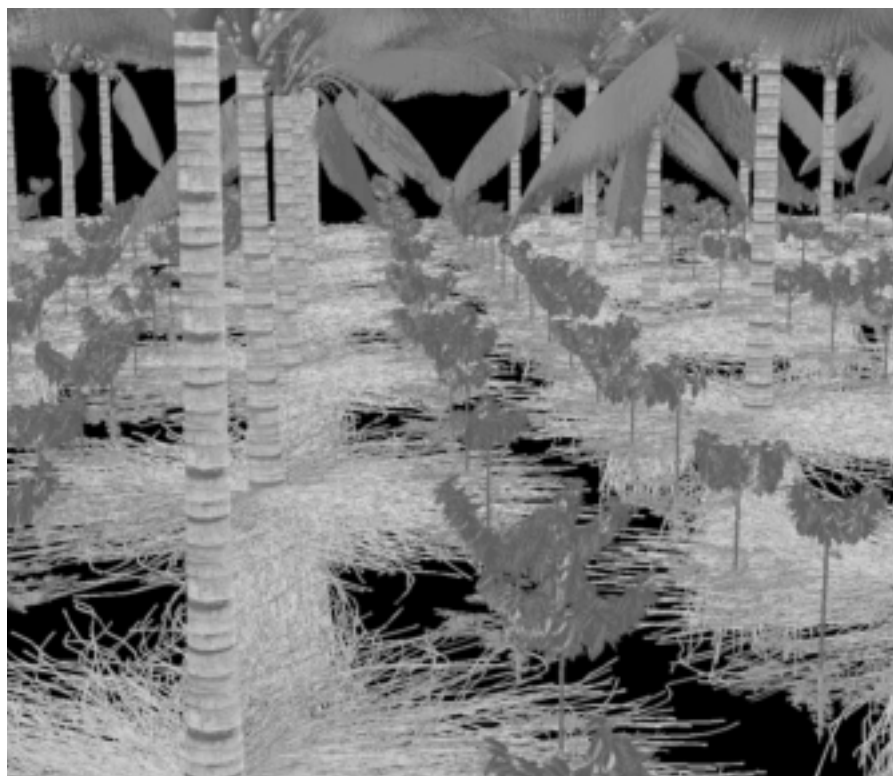


Figure 6. Reconstitution d'une plantation de cocotier associée au cacaoyer. Les cocotiers sont âgés de 5 ans et plantés en triangle équilatéral de 9 m. Les cacaoyers sont en double ligne : 2,5 m entre les lignes et 1,5 m sur la ligne. / Virtual plantation of coconut intercropped with cocoa (5-year-old coconut palms are planted in a 9-m triangular design. Cocoa trees are planted in a double row design, 2.5m between rows and 1.5m along the row).

Association du cocotier au maïs

Des expérimentations associant ces deux cultures ont été mises en place sur les trois sites : Philippines, Tanzanie et Vanuatu. Les résultats obtenus dans ces situations différentes sont comparables.

Une culture de maïs est conduite parallèlement sous ombrage artificiel et sous ombrage naturel de cocotier. Sous ombrage artificiel, pratiquement toutes les observations réalisées montrent que la croissance et le développement du maïs dépendent essentiellement du rayonnement reçu : plus le rayonnement solaire est intercepté, moins le maïs se développe et produit.

Dans ces conditions expérimentales, où le seul facteur limitant est le rayonnement PAR, une relation simple et linéaire entre production et PAR est obtenue.

L'application de cette relation à une association cocotier/maïs donne une production de maïs estimée, légèrement supérieure à celle récoltée. Ceci peut s'expliquer par la différence (en qualité et quantité), qui existe entre le rayonnement obtenu sous un filet d'ombrage et celui obtenu sous un couvert de cocotier, même si les taux moyens d'interception sont identiques. Une seconde explication provient des phénomènes de compétitions racinaires entre les deux cultures. Cette compétition, bien qu'existant réellement, n'a cependant pas pu être mise en évidence au Vanuatu car les conditions pédoclimatiques excellentes n'ont pas permis au phénomène de s'exprimer. En effet, la production de parcelles en association normale n'est pas significativement plus faible que celle du traitement « association + tranchée » censé diminuer, voire supprimer, toute compétition entre les deux cultures (figure 6).

L'expérience montre, en outre, que chez le maïs, la réponse de l'assimilation nette à l'éclairement PAR ne dépend pas du traitement lumineux reçu.

Association du cocotier à d'autres cultures

Aux Philippines, outre le maïs, le cocotier a été associé, au cours de plusieurs campagnes, au haricot-mungo et à la patate douce (Margate et Eroy, 1997). Ces essais ont permis de sélectionner les variétés les mieux adaptées à ces conditions de culture. Les relations entre la production et le rayonnement PAR reçu, ont été obtenues. Elles sont toujours relativement simples et positives : plus le rayonnement reçu par la plante est élevé, plus le développement et la production sont importants (figure 7).

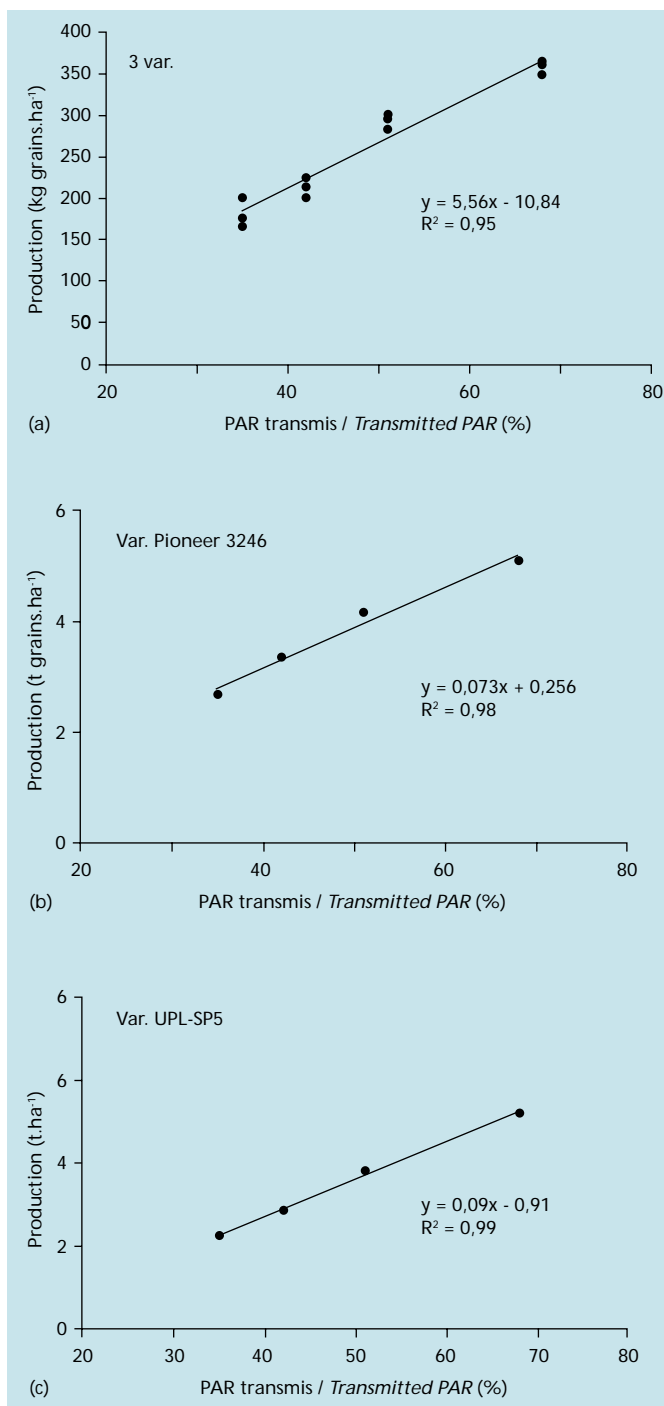


Figure 7. Relations entre PAR transmis et production moyenne de trois campagnes pour l'américain (a), le maïs (b) et la patate douce (c) (Philippines). Relationship between transmitted PAR and mean yield from 3 campaigns for mungbean (a), maize (b) and sweet potato (c) (Philippines).

Cependant, parmi les associations étudiées, seul le maïs représente une spéculation intéressante, du point de vue économique, associé au cocotier.

En Tanzanie, des travaux analogues portent sur l'association du cocotier au haricot dolique, au pois d'Angola, à la patate douce, au maïs et à l'ananas (Chipungahelo *et al.*, 1998). Là encore, on étudie simultanément des cultures sous ombrage naturel de coco-

tiers (comparaison de deux densités : 72 et 95 arbres.ha⁻¹) et des plantations sous ombrage artificiel. A l'exception de l'ananas, pour lequel la production est d'autant plus élevée que l'ombrage est important, et le pois d'Angola, dont la production est identique (8,2 t.ha⁻¹) quel que soit l'ombrage, les autres cultures se comportent de manière classique : plus l'ombrage est fort, plus les rendements sont faibles.

Cependant, lorsque l'on reporte les productions relevées en association sur la courbe obtenue sous ombrage artificiel, on constate que les différences entre les valeurs estimées et celles récoltées sont plus importantes qu'au Vanuatu et aux Philippines. Dans le cas de l'ananas, l'écart est de 11 % pour la densité de 72 cocotiers.ha⁻¹, et atteint 44 % pour la densité de 95 cocotiers.ha⁻¹. Ces différences s'expliquent, sans doute, par les phénomènes de compétition existant entre les deux cultures. En effet, les précipitations étant ici relativement faibles, la compétition pour l'eau y est plus intense. Il en résulte un effet dépressif sur la production de l'ananas, d'autant plus important que la densité des cocotiers est élevée.

Modèle économique

L'objectif était d'élaborer un modèle économique facilement utilisable par les services de recherche et d'extension, pour conseiller les planteurs sur la rentabilité des systèmes en association avec le cocotier. Le modèle présenté ici a été réalisé par le Natural Resources Institute, avec la collaboration du projet Beam (*Bio-Economic Agroforestry Modelling*), de l'université du Pays de Galles, à Bangor (Kleih, 1997).

Une étude bibliographique des systèmes de cultures en association a montré que, pour évaluer leurs paramètres économiques et financiers, deux techniques sont principalement utilisées : l'analyse des coûts et bénéfiques (Acb), ainsi que la programmation linéaire (ou non linéaire). La comparaison des deux approches montre que la première méthode, même si elle n'est pas la solution idéale, paraît la mieux adaptée pour répondre au problème posé par les systèmes de cultures en association avec le cocotier.

L'utilisation de la méthode Acb dans le modèle permet de comparer les coûts et bénéfices de l'association, à ceux de la culture pure, et d'estimer l'avantage d'associer le cocotier à une culture plutôt qu'à une autre.

Du fait de la complexité des exploitations incluant des systèmes de culture en association, le modèle ne prend en compte que la partie de l'exploitation qui est destinée à l'association à base de cocotiers. Il n'est pas spécifique à une région ou à un pays, mais est utilisable dans les différents pays présentant une écologie favorable à la culture du cocotier.

Il devait à l'origine couvrir une période de 60 ans, correspondant à la durée de vie d'une cocoteraie. Mais un tel modèle, réalisé sur

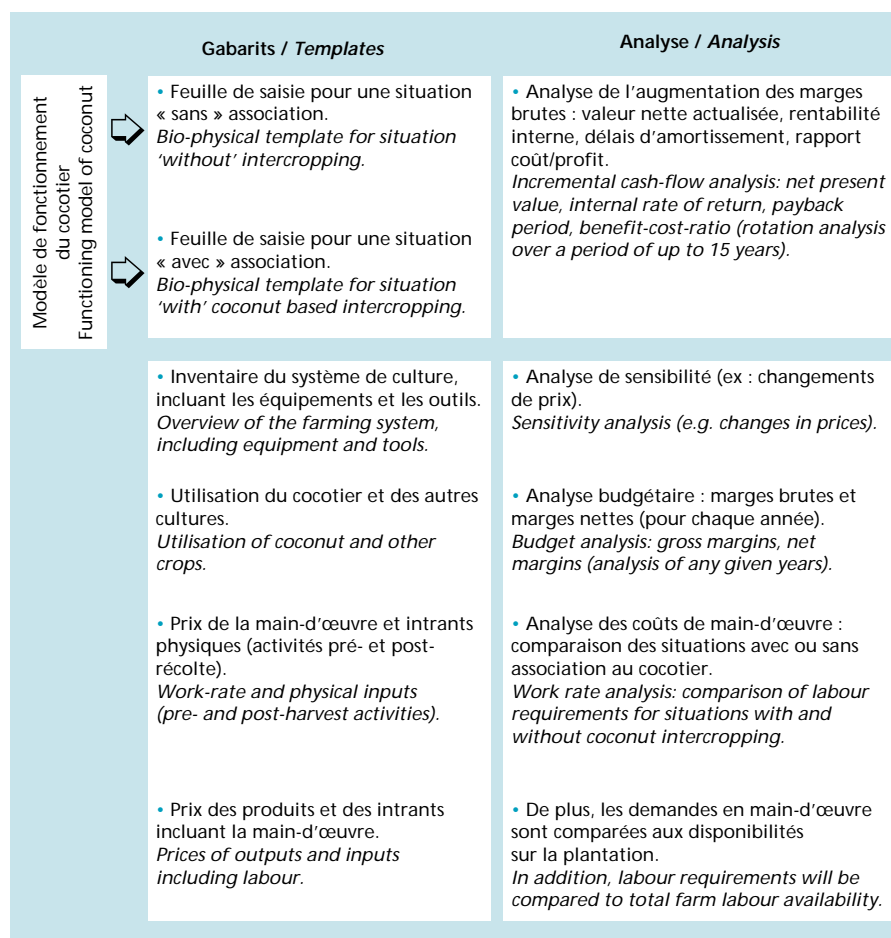


Figure 8. Représentation simplifiée du modèle économique. / Overview of the economic model.

tableur, représente alors des fichiers très gros, nécessitant un matériel informatique puissant, et pas toujours disponible dans les services d'extension de l'agriculture. Cela a conduit à diminuer la période à 15 ans.

Le nombre de cultures associées qui peuvent être prises en compte dans le modèle est de 2 cultures pérennes, 2 bi-annuelles et 5 annuelles. Ces cultures peuvent être simultanées et sur la même parcelle, ou décalées dans le temps et sur des parcelles différentes. L'ensemble des combinaisons est également envisagé. Pour alimenter le modèle, un certain nombre de paramètres doivent être collectés :

- l'exploitation : taille, surfaces de cultures associées, main-d'œuvre disponible sur place, crédits... ;
- l'utilisation du cocotier et des cultures intercalaires : produits et sous-produits obtenus par le planteur, noix fraîches, coprah, charbon de bois, bois... ;
- les prix des produits, des intrants et de la main-d'œuvre.

Ces données étant saisies, le modèle (figure 8), permet de calculer trois séries d'indicateurs économiques : valeur nette actualisée, rentabilité interne, rapport coût-avantage et délai d'amortissement ; marges brutes et nettes, besoins en main-d'œuvre.

Ces paramètres vont permettre d'aider à orienter le choix vers certaines associations culturales plutôt que d'autres. Le modèle a été diffusé aux partenaires tanzanien et philippin pour être validé. Il est accompagné d'un manuel d'explication, afin de faciliter son utilisation. En outre, il ne nécessite pas un matériel informatique très puissant, et l'on peut espérer qu'il pourra rapidement servir d'aide à la décision pour les services de vulgarisation agricole.

Conclusion

L'ensemble de ces travaux a permis d'approfondir nos connaissances concernant le cocotier, en culture pure et en association. Grâce à la modélisation de son architecture,

il est maintenant possible de créer des maquettes informatiques tridimensionnelles représentant des plantations.

L'application la plus directe de ces maquettes est leur utilisation pour simuler les transferts radiatifs à travers le couvert végétal d'une cocoteraie. Cet aspect est primordial lorsque le cocotier est associé à d'autres cultures qui sont généralement dominées par la palmarce. Dans ce cas, les phénomènes de compétitions pour la lumière sont d'une importance majeure. La possibilité de tester, par simulations informatiques, différents dispositifs et densités de plantation, différentes pratiques culturales (ex : élagage) et, surtout, de connaître l'incidence de ces facteurs sur la transmission de la lumière, permet de déterminer le dispositif le mieux adapté à la plante que l'on veut associer. Le gain de temps et d'argent est alors considérable puisque, par exemple, l'obtention des résultats d'un essai de densité sur cocotiers demande au minimum 15 ans.

Les études conduites sur les racines ont abouti à l'élaboration d'un modèle architectural chez le cocotier et le cacaoyer. La poursuite de ces travaux devrait déboucher

rapidement sur des estimations de biomasses et de surfaces absorbantes ; ce qui donnera la possibilité d'approcher les phénomènes de compétition pour l'eau et les éléments nutritifs. Ces simulations pourront être confrontées aux premiers résultats obtenus ici sur la consommation en eau du cacaoyer et du cocotier, en culture pure ou en association.

Le modèle de fonctionnement provenant du palmier à huile peut être adapté au cocotier, sous réserve d'effectuer quelques changements dans son paramétrage. Cependant, il est indispensable d'améliorer ce premier modèle en y intégrant l'architecture de la plante, et en tenant compte des relations entre les différents organes sources et puits.

L'étude du cas particulier de l'association cocotier/cacaoyer a conduit à la modélisation complète (aérienne et racinaire) de l'architecture des deux plantes et de leur association. Pour élaborer un modèle de fonctionnement de l'association, d'importants travaux restent à faire concernant, notamment, le fonctionnement du cacaoyer.

Pour les autres cultures associées au cocotier, il est assez aisé d'obtenir des courbes de

réponse de la production en fonction de la lumière, à condition que le rayonnement soit le premier facteur limitant. Ces relations peuvent facilement être intégrées dans un modèle global de fonctionnement de l'agrosystème à base de cocotier.

L'étude économique a conduit à l'élaboration d'un modèle d'analyse économique, simple et facilement utilisable. En tenant compte d'un certain nombre de paramètres économiques, il détermine, par une étude comparative, quels sont les avantages (en terme de rentabilité) de planter le cocotier en association par rapport à une plantation en culture pure. Cet outil constitue une aide efficace pour choisir d'associer, ou non, le cocotier à d'autres cultures, et déterminer la plus économiquement rentable.

Les modèles mentionnés précédemment, principalement celui du fonctionnement du cocotier avec ou sans culture associée, ne sont pas définitifs. Ils sont perfectibles, et ces améliorations seront apportées progressivement. ■

Bibliographie / References

- BASTIDE P., 1996. Cocoa tree functioning, yield elaboration in an intercropping system. *In* : Ec-Std3-Ts3-Ct92-0132, 3 rd technical report. Montpellier, France, Cirad-cp, 22 p. (document interne).
- BONNEAU X., BOUTIN D., BOURGOING R., SUGARIANTO J., 1997. Le chlorure de sodium, fertilisant idéal du cocotier en Indonésie. *Plant. Rech. Dév.* 4 (5) : 336-346.
- BRACONNIER S., 1996. Biomass study. *In* : Ec-Std3-Ts3-Ct92-0132, 3rd technical report. Montpellier, France, Cirad-cp, 5 p. (document interne).
- BRACONNIER S., 1998. Coconut-based farming systems. Operational and economic analysis models. Final report. Montpellier, France, Cirad-cp, 450 p. (document interne).
- BRACONNIER S., 1998. Maize-coconut intercropping: effect of shade and root competition on maize growth and yield». *Agronomie* (sous presse).
- BRACONNIER S., BONNEAU X., 1998. Effects of chlorine deficiency in the field on leaf gas exchanges in the PB-121 coconut hybrid. *Agronomie* (sous presse).
- CHIPUNGAHELO G.S., NGEREZA A.J., 1998. Sustainable coconut based farming systems. *In* : Ec-Std3-Ts3-Ct92-0123, final report. Montpellier, France, Cirad-cp, 54 p. (document interne).
- COLAS H., 1997. Association de cultures cocotier-cacaoyer. Modélisation de leur système racinaire. Etudes préliminaires sur l'interaction racinaire et la consommation en eau des deux plantes. Thèse de doctorat, université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, France, 260 p.
- DAUZAT J., EROY M.N., 1997. Simulating light regime and intercrop yields in coconut based farming systems. *Europ. J. Agron.* 7 : 63-74.
- DUFRENE E., 1989. Photosynthèse, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.). Thèse de doctorat, université Paris XI, Orsay, France, 169 p.
- GIRARD M.L., 1992. Climat radiatif sous cocoteraie et architecture des arbres. Rapport de Dea Ecologie générale et production végétales. Institut national agronomique et Paris XI, France, 28 p.
- GRANIER A., 1985. Une nouvelle technique pour la mesure du flux de la sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.* 49 : 17-24.
- HALLÉ F., OLDEMAN R.A.A., TOMLISON P.P., 1978. Tropical trees and forests. Berlin, Allemagne, Springer, 109 p.
- KLEIH U., 1997. Economic model of coconut based farming systems. A guide. Contract Std3-Ts3-Ct92-0132. Chatham, Royaume-Uni, Natural Resources Institute, 21 p.
- MARGATE R.Z., EROY M.N., 1997. Coconut-based farming systems: operational and economic analysis models. Contract Std3-Ct92-0132. Davao, Philippines, Philippine Coconut Authority, Davao Research Center, 90 p.
- MIALET-SERRA I., 1998. Etude préliminaire du développement aérien de *Theobroma cacao* L. en culture pure et associée au cocotier. *In* : Ec-Std3-Ts3-Cta2-0132, final report, vol. 2. Montpellier, France, Cirad-cp, p. 226-321 (document interne).
- MOUCHET S., FORTIER M., 1998. Etude des sols podzoliques du Lampung (Sud Sumatra, Indonésie) et modélisation du bilan hydrique des cultures de cocotier, cacaoyer et de l'association cocotier-cacaoyer. *In* : Ec-Std3-Ts3-Cta2-0132, final report, vol. 2. Montpellier, France, Cirad-cp, p. 322-427 (document interne).
- STERKERS H., 1996. Etude des relations sol/cocotier : approche expérimentale par flux de sève et humidimétrie. Diplôme d'agronomie approfondie, Ecole nationale supérieure agronomique, Rennes, France, 51 p.

Coconut-based farming systems

Operational and economic analysis models

Braconnier S.¹, Chipungahelo G.², Margate R.Z.³, Kleih U.⁴

¹ CIRAD-CP, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

² Mikocheni Agricultural Research Institute (formerly National Coconut Development Programme), POB 6226, Dar-es-Salaam, Tanzania

³ Philippine Coconut Authority, Davao Research Center, Bago, Oshiro, Davao City, Philippines

⁴ Natural Resources Institute, University of Greenwich, Chatham Maritime, Kent ME4 4TB, U.K.

The study set out to determine how to make optimum use of land planted with coconut by adding intercrops. Architectural models of coconut and cocoa were used to produce 3-D models simulating intercropping of the two plants. Maize and sweet potato were also studied.

An economic analysis calculated the advantages and disadvantages of each intercropping system.

Coconut cultivation currently occupies around 11.5 million hectares worldwide. Smallholdings (under 3-4 hectares) account for 96% of world copra production. On such smallholdings, coconut is virtually always intercropped with other crops. Indeed, farmers attempt to make maximum use of cultivated areas through intensification of the farming system, either because of old farming habits, or due to the pressure of decreasing land availability.

Motivations vary considerably: intercropping with coconut may be considered for weed control, restoring or improving soil fertility, producing firewood, feeding livestock, diversifying crops or increasing plantation profitability. However, while this practice is extremely widespread, the agricultural results available remain specific to trial sites. Their transposition is made difficult by the lack of precise observations on intercropping methods and inadequate knowledge of competition between the crops.

In coconut-based farming systems, coconut is usually the dominant plant, which is why the first stage of our study was to characterize this dominant storey, using numerous parameters, so as to develop an architectural model capable of calculating computer mock-ups representing coconut plantations.

A second part was devoted to enhancing knowledge of coconut palm functioning. Developing an operational model, however simplified, requires knowledge and estimation of the inputs (primarily photosynthesis) and outputs (all respiration, production and growth phenomena, etc.) of the system in question.

The third part particularly concerned intercrops under coconut. Particular attention

was paid to coconut/cocoa intercropping, for which architectural modelling of the aerial parts and root system, and water consumption by plants in a monoculture and in an intercropping situation, were studied in detail. In addition, a multi-site trial of coconut/maize intercropping was used to assess the constraints exerted by the different crops on each other. Other trials combining coconut and other intercrops (mungbean, cowpea, pigeon pea, pineapple, etc.) also provided interesting results concerning the yield functions of plants intercropped with coconut.

Lastly, a final part was devoted to developing an economic analysis model of coconut-based farming systems.

Coconut architecture modelling

The architecture model for the coconut palm is that developed by Corner (Hallé *et al.*, 1978); it is defined by the existence of a single leafed axis with lateral inflorescences. Describing the architecture of a tree therefore primarily entails the measurement and geometry of its constituent parts (Margate and Eroy, 1997; Dausat and Eroy, 1997). Certain preliminary measurements are used to determine architectural characteristics that are specific to the variety in question. These are mainly: the respective lengths of the petiole and rachis; frond curvature; position of leaflets on the rachis; variations in leaflet length depending on position; "vertical" and "horizontal" angles of leaflet insertion depending on position; leaflet shape depending on relative rank.

Such observations are relatively laborious, but in theory they do not need to be repeated at each new site. On the other hand, various other measurements are intended to characterize a given coconut planting and mainly involve: height, diameter and slope of the stem; number of fronds; length of their rachis; frond inclination

(measured from base of rachis); number of leaflets either side of the rachis; length of the largest leaflets either side of the rachis.

These measurements are rapid and do not raise any particular problems. All these observations were carried out on the following varieties:

- WAT x RLT, a hybrid between two Talls (West African Tall x Rennell Tall). The work was carried out in 1992 (Girard, 1992);
- three Vanuatu varieties: a Dwarf, VRD (Vanuatu Red Dwarf), a Tall, VTT (Vanuatu Tall), and a hybrid of the two, VRD x VTT. The work was carried out at Santo, in 1993-1994;
- the Laguna Tall, a local Philippine variety (Dausat and Eroy, 1997).

It proved possible to create "computer mock-ups" from the descriptions made of the stems, fronds and leaflets, for the WAT x RLT, VRD x VTT and Laguna Tall.

Simulations of three-dimensional models of coconut palms

Although the amap simulation software can be used to generate coconut palms with all the desired accuracy, it was decided to write a specific program for the following reasons:

- parameterization of the architectural data was specific to the coconut palm, hence simpler;
- the same program simultaneously generates detailed mock-ups of trees and simplified mock-ups;
- lastly, as the program was much smaller, it required less microcomputer memory.

All the architectural data were used to generate three-dimensional mock-ups of the coconut palm that took into account the natural variability of individuals. It was thus possible to generate the stochastic process of a coconut palm stand and to reconstitute a plantation.

The main advantage was that the planting design could be chosen and tested. For example,

The contents of this article are taken from a report entitled "Contract TS3*CT92-0132: Coconut-based farming systems. Operational and economic analysis models. Final report, CIRAD-CP, March 1998".

in the case of the Laguna Tall, we used computer simulation to study planting designs in 10, 9, 8.5 and 8 m squares, along with equilateral triangle designs at 11, 10, 9 and 8.5 m. Of course, it was possible to combine each of these designs with different degrees of pruning or felling, so as to recreate planting schemes that can be found in the field.

Characterization of the radiative climate under coconut

This study consisted in determining the quantity of PAR (Photosynthetically active radiation) transmitted through the palm storey. Direct measurement by PAR sensors was preferred to indirect measurement by hemispherical photography.

The study protocol involves a sensor installed above the plant cover, measuring incident PAR, and 32 sensors installed at ground level, under the plant cover, inside two adjacent elementary triangles (Girard, 1992). This very dense sampling arrangement was chosen for analysing the distribution of radiation transmitted throughout the day, the aim then being to compare those results with the computer simulations.

In effect, radiative transfers were simulated using the MIR and TRANSRAD specific radiative models developed by the CIRAD¹ modelling laboratory (Dauzat and Eroy, 1997).

Model validation and simulation tests

In addition to visual validation of the architectural model, it is essential to validate it in various other ways. The first simulations for the Laguna variety revealed that the optical properties of the leaves and soil have only a slight effect on radiation transmission and were used to calibrate the model as regards the angle formed by the two laminas of each of the leaflets. In fact the latter data item could not be measured in the field. After different tests, the angle was fixed at 35° for the Laguna Tall. The model then provided simulations that were very close to the measured values, irrespective of the age considered (figure 1).

Once a satisfactory architectural model for radiative transfer simulations has been obtained, a certain number of questions can be answered. Radiation transmission was studied in terms of the effect of:

- radiative conditions on radiation transmission. It was in fact useful to know what effect a very sunny day or a very cloudy day had on radiation transmission;

- latitude and the day of the year. These simulations could provide indications of seasonal effects and guide the choice of site for new plantings;
- coconut palm age and planting design (triangles or squares). These simulations showed that the transmission percentage is higher when planted in squares than when planted in triangles;
- planting direction (in the case of triangular planting). The study showed that it had a negligible effect on the percentage of PAR radiation transmitted;
- planting density and design. This did not have any marked effect on radiation transmission;
- frond pruning. By this technique, the percentage of light penetration could be increased from 25 to 40% if fronds of rank >18 were pruned. It was clear that pruning is a potential solution for reducing competition for light between coconut palms and intercrops, provided a check is made that this cropping practice does not have a long-term depressive effect on the coconut palms.

Conclusion

The architectural model of the coconut palm and radiative transfer simulations are very important tools. Indeed, with knowledge of the crops that are to be intercropped with coconut, and particularly their light requirements, it is possible to test different planting designs (triangles, squares, rows, etc.), densities and cropping practices (different degrees of felling or pruning), so as to determine the best coconut planting design for optimizing light capture by the crops. For the moment, these programs function on the Silicon Graphics station. There are plans eventually to develop a version for use on a personal computer, so that it can be accessed by more people.

Enhancing knowledge of coconut palm functioning

Development of the first coconut operational model required in-depth knowledge of the plant, hence a certain number of observations were carried out on leaf gas exchanges, biomass distribution and the root system.

Gas exchanges

The measurements were taken at the different sites using identical equipment: ADC LC4A type automatic CO₂ analyser. Before embarking on the different studies, a great deal of work was devoted to developing a methodology in order to standardize observations and obtain reliable values.

In Vanuatu (Braconnier, 1998), the net photosynthesis of the VRD x VTT coconut palm under non-limiting water supply conditions was found to have the following characteristics (figure 2):

- radiative conditions on radiation transmission. There is in fact a light compensation point at 50 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$;
- maximum intensity of around 17 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$,
- a saturation plateau reached for PAR values of over 1 100 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

With this type of apparatus, the curve for photosynthesis saturation by carbon dioxide was studied for CO₂ concentrations ranging from 180 to 1 500 ppm.

In addition, by using appropriate measuring chambers it was possible to evaluate the following parameters:

- leaflet respiration = - 0.64 $\mu\text{mol CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$;
- stem respiration = - 40 $\mu\text{g CH}_2\text{O.kg dm}^{-1}.\text{day}^{-1}$ (dm: dry matter).

It is clear that the values given above are considerably modified by any change in climatic conditions (VPD [vapour pressure deficit], radiation, temperature, etc.) or in the trophic factors of the palm (water supply, chloride nutrition, etc.). For example, in Tanzania, the mean photosynthesis value for the East African Tall did not exceed 10 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Chipungahelo and Ngereza, 1998).

Observations carried out on fronds of different ranks provided information on the variation in gas exchanges depending on the physiological age of the frond.

Leaf surface density measurements over several days in the year revealed that this parameter remained virtually unaltered during the day in coconut. There does not therefore seem to be any assimilate storage at the synthesis sites.

Study of coconut biomass

A static study was carried out first, to ascertain the dry weight of the different organs of a coconut palm, and their relative importance (Braconnier, 1996). The data were then used to determine the dynamics of dry matter distribution throughout the year. The root system was not taken into account in these different studies.

The fronds are major carbohydrate consumption sites up to rank 7, as are the bunches up to rank 20. Beyond that, assimilate consumption is mostly due to maintenance respiration.

In place, the crown of fronds accounts for half of the total biomass, and the bunches only 1/6 (figure 3). These ratios were considerably modified in dynamic observations. In fact, the biomass of leaves emitted during a year only accounted for 1/3 of the total biomass produced by the aerial parts, whilst bunches accounted for more than half. In terms of plant functioning, the main sink was therefore the bunches, which alone consumed almost 60% of the carbohydrates. It is clear that these proportions will be modified once the root system is taken into account (its growth and renewal dynamics).

¹ Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

Mineral nutrition

Observation of the leaf gas exchanges confirmed the main role of the chloride ion in the mechanisms coconut palm drought tolerance (Braconnier, 1998). In the dry season, that ion enables coconut palms to maintain leaf gas exchanges at a high level and more effectively tolerate water supply limitations. Measurements taken in the rainy season did not reveal any chloride deficiency effect on the intrinsic photosynthesis of coconut palms. The Cl⁻ ion therefore seemed to act primarily in the dry season, and on stomatal regulation.

In Indonesia, it was possible to link coconut yields directly to fertilizer applications through mineral nutrition trials (Bonneau *et al.*, 1997). This type of relation could eventually be integrated into a "mineral nutrition" module included in an overall coconut palm operational model.

Study of the root system

The observations were carried out in two ways (Colas, 1997). The first was static and consisted in studying the root system at a given moment in the life of a coconut palm. The second was dynamic and was based on direct observations of root growth at different ages, using rhizotrons. By exploiting the results obtained taking these two approaches and using the modelling and simulation tool developed by AMAP, it was possible to create three-dimensional digital mock-ups of the coconut root system. This part, combined with the model simulating aerial organs, can generate full mock-ups of coconut palms (figure 4).

However, the first validations of the root system architecture model showed that the number of primary roots emitted during simulation was overestimated compared to reality. The model will therefore have to be improved to obtain a reliable representation of the true situation. Moreover, linear mass measurements are essential for obtaining an estimation of total root biomass, a parameter that remains unknown for the time being.

Coconut operational model

The basic model, serving as a starting point for developing the coconut operational model, was that described by Dufrene for oil palm in 1989, called SIMPALM. The aim was to adapt it to coconut, by integrating the architectural dimension of the plant, so as to develop a physiological model.

The results previously described (observations of gas exchanges, biomass studies, source and sink strengths, etc.) served to parameterize the SIMPALM model for coconut. However, the first simulations came up with an unrealistic carbon balance: the final result was negative. It was

therefore essential to reconsider the terms of the balance. Whilst the input to the model (photosynthesis) is fairly well known, consumption, notably the costs of dry matter production and the respiratory costs of the different parts of the plant, still remain relatively unknown. Moreover, it is essential to enhance our knowledge of the root system, particularly its biomass and the cost of its production and maintenance. This first coconut operational model was therefore highly improvable, but it is reasonable to assume that a new, more complete and much more realistic version will be available within the next two years.

Study of intercropping systems

A great variety of plants are intercropped with coconut, but the number considered in this project was intentionally limited. Particular attention was paid to coconut intercropped with cocoa, and with maize.

Coconut-cocoa intercropping

The aim was to obtain a complete architectural model (aerial parts and root system) of each plant, along with an initial operational model.

Architecture modelling

The dynamic description of cocoa tree aerial architecture and the AMAP model enabled production of three-dimensional digital mock-ups of the cocoa tree. The sensitivity of the architectural parameters to variations in the radiative climate induced by the existence, or not, of a dominant crop was also studied (Mialet-Serra, 1998).

The cocoa tree root system was studied at the same time as that of the coconut palm, generally using the same techniques (static and dynamic observations). The work initially involved a cocoa monoculture, then cocoa intercropped with coconut.

The outcome of this work was three-dimensional mock-ups of the root system, which, combined with simulations of the aerial parts, made it possible to create entire virtual cocoa trees (Colas, 1997) (figure 5).

As with coconut in a monoculture, the possibility of simulating scenes meant that it was possible to estimate competition between cocoa trees (spatial competition between the canopies) for different planting densities, and make digital calculations of light transmission and forecast yields according to the planting design chosen.

At root system level, enhancing knowledge about total biomass, along with the absorption zones and kinetics, should enable a study to be made of root competition between the two plants.

Enhancing knowledge of cocoa tree functioning

- gas exchanges. The main characteristic of leaf gas exchanges in cocoa is their low intensity. In the Amelonado, maximum net photosynthesis, transpiration and stomatal conductance are $2.66 \pm 1.63 \mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, $1.80 \pm 0.67 \text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ and $0.095 \pm 0.067 \text{mol. m}^{-2}\text{s}^{-1}$ respectively, on average. It is important to note that these values are also highly heterogeneous ($cv = 61\%$ for net assimilation), and depend on the location of the tree (border tree or not) and on the initial lighting of the leaf (leaf in shade or in light) (Bastide, 1996).

The maximum photosynthesis intensity was obtained for relatively low radiation values: by $600 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, photosynthesis had reached its saturation plateau. Cocoa can therefore adapt perfectly well to low light radiation and withstand intercropping with dominant tree crops such as coconut. Radiation does not appear to be the main limiting factor for its production;

- biomasses. A study conducted on Amelonado cocoa trees aged 9 and 10 years showed that there was substantial variability between individuals ($cv = 35\%$). Nevertheless, certain characteristics stood out:

- total biomass was around 35 kg; its distribution is shown in the table. The branches accounted for 1/3 of the total, the stems and trunk were equivalent to 20% each. The tap root, roots and leaves accounted for 10% each,

- dynamic observations suggested that the total foliage was renewed at least once a year, meaning that the life span of a leaf is under a year. In addition, cumulated fruit production for a 10-year-old cocoa tree was around 20 kg of dry matter, a value similar to the quantity of leaves produced over the same time (around 25 kg),

- the surface density of the leaves remained around 150g.m^{-2} ;

- water consumption. This study was undertaken at the Indonesian site (Mouchet and Fortier, 1998). Water consumption was obtained either directly, by measuring sap flow using Granier needles (Granier, 1985), or indirectly by measuring water profiles to obtain the water balance in the planting.

The water profiles were obtained using a capacitive probe (Troxler, Sentry AP200 type). This equipment proved not to be suitable for the measuring conditions involved, mainly due to the high clay content of the soils studied. Nevertheless, estimation of moisture via the soil water tension was attempted. The FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) model was then used to obtain the water reserve values.

According to the values, true evapotranspiration (TET) was similar to potential evapotranspiration (PET) so long as the water reserve in the soil remained above 75% of the useful reserve. Below that value, water was extracted with difficulty, leading to a drop in the TET:PET ratio.

The direct method, by measuring sap flow, gave very low daily water consumption values: around 10 l H₂O.day⁻¹. Daily flow kinetics were maximum at 10:00 am, then decreased due to the increase in climatic demand, when the cocoa trees substantially reduced their leaf transpiration by stomatal regulation;

- plant functioning. The functioning of the cocoa tree seems to be more complex than that of the coconut palm, and numerous points still require clarification. Observations carried out in a monoculture, under artificial shade, revealed that the main factor limiting cocoa production was not radiation. The relation between production and the radiation received by the plant was therefore not as simple as in the case of maize, for example (Braconnier, 1998). In fact, it would seem that production is governed more by the formation and functioning of floral sites, about which knowledge is still insufficient.

As our knowledge stands at the moment, it is therefore impossible to develop a preliminary model of cocoa tree functioning.

Study of the intercropping system

Observations carried out in monocultures were used to create three-dimensional mock-ups of the coconut/cocoa intercropping system.

These mock-ups therefore have many uses and will enable savings to be made in certain expensive trials (e.g. density trials). This aspect is particularly important in the case of coconut-cocoa intercropping (figure 6), which shows the reconstitution of a coconut/cocoa intercropping system planted in a conventional design.

At root system level, the observations carried out on coconut/cocoa intercrops showed that their physical interaction did not cause any major change in the architecture of the root systems. The two systems cohabited and there was no allelopathy phenomenon. Moreover, there was no difference in the rate of root growth between the monocultures and the intercrops.

As regards water consumption, a comparative study did not reveal any significant difference between cocoa trees in a monoculture or intercropping system; it amounted to 10 l of water per day and per cocoa tree.

On coconut, the sap flow measuring technique developed on dicotyledons seems promising: good qualitative results are obtained (Sterkers, 1996), but measurement has to be standardized, so as to quantify the phenomenon.

Although we have made considerable headway in the architectural modelling of each plant, an overall model of coconut/cocoa farming system functioning is not feasible for the time being. In fact, a great deal of knowledge is yet to be acquired, not only with regard to the functioning of each of the two plants, but also concerning competition between the root systems.

Coconut/maize intercropping

Trials combining these two crops were set up at three sites: the Philippines, Tanzania and Vanuatu. The results obtained at those different locations were similar.

A maize crop was grown under artificial shade and under natural coconut at the same time. Under the artificial shade, virtually all the observations carried out showed that maize growth and development primarily depended on the radiation received: the more solar radiation was intercepted, the less the maize developed and yielded.

Under these experimental conditions, where the only limiting factor was PAR, a simple linear relation was obtained between yields and PAR.

Application of that relation to a coconut/maize intercropping system gave an estimated maize yield that was slightly higher than that actually harvested. This may be explained by the difference (in quality and quantity) between radiation interception by shade netting and that by a coconut cover, even though the mean interception percentages were identical. A second explanation is linked to root competition between the two crops. Although such competition actually exists, it could not be detected in Vanuatu due to the excellent soil and climatic conditions, which prevented the phenomenon from showing up. In fact, the yields from normal intercropped plots were not significantly lower than those from the "intercropping + trench" treatment, which is supposed to reduce or eliminate any competition between the two crops (figure 6).

Experience has shown that in maize, the response of net assimilation to PAR lighting does not depend on the light treatment received.

Coconut intercropped with other crops

In the Philippines, in addition to maize, coconut was intercropped over several seasons with mungbean and sweet potato (Margate and Eroy, 1997). In this way, it was possible to select the most appropriate varieties for the cropping conditions in question. The relations between production and received PAR were obtained. They were always relatively simple and positive: the higher the amount of radiation received by the plant, the greater the development and production (figure 7). However, out of the combinations studied, only maize was an economically worthwhile intercrop with coconut.

In Tanzania, similar work was undertaken on coconut with asparagus bean, pigeon pea, sweet potato, maize and pineapple (Chipungahelo *et al.*, 1997). Here again, the crops were studied simultaneously under natural shade provided by the coconut palms (comparison of two densities: 72 and 95 palms.ha⁻¹) and under artificial shade. Apart from pineapple, for which yields were higher the greater the amount of shade, and pigeon pea, whose yields were identical (8.2 t.ha⁻¹), irrespective of the type of shade, the other crops reacted normally: the greater the shade, the lower the yields.

However, when the yields obtained from the intercrops are traced on the graph obtained for artificial shade, it can be seen that the differences between the estimated values and the actual harvests were greater than in Vanuatu or the Philippines. In the case of pineapple, the difference was 11% for the density of 72 coconut palms.ha⁻¹ and reached 44% for a density of 95 coconut palms.ha⁻¹. These differences can doubtless be explained by competition between the two crops. In fact, as rainfall was relatively low here, competition for water was more intense. The result was a depressive effect on pineapple yields, which increased in line with coconut palm density.

Economic model

The aim was to develop an economic model that could easily be used by the research and extension services for advising growers on the profitability of coconut-based farming systems. The model described here was developed by the Natural Resources Institute, in collaboration with the BEAM (Bio-Economic Agroforestry Modelling) project at the University of Wales in Bangor (Kleih, 1997).

A bibliographical study of intercropping systems revealed that two main techniques are used for evaluating their economic and financial parameters: a cost-benefit analysis (CBA), and linear (or non-linear) programming. A comparison of the two approaches showed that the first method, whilst not an ideal solution, seemed to be the more appropriate for dealing with coconut-based farming systems.

By using the CBA method in the model, it was possible to compare the costs and benefits of the intercropping system with those of the monoculture, and estimate the benefit to be had from combining coconut with one crop rather than another.

Given the complexity of farms including intercropping systems, the model only took into account the part of the farm devoted to the coconut-based farming system. It was not specific to a region or a country and was usable in the different countries with an ecology propitious to coconut.

It was originally intended to cover a period of 60 years, corresponding to the life span of a coconut planting. However, such a model, developed on a spreadsheet, requires very large files and powerful computer hardware, which was not always available in the agricultural extension services. The period was therefore reduced to 15 years.

The number of intercrops that can be taken into account in the model is two perennial crops, two biennials and five annuals. These crops can be grown simultaneously and in the same plot, or staggered in time and in different plots. The whole set of combinations is also envisaged. A certain number of basic parameters have to be collected to supply the model:

- the farm (size, area covered by intercrops, locally available labour, credit, etc.);
- the use of coconut and intercrops (products and by-products obtained by the farmer: fresh nuts, copra, charcoal, timber, etc.);
- prices of products and inputs, including labour.

Once these data have been inputted, the model (figure 8) can be used to calculate 3 sets of economic indicators: nett present value, internal rate of return, cost-benefit ratio and payback period; gross and nett margins; labour requirements.

These parameters will be used to provide guidance in the choice of certain intercropping combinations rather than others. The model was sent out to the Tanzanian and Philippine partners for validation. It is supplied with an instruction manual to facilitate its use. Moreover, it does not require very powerful computer hardware and it

should rapidly become a decision-making tool for the agricultural extension services.

Conclusion

All this work therefore considerably enhanced our knowledge of the coconut palm, in either a monoculture or intercropping system. By modelling its architecture, it is now possible to create three-dimensional computer mock-ups representing plantations.

The most direct application for such mock-ups is using them to simulate radiative transfers through the foliage of a coconut planting. This aspect is paramount when coconut is intercropped with other crops that are generally dominated by the palm. In this case, competition for light is of major importance. The possibility of using computer simulations to test different planting designs and densities, different cropping practices (e.g. pruning) and particularly of knowing the impact of such factors on light transmission, means that the most appropriate planting design can be adopted to suit the desired intercrop. This generates considerable savings in time and money, since it takes at least 15 years to obtain results from a coconut planting density trial.

Root system studies led to the development of an architectural model for both the coconut palm and the cocoa tree. This work is continuing and should soon enable biomass and absorbent surface estimations, making it possible to study competition for water and nutrients. These simulations could then be compared to the first results obtained here on cocoa and coconut water consumption in a monoculture or an intercropping system. It was possible to adapt the

model designed for oil palm to coconut, provided a few parameterization changes were made. Nevertheless, it was essential to improve the first model by integrating the plant architecture, and taking into account relations between the different source and sink organs.

A study of coconut-cocoa intercropping resulted in complete modelling (aerial parts and root system) of both plants and their intercropping system. Much work remains to be done to develop an operational model of the intercropping system, particularly with regard to cocoa tree functioning.

For the other crops intercropped with coconut, it was fairly easy to obtain curves for yield response to light, provided radiation was the major limiting factor. These relations can easily be integrated into an overall model of coconut-based farming system functioning.

The outcome of the economic study was an economic analysis model that is simple and easy to use. By taking into account a certain number of economic parameters, this model performs comparative studies to determine the benefits to be had (in terms of profitability) from intercropping coconut compared to a monoculture. This tool provides effective assistance in choosing whether or not to intercrop coconut with other crops and in determining which intercrop is the most economically worthwhile.

The models mentioned above, primarily the coconut operational model with or without intercrops, are not definitive. There is room for improvement and improvements will be made gradually. ■

Résumé

Dans une association culturale avec le cocotier, ce dernier est généralement la plante dominante. L'obtention d'un modèle architectural des parties aériennes du cocotier a permis de créer des maquettes informatiques tridimensionnelles pouvant reconstituer une plantation. Ces maquettes ont ensuite servi à effectuer des simulations de transfert radiatif permettant de tester l'influence sur la transmission du PAR, de différents paramètres (âge des cocotiers, direction de la plantation, dispositif en carré ou en triangle...), ou encore certaines pratiques culturales (élagages ou abattages plus ou moins importants). La modélisation architecturale et les possibilités de simulations radiatives permettent de déterminer le meilleur dispositif de plantation afin d'optimiser la captation de la lumière par l'association culturale.

Nous avons également amélioré nos connaissances de la physiologie du cocotier, afin d'élaborer un premier modèle de fonctionnement. L'étude a porté surtout sur les échanges gazeux de la plante : étude des caractéristiques de la photosynthèse, de la respiration des feuilles et du stipe. Les résultats ont permis de paramétrer le modèle de fonctionnement que l'on veut adapter au cocotier. Les premières validations ont donné un bilan carboné négatif, qui implique de reconsidérer chaque terme du bilan et, en particulier, tous les coûts respiratoires.

Des mesures de biomasses ont montré que les puits de consommation des assimilats les plus importants étaient les régimes. Ils représentent à eux seuls 58 % de la biomasse des parties aériennes produites annuellement par un cocotier NRV x GVT âgé de 8 ans. Les feuilles, elles, ne comptent que pour 34 %.

L'association cocotier-cacaoyer a été étudiée de manière plus approfondie. La modélisation architecturale, tant des parties aériennes que des parties racinaires a été obtenue, et a permis de créer des maquettes numériques tridimensionnelles. Des mesures de consommation d'eau ont montré que le cacaoyer consommait environ 10 l d'eau par jour, en culture pure ou en association.

Des expérimentations, conduites sur d'autres associations (cocotier-mais, cocotier-patate douce...) ont permis de donner des fonctions de production des plantes associées, et d'apprécier les phénomènes de compétition racinaire.

L'examen des coûts et bénéfices a été utilisé pour élaborer un modèle d'analyse économique simple et facilement utilisable par des services de vulgarisation. Ce modèle détermine, par une étude comparative, quels sont les avantages (en terme de rentabilité économique) d'associer le cocotier, plutôt que de le planter en monoculture.

Abstract

In coconut-based farming systems, coconut is generally the dominant plant. By obtaining an architectural model of the aerial parts of the coconut palm, it was possible to create three-dimensional computer mock-ups that reconstitute a plantation. The mock-ups were then used to perform radiative transfer simulations and to test the effect on PAR transmission of different parameters (coconut palm age, planting direction, planting design — in squares or triangles — etc.) or certain cropping practices (varying degrees of pruning or felling). Architectural modelling and radiative simulations can be used to determine the best planting design so as to optimize light catchment by the intercropping system.

We also improved our knowledge of coconut palm physiology, with a view to developing an initial functioning model. Our work concentrated on gas exchanges within the plant: study of photosynthesis characteristics and leaf and stem respiration. The results were used to parameterize the functioning model we wanted to adapt to coconut. The first validation operations led to a negative carbon balance, which meant taking another look at the terms of the balance, especially respiratory costs.

Biomass measurements showed that the bunches are the most significant assimilate sinks. They alone account for 58% of the biomass produced annually in the aerial parts by an 8-year-old VRD x VTT coconut palm. The fronds only account for 34%.

The coconut/cocoa intercropping system was studied in greater detail. Architectural modelling of the aerial parts and the roots was carried out, to create three-dimensional digital mock-ups. Water consumption measurements revealed that cocoa consumes around 10 l of water per day in both monocultures and intercropping systems.

Trials of other combinations (coconut/maize, coconut/sweet potato, etc.) provided information on the production functions of the intercrops, and enabled an appreciation of root competition.

A cost-benefit analysis was used to develop a simple economic analysis model that would be easy for vulgarization services to use. By making comparisons, the model determines what advantages (in terms of economic profitability) are to be had from intercropping coconut rather than growing it in a monoculture.

Resumen

En una asociación de cultivos con el cocotero, este último es por lo general la planta dominante. La obtención de un modelo arquitectural de las partes aéreas del cocotero ha permitido crear maquetas informáticas tridimensionales pudiendo reconstituir una plantación. Estas maquetas sirvieron después para realizar simulaciones de transferencia radiativa que permiten someter a prueba la influencia sobre la transmisión del PAR, de distintos parámetros (edad de los cocoteros, dirección de plantación, dispositivo en cuadro o en triángulo...), o aún ciertas prácticas agrícolas (podas o tumbas más o menos importantes). La modelización arquitectural y las posibilidades de simulaciones radiativas permiten determinar el mejor dispositivo de plantación a fin de optimizar la captación de la luz mediante la asociación de cultivo.

También hemos mejorado nuestros conocimientos de la fisiología del cocotero, a fin de elaborar un primer modelo de funcionamiento. El estudio abarcó sobre todo a los intercambios gaseosos de la planta: estudio de las características de la fotosíntesis, de la respiración de las hojas y del estipe. Los resultados permitieron establecer parámetros del modelo de funcionamiento que se quiere adaptar al cocotero. Las primeras validaciones dieron un balance carbonado negativo, que implica que se vuelva a considerar cada término del balance, y especialmente todos los costos respiratorios.

Medidas de biomasa mostraron que los pozos de consumo de los asimilados más importantes eran los racimos. Representan ellos solos el 58 % de la biomasa de las partes aéreas producidas anualmente por un cocotero NRV x GVT con 8 años de edad. Las hojas sólo representan un 34 %.

La asociación cocotero-cacao fue estudiada más detenidamente. Se logró la modelización arquitectural, tanto de las partes aéreas como de las partes radicales, y permitió crear maquetas numéricas tridimensionales. Medidas de consumo de agua mostraron que el cacao consumía unos 10 l de agua por día, en cultivo puro o en asociación.

Experimentos, llevados a cabo en otras asociaciones (cocotero-maíz, cocotero-batata dulce...) permitieron dar funciones de producción de las plantas asociadas, y apreciar los fenómenos de competencia radicular.

El examen de los costes y provechos fue utilizado para elaborar un modelo de análisis económico sencillo y fácilmente utilisable por los servicios de vulgarización. Este modelo determina, mediante un estudio comparativo, cuales son las ventajas (en término de rentabilidad económica), en asociar el cocotero, en lugar de sembrarlo en monocultivo.