



UNIVERSITÉ MONTPELLIER 2
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC
Place Eugène Bataillon, 34 095 Montpellier Cedex 5



Rapport de stage de Master 2 recherche Sciences pour l'Environnement

Mention : Biologie Géosciences Agroressources Environnement

Spécialité : Ecologie Fonctionnelle et Développement Durable

Parcours ÉcoSystèmeS : Fonctionnement des écosystèmes aquatiques et terrestres, naturels et anthropisés

Étude du lien entre l'indice d'attaque d'un bioagresseur et la structure spatiale d'un système agroforestier tropical.

Cas des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (*Theobroma cacao*) de la région de Talamanca et de la moniliose (*Moniliophthora roreri*), Costa Rica.

Présenté et soutenu par

Cynthia GIDOIN

le 15 et 16 juin 2010, Université de Montpellier II

Travail réalisé à l'Unité Mixte de Recherche SYSTEM : Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens



et encadré par

Marie-Ange Ngo Bieng
Chercheur CIRAD à l'UMR SYSTEM

Christian CILAS
Directeur de recherche à l'Unité de Recherche CIRAD : Maîtrise des bioagresseurs des cultures pérennes

Devant le Jury :

Delphine BONNET, Maître de conférence, Université de Montpellier II
Mireille CHARMANTIER-DAURES, Maître de conférence, Université de Montpellier II
Benoît JAILLARD, Directeur de Recherche à l'INRA
Claude PLASSARD, Chargée de recherche à l'INRA

CIRAD



0000105066

CIRAD-DIST
Unité bibliothèque
Lavalette

Rapport de stage de Master 2 recherche Sciences pour l'Environnement

Mention : Biologie Géosciences Agroressources Environnement

Spécialité : Ecologie Fonctionnelle et Développement Durable

Parcours ÉcoSystèmeS : Fonctionnement des écosystèmes aquatiques et terrestres, naturels et anthropisés

Étude du lien entre l'indice d'attaque d'un bioagresseur et la structure spatiale d'un système agroforestier tropical.

Cas des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (*Theobroma cacao*) de la région de Talamanca et de la moniliose (*Moniliophthora roreri*), Costa Rica.

Présenté et soutenu par

Cynthia GIDOIN

le 15 et 16 juin 2010, Université de Montpellier II

Travail réalisé à l'Unité Mixte de Recherche SYSTEM : Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens



et encadré par

Marie-Ange Ngo Bieng
Chercheur CIRAD à l'UMR SYSTEM

Christian CILAS
Directeur de recherche à l'Unité de Recherche CIRAD : Maîtrise des bioagresseurs des cultures pérennes

Devant le Jury :

Delphine BONNET, Maître de conférence, Université de Montpellier II
Mireille CHARMANTIER-DAURES, Maître de conférence, Université de Montpellier II
Benoît JAILLARD, Directeur de Recherche à l'INRA
Claude PLASSARD, Chargée de recherche à l'INRA

Introduction

Les enjeux de l'agriculture

Le défi majeur de l'agronomie actuelle, du fait de l'augmentation de la population humaine et des conséquences négatives des systèmes intensifs, est d'accroître la production dans des systèmes de culture respectueux de l'environnement. L'agriculture dite conventionnelle s'est développée afin de répondre à un objectif productiviste. Cette intensification s'est traduite par l'utilisation croissante d'intrants (engrais et produits phytosanitaires) et une spécialisation et homogénéisation des systèmes (Tilman *et al.*, 2002). Dans la lutte contre les bioagresseurs, l'utilisation intensive des produits phytosanitaires est un facteur de pollution de l'environnement et un risque pour la santé humaine (Eddleston *et al.*, 2002). De plus, des processus de résistance des bioagresseurs sont apparus rendant la lutte chimique moins efficace (Leibee and Capinera, 1995). La pratique prolongée de ce modèle d'agriculture a mis en évidence ses limites en terme de durabilité. La dégradation des ressources naturelles (sols, eau, etc.) et de l'environnement en général, qui en découle, pose aujourd'hui un défi majeur : la création d'un mode d'agriculture productif et durable ce qui signifie, entre autres, la création de nouveaux systèmes de lutte contre les bioagresseurs moins consommateurs de pesticides.

Le rapprochement entre écologie et agronomie

Dans ce contexte, l'une des pistes envisagées est de stimuler les processus écologiques naturels d'intérêt dans les agro-systèmes. Le rapprochement entre l'écologie et la recherche en agronomie se fonde sur le paradigme selon lequel les écosystèmes naturels sont durables et adaptés aux contraintes locales (Dawson and Fry, 1998). En incorporant dans les agrosystèmes cultivés certaines caractéristiques des écosystèmes naturels, on peut espérer leur conférer des propriétés intéressantes telles que la productivité (Fukai and Trenbath, 1993), la stabilité (Aerts, 1999), et la résilience, voire la résistance vis à vis des attaques de bioagresseurs (Trenbath, 1993).

L'une des voies de «naturalisation» des systèmes cultivés est l'agroforesterie. Celle-ci se définit comme la mise en valeur du sol avec une association (simultanée ou séquentielle) de ligneux et de cultures ou d'animaux afin d'obtenir des produits ou des services utiles à l'Homme (Torquebiau, 2007). Les systèmes agroforestiers (SAF) englobent un grand nombre de systèmes de culture plus ou moins complexes. Le plus complexe d'entre eux est l'agroforêt. En effet, on parle d'agroforêt lorsque la composante arborée d'une association agroforestière est multi-étagée, dense, diversifiée, et que la parcelle prend une physionomie typiquement forestière (Torquebiau, 2007). En ce sens, l'agroforêt est certainement le système à visée agricole le plus proche d'un écosystème naturel (Wiersum, 2004). Les écosystèmes naturels, et dans une moindre mesure les agroforêts, sont caractérisés par une forte biodiversité, en particulier végétale, à structure spatiale (verticale et horizontale) hétérogène (Barot, 2004; Babin *et al.*, ; Babin *et al.*, 2010).

Le rôle de la biodiversité végétale dans le fonctionnement des agrosystèmes a largement été étudié (Malezieux *et al.*, 2009; Altieri, 1999; Isbell *et al.*, 2009). Par contre, le lien entre la structure spatiale des agrosystèmes à forte biodiversité végétale et la productivité de ces systèmes a été beaucoup moins étudié (Meloni, 1998). La structure spatiale d'un peuplement est définie comme l'organisation des individus dans l'espace. Elle décrit donc en particulier l'environnement biotique local, autour de

Liste des abréviations

SAF	Système Agroforestier
L(r)ca	Valeur de L(r) calculé sur la catégorie cacaoyers
L(r)fo	Valeur de L(r) calculé sur la catégorie arbres forestiers
$L_{12}(r)cafo$	Valeur de $L_{12}(r)$ calculé à partir des catégories (1) arbres forestiers et (2) cacaoyers.
Dca	Variable de densité en cacaoyers (nombre de cacaoyer/dispositif)
Dfo	Variable de densité en arbres forestiers (nombre d'arbres forestiers/dispositif)
Ig	Variable indice d'attaque calculée sur les cabosses
Loglg	Variable Indice d'attaque transformée par la fonction logarithmique de base 10
ACP	Analyse en composante principale
CA1	Variable des coordonnées des dispositifs sur l'axe 1 de l'ACP réalisée sur les variables L(1à10)ca
CA2	Variable des coordonnées des dispositifs sur l'axe 2 de l'ACP réalisée sur les variables L(1à10)ca
FO	Variable des coordonnées des dispositifs sur l'axe 1 de l'ACP réalisée sur les variables L(1à10)ca
CAFO1	Variable des coordonnées des dispositifs sur l'axe 1 de l'ACP réalisée sur les variables $L_{12}(1à10)cafo$
CAFO2	Variable des coordonnées des dispositifs sur l'axe 2 de l'ACP réalisée sur les variables $L_{12}(1à10)cafo$

chaque individu, en interaction avec l'environnement abiotique (Goreaud, 2000). La structure spatiale de la biodiversité végétale est susceptible de modifier des facteurs influençant la productivité comme la compétition entre les espèces végétales, la distribution des ressources et, en particulier, la dispersion des bioagresseurs (Martens *et al.*, 2000; Schroth *et al.*, 2000). Les liens entre la structure spatiale des agrosystèmes et le développement des bioagresseurs ont pourtant fait l'objet de très peu d'études.

Dans le cadre de ce travail de master 2, nous nous sommes intéressés à la caractérisation des structures spatiales des végétaux présents dans des agroforêts à base de cacaoyers (*Theobroma cacao*) du Costa Rica et au lien entre ces structures spatiales et l'incidence d'un bioagresseur, la moniliose du cacaoyer, *Moniliophthora roreri*.

La structure spatiale et le bioagresseur

En phytopathologie, il est couramment admis que la transmission d'un pathogène décroît lorsque la distance entre les individus hôtes augmente (Aylor, 1990; Ostfeld *et al.*, 2005). C'est pourquoi les distances de plantation et la structure spatiale des populations hôtes à l'échelle du paysage et de la parcelle sont des facteurs qui affectent la dispersion des bioagresseurs (Brown and Bolker, 2004; Watve and Jog, 1997). L'agrégation des populations hôtes est réputée favoriser la dispersion des bioagresseurs, alors qu'au contraire la régularité la diminuerait. Ces effets sont à modérer en fonction des distances de plantations, de la capacité de dispersion du bioagresseur et de l'échelle considérée. En général, on manque encore d'informations sur le contrôle des épidémies de plantes cultivées par la manipulation de la structure spatiale de la plante hôte (Brown and Bolker, 2004).

Dans le cas d'une agroforêt, la structure spatiale des arbres d'ombrage est également susceptible d'influencer la présence et/ou la dispersion d'un bioagresseur (Schroth *et al.*, 2000). En effet, les arbres d'ombrage créent un microclimat qui influence le développement de la plante hôte et celui de ses bioagresseurs. Ils tamponnent les températures et augmentent l'humidité dans la plantation (Beer *et al.*, 1997). Leur structure spatiale influence la distribution de la lumière sous canopée (Martens *et al.*, 2000; Meloni, 1998). Les arbres d'ombrage peuvent également influencer la dissémination des bioagresseurs par la création d'effet-barrière (Schroth *et al.*, 2000). En effet, les arbres freinent le vent et peuvent affecter la dispersion aérienne des pathogènes. La dissémination par la pluie peut également être influencée du fait de l'interception des précipitations par la canopée.

Les cultures pérennes tropicales, comme le cacaoyer ou le caféier, présentent des structures de plantation très variées, de la monoculture en plein soleil jusqu'aux agroforêts. Le gradient de complexité de structure de ces systèmes a souvent été décrit par la densité des différentes espèces présentes (Mendez *et al.*, 2009). Très peu d'études se sont intéressées à décrire l'hétérogénéité de structure qu'il est possible d'observer à densité égale. Pourtant, des outils mathématiques existent pour décrire les structures de populations végétales (Perry *et al.*, 2006). Ces outils ont largement été utilisés pour décrire les structures des écosystèmes forestiers. Leur utilisation dans la description des systèmes agroforestiers reste très rare (Brophy and Mundt, 1991).

Les agroforêts à cacaoyers de Talamanca et la moniliose

Dans cette étude, nous nous intéressons aux agroforêts à base de cacaoyers de la

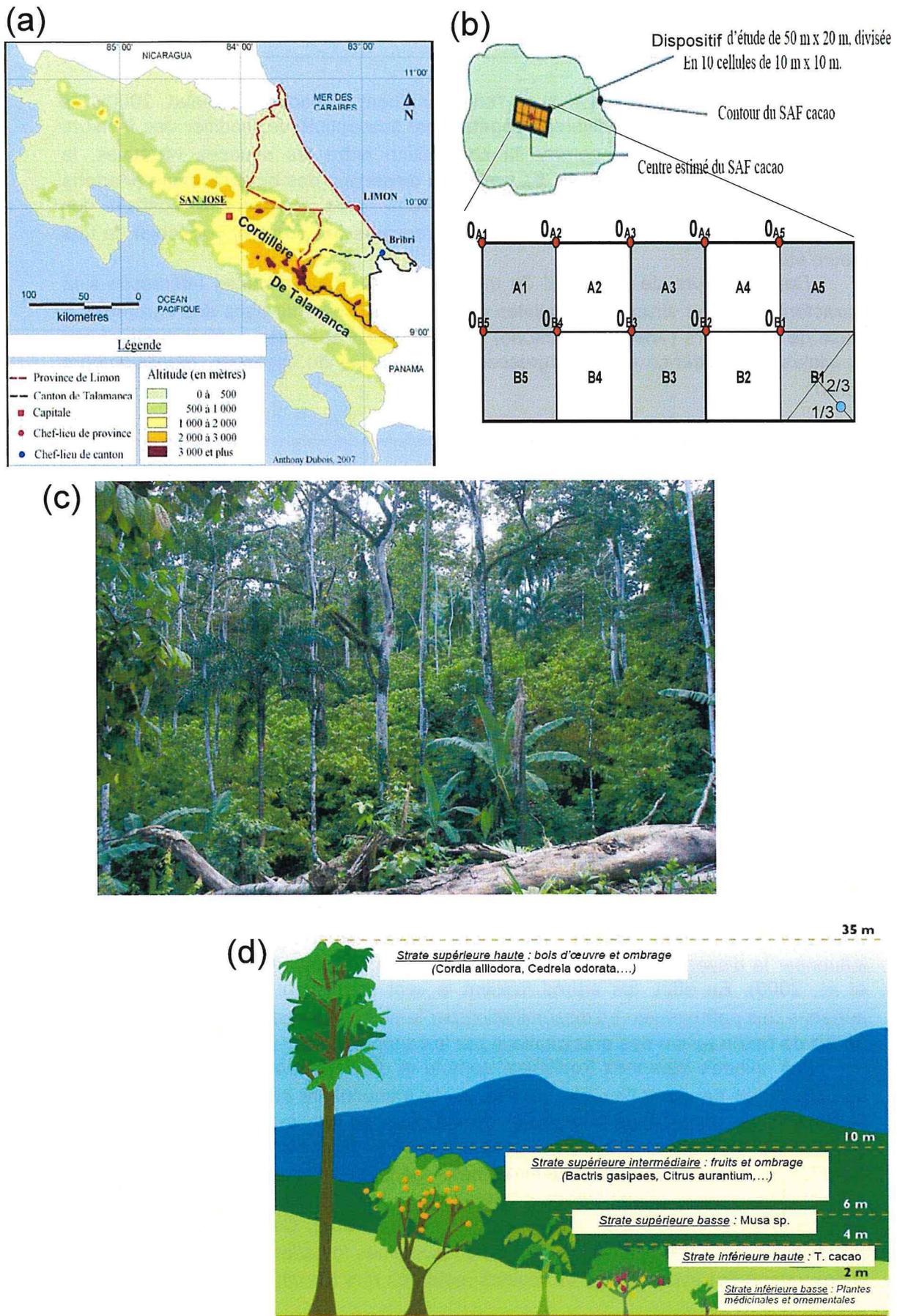


Figure 1 : Les agroforêts à base de cacaoyers de la région de Talamanca au Costa Rica

(a) Cartographie du Costa Rica avec localisation du canton de Talamanca ; (b) Localisation du dispositif dans les SAF à base de cacaoyers et schématisation d'un dispositif; (c) photographie d'un SAF à base de cacaoyers de Talamanca (cliché : O Deuheuvels, 2007) et (d) représentation des SAF à base de cacaoyers de Talamanca par la principale association de producteurs (Asociación de Pequeños Productores de Talamanca, APPTA, 2007)

région de Talamanca, au Costa Rica (Figure 1a,c et d). La culture du cacao est la principale source de revenus de 5 à 6 millions de petits producteurs à travers le monde et fait l'objet d'une demande internationale croissante (Franzen and Mulder, 2007). Au Costa Rica, les systèmes agroforestiers (SAF) à base de cacaoyers de la région de Talamanca produisent environ 50% du cacao national. Elle comprend les territoires indigènes Bribri et Cabécar. Les SAF à base de cacaoyers sont aussi une source d'aliments de base comme la banane plantain (*Musa paradisiaca*) et le palmier pêche (*Bactris gasipaes*).

L'un des principaux freins à la production de cacao en Amérique latine est la moniliose du cacaoyer causée par *Moniliophthora roreri* (Evans, 1998; Fowler *et al.*, 1956). C'est un champignon qui se développe au niveau du fruit du cacaoyer sans infecter les autres parties de l'arbre (Figure 2) et qui est susceptible d'engendrer des pertes allant jusqu'à 90% de la récolte de cacao à l'échelle de l'exploitation (Thévenin and Trocmé, 1996). Il peut attaquer les fruits du cacaoyer de leur plus jeune stade (chérelle, fruit en croissance) à leur stade adulte (cabosse, fruit ayant atteint sa taille finale) (Mossu, 1990). Par contre, on estime que sa sporulation a lieu principalement sur les cabosses (Avelino, communication personnelle).

Moniliophthora roreri se dissémine principalement par le vent (Thévenin and Trocmé, 1996). Lorsque la cabosse se revêt d'un manteau sporifère blanc, qui a valu à la maladie le nom de «frosty pod rot», le risque de contagion est très fort puisque la moindre perturbation (en particulier le vent) pendant les heures de la journée où l'humidité relative est faible peut libérer des nuages de spores infectieuses (Evans, 1981). La lutte contre cette maladie est difficile. Elle est basée sur une récolte hebdomadaire des cabosses malades avant sporulation, ce qui est très contraignant. Les luttés chimiques et biologiques sont assez peu efficaces. Les traitements chimiques ont rapidement montré leurs limites d'utilisation dans le cas de la moniliose du cacaoyer (Thévenin and Trocmé, 1996). Les cabosses sont en effet produites de façon continue dans l'année et il faudrait, pour assurer une bonne protection, pulvériser des fongicides très fréquemment. Par ailleurs, les traitements chimiques doivent être accompagnés de pratiques de taille, peu appréciées par les producteurs, qui permettent de concentrer la production sur des hauteurs accessibles aux pulvérisations. La lutte génétique n'en est qu'à ses débuts. Il n'y a pas de résistance complète identifiée et les sources de résistance incomplète sont peu fréquentes.

Encore confinée à l'Amérique Latine (seuls le Brésil et la Bolivie sont épargnés), le risque que la maladie atteigne d'autres continents est élevé. Les conséquences d'une expansion de la maladie au Brésil, producteur majeur d'Amérique latine, ou à d'autres continents, notamment en Afrique, et en particulier en Côte d'Ivoire, premier producteur mondial, seraient désastreuses (Ploetz, 2007).

Objectifs

L'objectif de ce stage de recherche est d'étudier le lien entre structure spatiale (i) d'une population hôte, le cacaoyer, (ii) d'une population d'arbres d'ombrage, (iii) de l'interaction spatiale entre ces deux populations, et l'incidence de la moniliose à l'échelle du dispositif. Pour l'étude des structures spatiale et des interactions spatiales nous avons utilisé respectivement la fonctions $L(r)$ de Besag et la fonction $L_{12}(r)$ intertype, qui utilisent le formalisme des processus ponctuels (Illian *et al.*, 2008). L'étude du lien entre structure spatiale, interaction spatiale et l'intensité de l'attaque du bioagresseur à été réalisée par la construction d'un modèle explicatif de l'indice d'attaque.

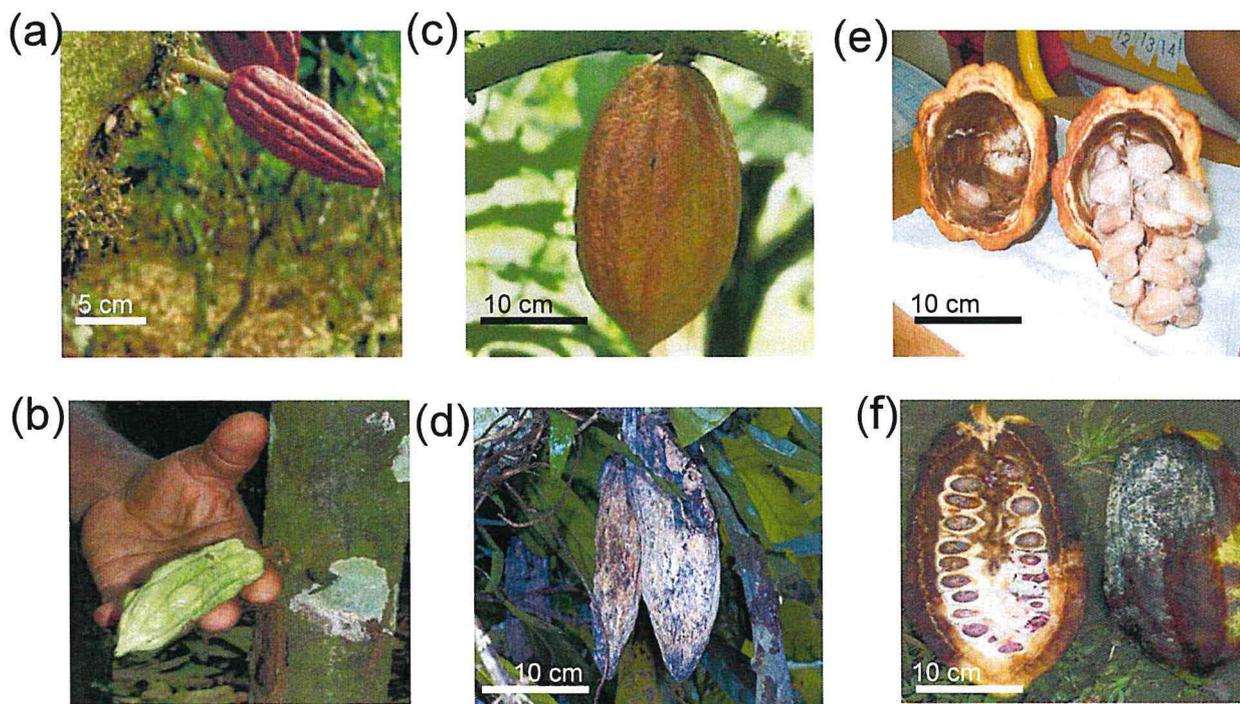


Figure 2 : Photographies des fruits sains et atteints de moniliose du cacaoiers

(a) Photographies de chérelle saine et (b) atteinte de la moniliose ; (c) photographies d'une cabosse saine et (d) de cabosses atteintes de moniliose ; (e) photographies de l'intérieur d'une cabosse saine et (f) atteinte de moniliose.

Afin de répondre à cet objectif, un travail préliminaire de caractérisation des structures spatiales a été réalisé. La typologie des structures spatiales à l'échelle du dispositif, est présentée en annexe (Annexe 1).

Matériel et Méthodes

Le site d'étude et les données

La zone d'étude est la région de Talamanca située au Sud-Est du Costa Rica (Figure 1 a). Un réseau de 36 cacaoyères a été constitué afin d'étudier la diversité de structure et de composition des SAF à base de cacaoyers de cette région (Deheuvels *et al.*). Le contour de chaque cacaoyère est tracé au GPS (Figure 1b). Le tracé permet de localiser visuellement un point central géoréférencé. A partir de ce point, est matérialisé un dispositif d'étude de 50 m x 20 m. Dans la mesure du possible (en fonction de la taille et de la forme du SAF à base de cacaoyers), l'axe principal du dispositif est orienté Nord-Sud. Ce dispositif, portion d'un système aux dimensions plus vastes, est considéré et étudié ici comme un SAF à base de cacaoyers à part entière.

Dans chaque dispositif, les coordonnées des végétaux hauts de plus de 2,5 m ont été relevées, ainsi que leurs noms vernaculaires en Espagnol et/ou Bribri. Pour ceci, chaque dispositif est subdivisé en 10 cellules carrées de 10m de côté notées de A1 à A5, et de B1 à B5 (Figure 1b). Le dispositif est considéré comme un repère orthonormé dont l'origine (0,0) est le point O_{A1} . Pour rendre pratique la prise de données sur le terrain, les coordonnées sont notées par cellule. Les points d'angle en rouge sur la figure constituent ainsi les origines pour chacune des cellules. Dans chaque cellule un mètre-ruban est placé le long de la diagonale puis est déroulé autour de la cellule. L'observateur marche le long de la diagonale avec un papier millimétré où est représentées la cellule et sa diagonale (échelle 1/100) et sur laquelle il reporte la position des individus. La distance sur la diagonale est parfaitement repérée ; la position de l'individu dans le triangle formé par la diagonale et les deux côtés de la cellule est estimée, selon une échelle visuelle, par rapport à son éloignement des limites matérialisées de la cellule et de sa diagonale (comme représenté sur la cellule B1 de la figure 1b). Les coordonnées finales des individus, par rapport à l'origine O_{A1} sont ensuite obtenues par translation suivant la position de la cellule.

Des comptages du nombre de fruits, chérelles et cabosses, malades à cause de la moniliose et saines ont été effectués à quatre périodes différentes de l'année : (i) du 15/04 au 21/05/2008 (ii) du 06/07 au 18/07/2008 (iii) du 27/08 au 01/10/2008 et (iv) du 12/01 au 01/02/2009.

Formation des catégories végétales étudiées

Pour le calcul des variables de structures spatiales, la formation des catégories de végétaux suit deux objectifs : la description de la structure verticale, via l'hypothèse de l'appartenance des végétaux des catégories à des strates différentes de hauteur (Figure 1d), et la contrainte de former un groupe homogène, condition indispensable à l'analyse de structures spatiales horizontales (Ngo Bieng, 2007; Goreaud, 2000). Ainsi cinq catégories ont été identifiées : les cacaoyers, les arbres forestiers, les arbres fruitiers, les *Musaceae* et les *Palmaceae*. A partir des noms vernaculaires en Espagnol et/ou Bribri de chaque individu, le nom scientifique est recherché ainsi que la Famille taxonomique. L'individu est ensuite classé dans l'une des cinq catégories.

Dans le cadre de ce travail, on se propose d'étudier le lien entre l'indice d'attaque

Espèces (Espagnol)	Espèces (Latin)	Familles
Balsa	<i>Ochroma pyramidale</i>	<i>Bombacaceae</i>
Cabeza de mono	<i>Licania platypus</i>	<i>Chrysobalanaceae</i>
Cacho de Venado	<i>Guettarda comata</i>	<i>Rubiaceae</i>
Cedro	<i>Cedrela sp.</i>	<i>Meliaceae</i>
Cedro Amargo	<i>Cedrela odorata</i>	<i>Meliaceae</i>
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i>	<i>Fabaceae</i>
Chilamate	<i>Ficus elastica</i>	<i>Moraceae</i>
Cola de Pavo	<i>Cupania cineria</i>	<i>Sapindaceae</i>
Flor morada y blanca	non identifié	non identifié
Gavilan	<i>Pentaclethra maculosa</i>	<i>Fabaceae</i>
Guaba	<i>Inga sp.</i>	<i>Fabaceae</i>
Guaba chilillo	<i>Inga sp.</i>	<i>Fabaceae</i>
Guaba cuchilla	<i>Inga sp.</i>	<i>Fabaceae</i>
Guabilla	<i>Inga sp.</i>	<i>Fabaceae</i>
Guacimo	<i>Guazuma invira</i>	<i>Sterculiaceae</i>
Jaloba	non identifié	non identifié
Javaca	non identifié	non identifié
Jobo	non identifié	non identifié
Laurel	<i>Cordia alliodora</i>	<i>Boraginaceae</i>
Leñosa	non identifié	non identifié
Madero negro	<i>Gliricidia sepium</i>	<i>Fabaceae</i>
Palo de hule	non identifié	<i>Arecaceae</i>
Papaya cimarron	non identifié	<i>Caricaceae</i>
Pataste	<i>Theobroma bicolor</i>	<i>Sterculiacées</i>
Pilon	<i>Hyeronima alchorneoides</i>	<i>Euphorbiaceae</i>
Poro	<i>Erythrina poeppigiana</i>	<i>Fabaceae</i>
Roble	non identifié	non identifié
Sangrillo	non identifié	non identifié
Sura	non identifié	non identifié

Tableau 1 : Tableau des espèces présentent dans la catégories « arbres forestiers »

de la moniliose et, d'une part, la structure spatiale de la population hôte, les cacaoyers et, d'autre part, la structure spatiale des végétaux de la strate haute, les arbres forestiers (Figure 1d), car ils déterminent les conditions micro-climatiques au sein du dispositif (Martens *et al.*, 2000). L'ensemble des espèces présentes dans la catégorie arbres forestiers sont indiquées dans le tableau 1. On choisit une limite minimale de 10 individus d'une catégorie par dispositif pour calculer les variables de structures de cette catégorie. Cette limite permet que les variables calculées ne soient pas principalement le reflet de la correction de l'effet de bord. Les arbres forestiers sont présents de façon significative dans 29 dispositifs. Notre étude est donc basée sur un ensemble de 29 dispositifs.

Les autres catégories n'étant pas significativement présentes dans la majorité des dispositifs, nous avons choisi de ne pas les étudier dans le cadre de ce travail.

Les variables de structure spatiale

La structure spatiale est étudiée via le formalisme des processus ponctuels (Illian *et al.*, 2008). L'étude des processus ponctuels se fait à partir d'un semis de points qui représente la position des individus dans l'espace. Chaque point représente un individu. Un semis de points est univarié lorsqu'il est composé d'individus appartenant à une même catégorie. Il est bivarié lorsque les individus appartiennent à deux catégories différentes.

La structure spatiale d'un semis de points univarié est étudiée par la fonction du second ordre $L(r)$ de Besag (Ripley, 1977). Cette fonction est basée sur le calcul de la fonction $K(r)$ de Ripley qui caractérise la structure de voisinage autour d'un point. Pour un processus ponctuel homogène et isotrope de densité λ , l'espérance du nombre de voisins présents à une distance inférieure ou égale à r d'un point quelconque du semis est notée $\lambda \cdot K(r)$. Cette espérance est approchée par sa moyenne sur l'ensemble des individus du semis, le calcul se fait de la façon suivante :

$$\hat{K}(r) = \frac{1}{\hat{\lambda}} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \cdot \sum_{i \neq j} k_{ij}$$

Où, N est le nombre de points dans le domaine d'étude de surface D ; $\hat{\lambda} = N/D$ est l'estimateur de la densité du processus, et k_{ij} prend la valeur de 1 si la distance euclidienne entre les points i et j est inférieure ou égale à r , et 0 dans le cas contraire. Pour une structure aléatoire des individus (processus de Poisson), on a : $\lambda \cdot K(r)_{\text{aléatoire}} = \lambda \cdot \pi \cdot r^2$ donc $K(r)_{\text{aléatoire}} = \pi \cdot r^2$. Pour un processus agrégé, les points ont en moyenne plus de voisins que sous l'hypothèse nulle ($K(r) > \pi \cdot r^2$) et inversement, pour un processus régulier ($K(r) < \pi \cdot r^2$). Du fait de la difficulté à interpréter la fonction $K(r)$, on lui préfère la fonction $L(r)$ (Ripley, 1977) qui est une transformation racine carrée de la fonction $K(r)$ de Ripley :

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r$$

Cette fonction facilite l'interprétation graphique ; en effet, pour un processus aléatoire, pour toute distance r , $L(r)=0$. Pour les processus agrégé et régulier, on a donc respectivement ($L(r)>0$) et ($L(r)<0$) (Figure 3 a et b). L'interprétation des résultats doit être restreinte à ceux obtenus pour des rayons égaux à la moitié de la largeur du dispositif étudié (Goreaud, 2000). Dans notre étude on se limitera donc à l'interprétation des résultats obtenus pour des rayons allant jusqu'à 10m.

On étudie l'interaction spatiale entre deux semis de points de catégories différentes par la fonction intertype notée $L_{12}(r)$ (Lotwick and Silverman, 1982). La

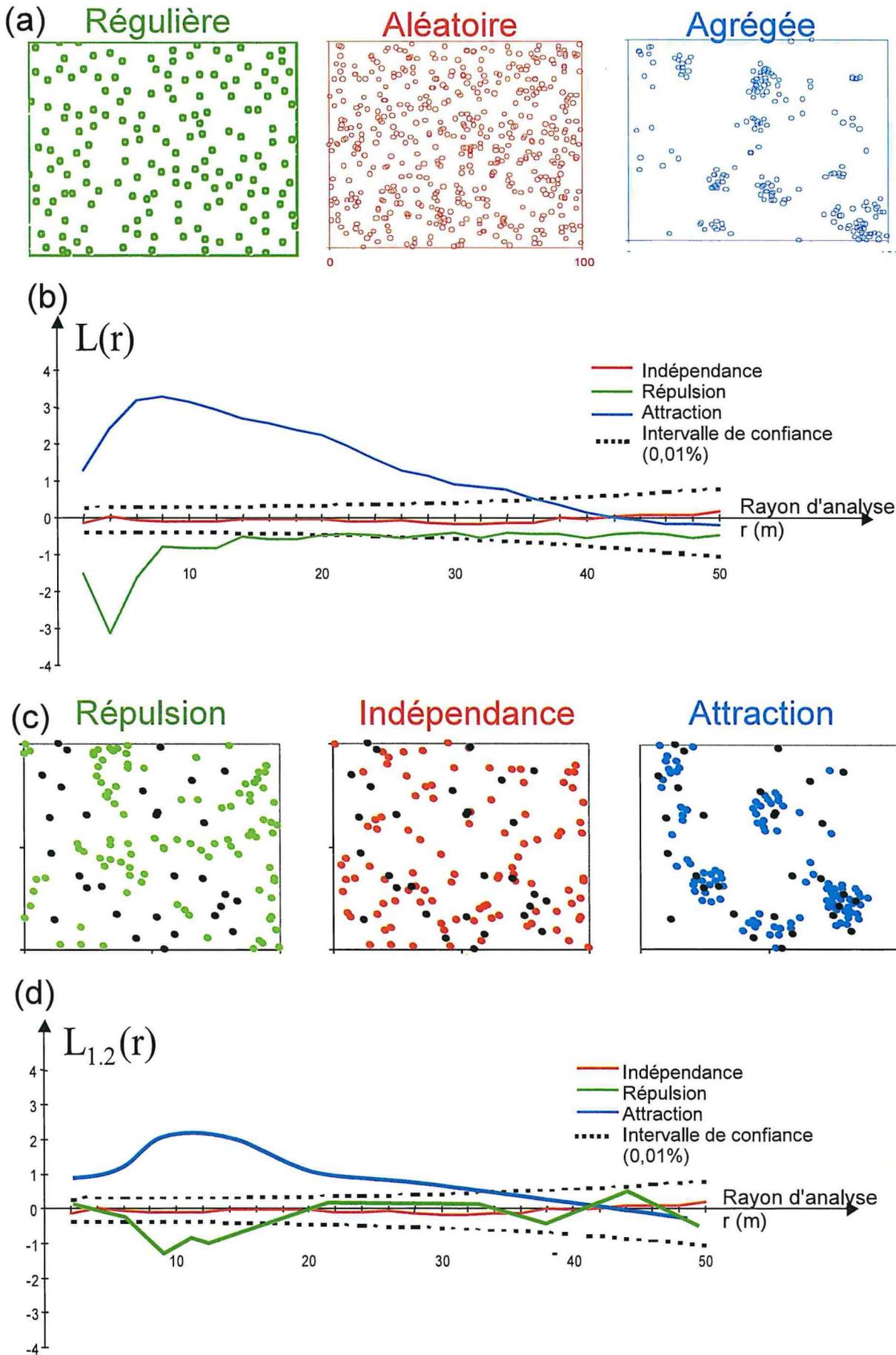


Figure 3 : Illustration des structures spatiales spécifiques et intertypes et courbes associées
 (a) Illustration des structure spécifique régulière, aléatoire et agrégée ; (b) Courbes de la fonction Ripley, $L(r)$, pour les structures régulière, aléatoire et agrégée ; (c) Illustration de structure intertypes de répulsion, d'indépendance et d'attraction et (d) Courbes de la fonction intertype, $L_{1,2}(r)$, intertype pour les structures de répulsion, d'indépendance et d'attraction intertypes. (d'après Goreaud, 2000)

fonction intertype est basée sur le même principe que la fonction $L(r)$ de Besag et Ripley. $K_{12}(r)$ est un recensement de l'espérance du nombre de voisins de la catégorie 2 autour des individus de la catégorie 1 et l'hypothèse nulle est l'indépendance dans le positionnement des points des deux catégories. On a sous l'hypothèse nulle $L_{12}(r)=0$. S'il y a dans un cercle de rayon r autour d'un point de la catégorie 1 : (i) plus de voisins de la catégorie 2 que sous l'hypothèse nulle d'indépendance on parle d'attraction intertype ($L_{12}(r)>0$) ; (ii) inversement, moins de voisins de la catégorie 2 que sous l'hypothèse nulle d'indépendance on parle de répulsion intertype ($L_{12}(r)<0$) (Figure 3 c et d). D'autre part, on sait qu'en espérance : $E(L_{12}(r))=E(L_{21}(r))$ (Goreaud, 2000). Le calcul de l'intervalle de confiance est plus fiable quand la population 1 a une forte densité. C'est pourquoi, dans notre étude, les résultats présentés sont ceux de $L_{12}(r)$ avec 1 la population de cacaoyers et 2 la population d'arbres forestiers.

Nous avons calculé les effets de bords suivant la méthode de Ripley (1977) et l'intervalle de confiance au risque local de 1% de se tromper a été calculé suivant la méthode de Monte Carlo (Metropolis and Ulam, 1949) (détails en annexe 2).

Indice d'attaque du bioagresseur

Dans chaque dispositif, le niveau d'attaque de moniliose est estimé via un indice d'attaque noté I , dont voici le calcul :

$$I=A_m/A_t$$

où A_t est l'intégrale au cours du temps du nombre total de fruits présents sur les cacaoyers d'un dispositif, et A_m l'intégrale au cours du temps du nombre de fruits malades de la moniliose présents sur les cacaoyers d'un dispositif (chaque intégrale est exprimée en nombre de fruits.jours). Cet indice d'attaque est calculé sur les chérelles (fruit d'une longueur < 10 cm), il est alors noté I_p (p pour petit), et sur les cabosses (fruit d'une longueur > 10 cm), il est alors noté I_g (g pour grand).

Nous présentons dans ce rapport l'étude du lien entre structure spatiale et l'indice d'attaque calculé sur les cabosses. Le même travail a été effectué sur l'indice d'attaque calculé sur les chérelles (Annexe 3).

Modèle explicatif de l'indice d'attaque I_g

La variable à expliquer est I_g . La normalité de distribution de cet indice d'attaque est obtenue suite à sa transformation via la fonction logarithmique de base 10 (Tableau 2). La variable à expliquer du modèle est donc la variable notée $\log I_g = \log_{10}(I_g)$.

La stratégie de recherche des variables explicatives du modèle complet, qui doivent être indépendantes les unes des autres, est synthétisée dans la figure 4. La première étape revient à étudier les corrélations entre les variables de structures [$L(1\text{à}10)$ des cacaoyers (groupe de 10 variables liées entre elles), $L(1\text{à}10)$ des arbres forestiers (groupe de 10 variables liées entre elles), $L_{12}(1\text{à}10)$ de l'interaction (groupe de 10 variables liées entre elles)] et $\log I_g$ via le test de Kendall. Pour un groupe : si une seule variable est corrélée alors elle est la seule de son groupe à être testée comme variable explicative de I_g . Si au moins deux variables montrent une corrélation avec $\log I_g$, alors on teste chacune de ces variables, comme variable explicative, et on réalise une Analyse en Composante Principale (ACP) sur les 10 variables de ce groupe. Pour une ACP : si les nouvelles variables (les coordonnées des dispositifs sur les axes regroupant 70% de l'inertie) montrent une corrélation (test de Kendall) avec $\log I_g$, alors elles sont testées comme variables explicatives de leur groupe. Parmi l'ensemble des variables testées pour représenter son groupe, une seule est retenue

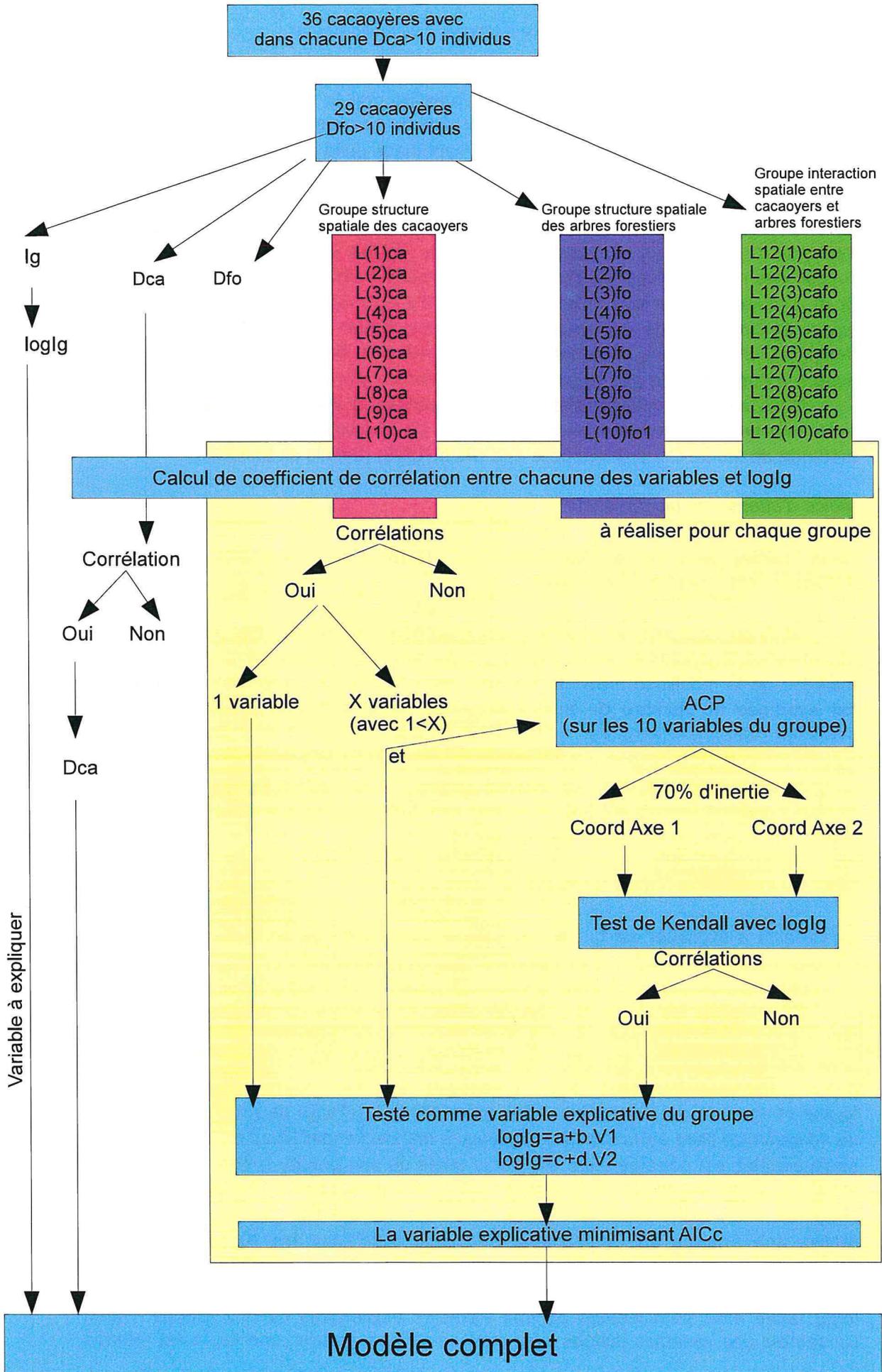


Figure 4 : Schéma synthétique de la stratégie de recherche des variables explicatives du modèle complet.

pour faire partie du modèle complet : celle qui minimise l'AICc (indice décrit ci-dessous). Lorsque nous avons déterminé l'ensemble des variables explicatives du modèle complet, nous avons réalisé l'ensemble des modèles linéaires possibles avec cette combinaison de variables explicatives, et l'indice d'attaque (variable à expliquer). Le meilleur modèle a été choisi suivant le calcul corrigé du critère d'information Akaike (AIC) (Akaike, 1974). Ce critère permet de comparer des modèles, sur la base d'un compromis entre la vraisemblance du modèle (notée L) et k , le nombre de paramètres utilisés. Le calcul de l'AIC est le suivant : $AIC = -2 \cdot \log(L) + 2 \cdot k$. On utilise la formule corrigée de l'AIC (notée AICc) car notre ratio nombre d'observations sur le nombre de paramètres des modèles est inférieur à 40 (Hurvich and Tsai, 1995).

Résultats

L'exemple d'un dispositif

La figure 5 montre les résultats obtenus pour un dispositif (le dispositif 13).

Dans ce dispositif, la densité en cacaoyers est de 79 individus (Figure 5a). Les valeurs de $L(1\text{à}10)$ (Figure 5b, courbe continue) des cacaoyers sont toutes négatives mais uniquement significatives ($p < 0.01$) pour les rayons allant de 1 à 3 m, avec un pic à -1.68 pour le rayon de 2m. On en déduit que la structure spatiale des cacaoyers est significativement régulière pour les rayons de 1 à 3 m et à tendance régulière, bien que non significative, pour les rayons de 4 à 10m. Le pic de régularité pour les rayons de 2m indique que les cacaoyers du dispositif 13 sont en moyenne espacés de 2m les uns des autres.

La densité en arbres forestiers de ce dispositif est de 11 individus (Figure 5a). Les valeurs de $L(r)$ calculées sur les arbres forestiers de ce dispositif (Figure 5c, courbe continue) sont toutes positives mais uniquement significatives ($p < 0.01$) pour les rayons de 3 à 5m avec un pic pour des rayons de 4 m. Les arbres forestiers sont donc significativement agrégés dans les rayons de 3 à 5 m. Les agrégats ont des rayons moyens de 4m.

Les valeurs de la fonction $L_{12}(r)$ de la relation intertype entre les cacaoyers et les arbres forestiers (Figure 5d, courbe continue) sont toutes négatives mais uniquement significatives pour les rayons de 3 à 5 m avec un pic à -1.33 pour les rayons de 5m. On en déduit qu'il y a une tendance à la répulsion entre les positions des cacaoyers et celles des arbres forestiers et qu'en moyenne, les cacaoyers sont éloignés de 5 m des arbres forestiers.

La courbe du nombre total de cabosses (malades et saines) récoltées sur le dispositif 13 en fonction du temps (Figure 5e, courbe continue) montre un pic de production atteignant 200 cabosses en septembre. La courbe du nombre de cabosses infectées par la moniliose en fonction du temps (Figure 5e, courbe en pointillée) montre un pic de 74 cabosses infectées également au mois de septembre. L'Ig de ce dispositif est de 23 fruits infectés.jours.

Ces résultats ont été calculés dans les 29 dispositifs. Pour chaque dispositif, 10 variables de structure liées entre elles informent sur la structure spatiale des cacaoyers ($L(1\text{à}10)_{ca}$), 10 autres, liées entre elles, informent sur la structure spatiale des arbres forestiers ($L(1\text{à}10)_{fo}$) et encore 10 autres, liées entre elles, informent sur l'interaction spatiale entre cacaoyers et arbres forestiers ($L_{12}(1\text{à}10)_{cafo}$). Des ACP ont donc été réalisées pour résumer ces variables en quelques variables indépendantes les unes des autres.

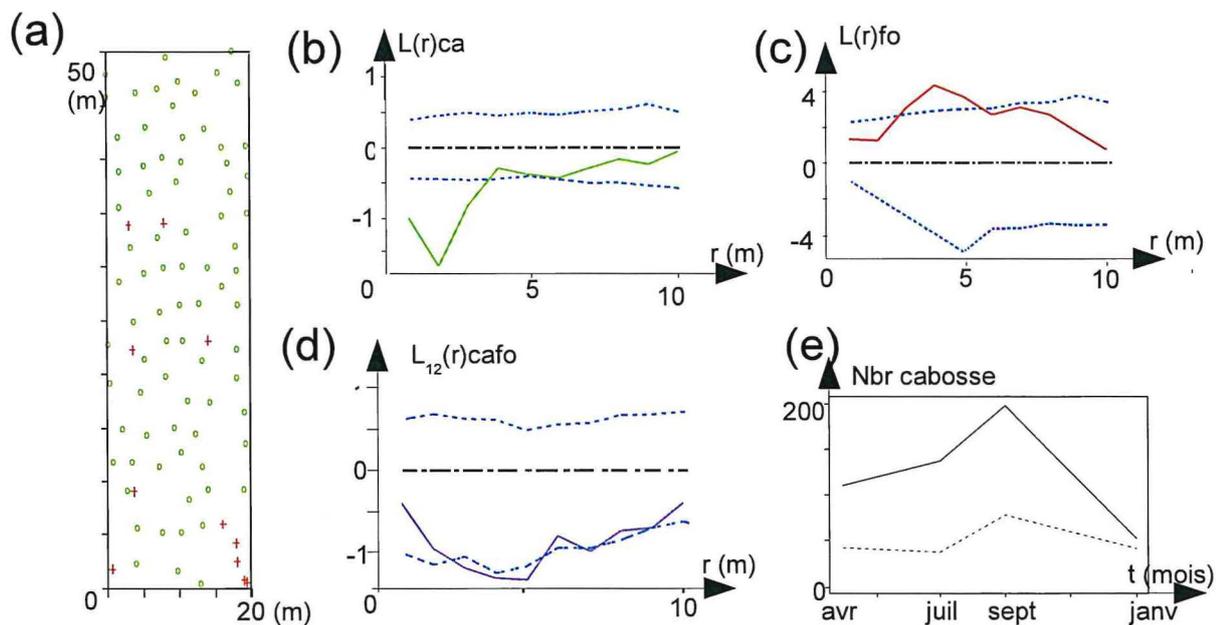


Figure 5 : L'exemple d'un dispositif

(a) Cartographie avec les positions des cacaoyers et des arbres forestiers (respectivement point et croix ; les autres catégories ne sont pas représentées) (b) Courbes $L(r)$ en fonction des rayons d'analyses r pour les cacaoyers (courbe continue) et (c) pour les arbres forestiers (courbe continue) ; (d) Courbe $L_{12}(r)$ intertype entre les cacaoyers et les arbres forestiers en fonction des rayons r (courbe continue). Valeurs théoriques de $L(r)$ ((b) et (c)) (ou de $L_{12}(r)$ (d)) pour une structure aléatoire (ou indépendante) (lignes en traits et points) et intervalle de confiance (avec un risque de 0,01) de ces valeurs théoriques (courbes en pointillées). (e) Courbe du nombre total de cabosse (courbe continue) et du nombre de cabosses infectées par la moniliose (courbe pointillée) en fonction du temps.

Les variables de structure

L'ACP réalisée sur les 10 variables de structure des arbres forestiers permet d'obtenir une variable qui correspond aux coordonnées des dispositifs sur le premier axe de l'ACP, que l'on note FO, et qui résume à elle seule 70,30% de l'information contenue dans les 10 variables de structure des arbres forestiers (Figure 6a). La variable FO est positivement, et significativement ($p < 0.05$) corrélée aux 10 variables de structure (Tableau 5).

L'ACP réalisée sur les 10 variables d'interaction entre cacaoyers et arbres forestiers permet d'obtenir deux variables, qui correspondent aux coordonnées des dispositifs sur les axes 1 et 2 de l'ACP, que l'on note respectivement CAFO1 et CAFO2, et qui résument 74,85% de l'information contenue dans les 10 variables d'interaction (Figure 7a). Les variables CAFO1 et CAFO2 ne sont pas retenues comme variables explicatives du modèle.

L'ACP réalisée sur les 10 variables de structure des cacaoyers permet d'obtenir deux variables, qui correspondent aux coordonnées des dispositifs sur les axes 1 et 2 de l'ACP, que l'on note respectivement CA1 et CA2, et qui résument 74,63% de l'information contenue dans les 10 variables de structure des cacaoyers (Figure 8a). Les variables CA1 et CA2 ne sont pas retenues comme variables explicatives du modèle.

Le modèle explicatif de l'indice d'attaque sur les cabosses lg

Le modèle complet obtenu via la stratégie de recherche s'écrit :

$$\text{Log}(lg) = 2,22 + 0,13.FO - 0,52.L(4)ca - 0,76.L_{12}(1)cafo$$

C'est également le meilleur modèle linéaire parmi l'ensemble des modèles que l'on peut écrire à partir des trois variables explicatives FO, L(4)ca des cacaoyers et $L_{12}(1)cafo$. Il explique 34% de la variance totale de l'indice (Tableau 2). Le test de Fisher indique que le modèle est significativement explicatif. La normalité et l'homoscédasticité des résidus sont respectées. On note par contre que les résidus ne sont pas indépendants.

L'analyse de la variance réalisée sur le modèle explicatif de l'lg (Tableau 3) indique que le facteur influençant le plus fortement l'lg est la structure spatiale des arbres forestiers, puis l'interaction spatiale entre cacaoyers et arbres forestiers et enfin la structure spatiale des cacaoyers.

Le coefficient de FO est significativement positif ($p < 0.01$) ce qui indique un lien linéaire positif entre la variable FO et le $\log lg$ (Tableau 4). L'analyse de la variance indique que la variable FO explique une part significative de la variance du $\log lg$ (Tableau 3).

Le coefficient de $L_{12}(1)cafo$ est significativement négatif ($p < 0.05$) ce qui indique un lien linéaire négatif entre $L_{12}(1)cafo$ et $\log lg$ (Tableau 4). $L_{12}(1)cafo$ explique une part significative de la variance de $\log lg$ (Tableau 3).

Le coefficient de L(4)ca est significativement négatif ($p = 0.06$) ce qui indique un lien négatif entre la variable L(4)ca et le $\log lg$ (Tableau 4). L(4)ca explique une part significative de l'indice lg à un seuil de risque de 10% (Tableau 3).

Cependant, les fortes valeurs de FO, de L(4)ca et de $L_{12}(1)cafo$ ne sont pas immédiatement interprétables respectivement comme des structures agrégée ou attractive. Il faut regarder les valeurs de ces variables sur l'ensemble des dispositifs

Tableau 2 : Résultats globaux du modèle explicatif de l'indice d'attaque de la moniliose sur les cabosses.

Résultats globaux	
Modèle	$\text{Log(Ig)}=a+b.FO+c.L(4)ca+d.L_{12}(1)cafo$
Nombre d'observation	29
Shapiro test loglg	W=0,97 (p=0,56)
r^2	0,41
r^2 ajusté	0,34
AICc	64,40
Erreur standard résiduel	0,64
Test de Fisher :	F=5,81 (p-value<0,01)
Shapiro test (résidu)	W= 0,97 (p-value=0,58)
Breush Pagan test (résidu)	BP=1.39 (p-value=0,71)
Durbin-Watson test (résidu)	DW=1,45 (p-value=0,05)

Tableau 3 : Analyse de la variance de l'indice Ig

Décomposition de la variance de l'Ig en variance expliquée par chaque variable du modèle et en variance résiduel. Résultats du test de Fisher qui permet d'estimer si les variables du modèle expliquent une part significative de la variance de l'Ig.

	Analyse de la variance				
	Df	SumSq	MeanSq	F value	Pr(>F)
FO	1	3,24	3,24	8,01	<0,01
L(4)ca	1	1,61	1,61	3,98	0,06
$L_{12}(1)cafo$	1	2,20	2,20	5,43	0,03
Résidus	25	10,13	0,41		

Tableau 4 : Estimation des coefficients du modèle explicatif de l'indice Ig

Résultats des test de Student sur chaque paramètre pour estimer si celui ci est différent de 0.

	Paramètres			
	Estimation des paramètres	Erreur standard	T value	Pr(> t)
a	2,22	0,20	11,17	<0,01
b	0,13	0,04	3,15	<0,01
c	-0,52	0,27	-1,95	0,06
d	-0,76	0,32	-2,33	0,03

pour pouvoir les interpréter en termes de structure.

Les liens entre structure spatiale des arbres forestiers, des cacaoyers et leur interaction avec l'indice d'attaque Ig

Les variables de structure spatiale des arbres forestiers sont les variables de structure présentant les plus forts écarts type autour de moyennes plus ou moins proches de zéro (Tableau 6) ce qui indique une forte diversité de structure. En effet, la structure spatiale des arbres forestiers est aléatoire dans 23 dispositifs, elle est significativement agrégée (pour au moins un rayon, $p < 0.01$) dans 4 dispositifs et elle est significativement régulière (pour au moins un rayon, $p < 0.01$) dans 2. Les fortes valeurs de $L(r)_{fo}$ et de FO sont donc interprétables comme des structures agrégées et leurs faibles valeurs sont interprétables comme des structures régulières. Cette forte diversité de structure rend les variables de structure des arbres forestiers discriminante par rapport aux autres variables de structure. Elle permet donc de caractériser les SAF à base de cacaoyers de Talamanca (Annexe 1). Donc, notre modèle indique qu'une agrégation des arbres forestiers est corrélée significativement ($p < 0.01$) à de fortes valeurs de l'indice Ig et qu'une régularité de structure horizontale des arbres forestiers est corrélée significativement ($p < 0.01$) à de faibles valeurs de l'Ig (Tableau 4 et 5, Figure 6).

Les écarts types des variables de structure de $L_{12}(1\text{à}10)_{cafo}$ sont faibles, autour de moyennes proches de zéro (Tableau 8). Ce résultat montre une faible diversité de structure intertype entre cacaoyers et arbres forestiers. En effet, on observe une indépendance intertype dans 26 dispositifs, une répulsion intertype significative (pour au moins un rayon, $p < 0.01$) dans 2 dispositifs et une attraction intertype significative (pour au moins un rayon, $p < 0.01$) dans seulement 1 dispositif. Les fortes valeurs des variables de structures $L_{12}(r)_{cafo}$ ne sont donc à interpréter comme des attractions intertype mais plutôt comme des structures indépendantes à tendance attractive. De même, les faibles valeurs de $L_{12}(r)_{cafo}$ ne sont pas à interpréter comme des structures de répulsion intertype mais plutôt comme des structures d'indépendance intertype à tendance répulsive. Ainsi, notre modèle indique qu'une tendance à l'attraction intertype pour les rayons de 1m est corrélée significativement ($p = 0.03$) à de faibles valeurs de Ig et qu'une tendance à la répulsion intertype pour les rayons de 1m est corrélée significativement ($p = 0.03$) à de fortes valeurs de l'Ig (Tableau 4 et 7, Figure 7).

Les écarts types des variables de structures de $L(1\text{à}10)$ des cacaoyers sont faibles autour de moyennes négatives voire fortement négatives pour les rayons 2 et 3m (Tableau 10). Ces résultats indiquent une faible diversité de structure des cacaoyers. En effet, on observe un pic de régularité significatif ($p < 0.01$) pour les rayons de 2, 3 voire plus rarement 4m dans 27 dispositifs. Dans les 2 dispositifs restants, on observe soit un pic de régularité pour le rayon de 2m mais non significatif ($p > 0.01$) soit un pic de régularité significatif ($p < 0.07$) mais pour un rayon de 7m. La structure des cacaoyers est donc globalement régulière. C'est pourquoi de fortes valeurs de $L(r)_{ca}$, surtout pour les rayons de 2 à 5m, ne peuvent pas être interprétées comme des structures agrégées des cacaoyers mais peuvent être interpréter comme des structures moins régulières voire aléatoires. Les faibles valeurs de $L(r)_{ca}$, par contre, sont à interprétées comme des structures fortement régulières. Le modèle montre un lien négatif significatif entre $L(4)_{ca}$ et Ig (Tableau 4 et 9, Figure 8). Plus $L(4)_{ca}$ est fort et plus la structure spatiale régulière est perturbée au sein des dispositifs par la présence de zone dépourvue de cacaoyers. Plus $L(4)_{ca}$ est faible et plus la structure régulière est homogène sur l'ensemble du dispositif. Un fort Ig est

Tableau 5 : Coefficients de corrélation de Kendall entre variables de structures des arbres forestiers, densité en arbres forestiers et loglg. Les coefficient significatif ($p < 0,10$) sont notés en gras.

Variables	loglg	Axe 1 FO
L(1)fo	0.26	0,41
L(2)fo	0.37	0,54
L(3)fo	0.23	0,74
L(4)fo	0.30	0,65
L(5)fo	0.18	0,71
L(6)fo	0.23	0,69
L(7)fo	0.28	0,69
L(8)fo	0.34	0,66
L(9)fo	0.30	0,63
L(10)fo	0.18	0,45
loglg	1,00	0,34
Dfo	-0,09	

Tableau 6 : Moyennes et écart-type des variables de structure spatiale des arbres forestiers. Calculés sur les 29 dispositifs

	moyenne	Écart type
L(1)fo	-0,05	0,99
L(2)fo	-0,12	1,17
L(3)fo	-0,05	1,41
L(4)fo	0,17	1,29
L(5)fo	-0,17	1,29
L(6)fo	-0,22	1,12
L(7)fo	-0,26	1,04
L(8)fo	-0,29	1,04
L(9)fo	-0,44	0,93
L(10)fo	-0,54	1,06

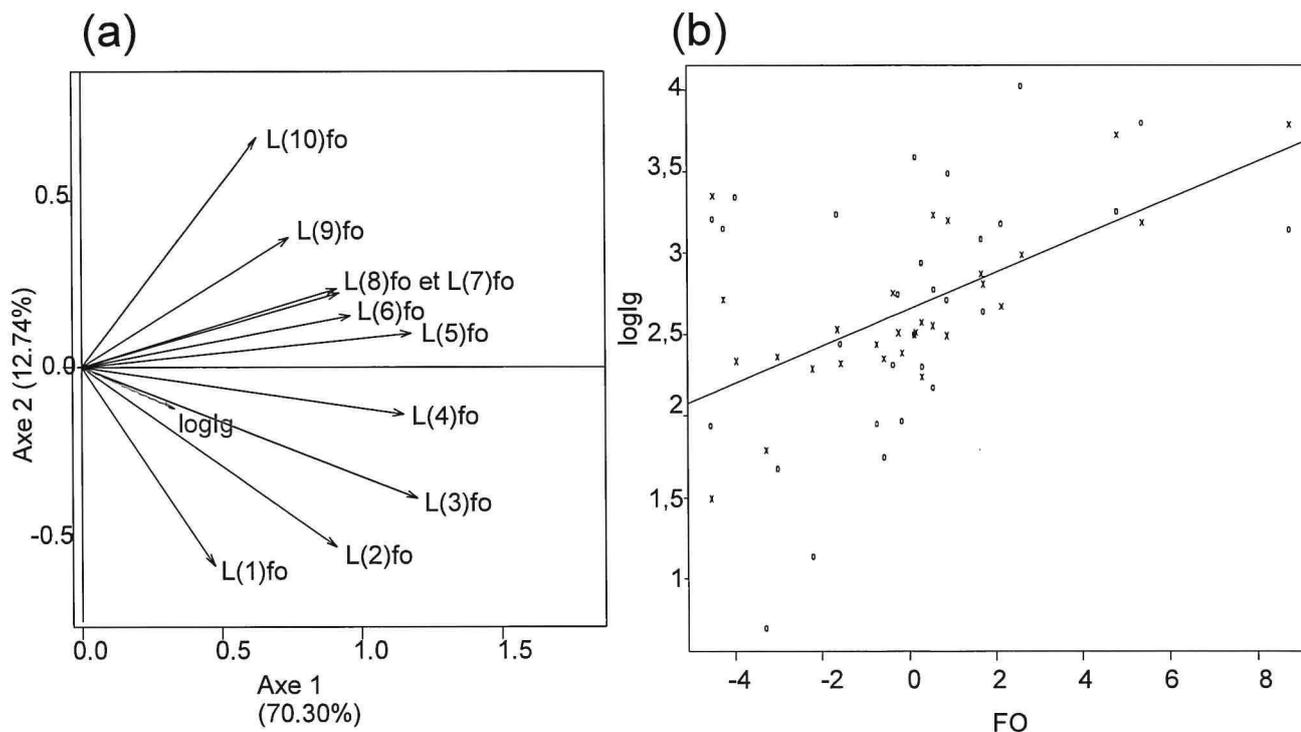


Figure 6 : Lien entre variables de structure spatiale des arbres forestiers et l'indice d'attaque lg
(a) Projection des variables de structure L(1à10) des arbres forestiers sur les deux premières composantes principales de l'ACP réalisée à partir de ces variables. Entre parenthèses figure le pourcentage d'inertie de chaque axe. **(b)** Graphique des valeurs observées et prédites par le modèle explicatif de loglg (respectivement rond et croix) en fonction de la variable FO. La droite de régression est calculée sur les valeurs prédites.

donc corrélé significativement ($p=0.06$) à la présence de structure régulière homogène au sein d'un dispositif, à l'inverse un faible Ig semble corrélé significativement ($p=0.06$) à la présence de zones dépourvues de cacaoyers au sein d'un dispositif (Figure 8b).

Discussion

La structure spatiale des arbres forestiers est le premier facteur de structure influençant l'indice d'attaque de la moniliose sur les grandes cabosses, à l'échelle du dispositif. Plus les arbres forestiers sont agrégés et plus l'indice d'attaque est forte. L'interaction spatiale entre cacaoyers et arbres forestiers est le deuxième facteur influençant le plus fortement l'indice d'attaque. Plus il y a de cacaoyers à des distances inférieures à 1m des arbres forestiers et plus l'indice d'attaque est faible. Enfin la structure spatiale des cacaoyers est le dernier facteur de structure influençant l'indice d'attaque de la moniliose. Plus la structure spatiale régulière des cacaoyers est perturbée par la présence de zones dépourvues de cacaoyers et plus l'indice d'attaque est faible. Les densités en cacaoyers et en arbres forestiers n'influencent pas l'indice d'attaque (Tableau 5, 7 et 9).

La structure spatiale des arbres forestiers et la moniliose

La structure spatiale des arbres forestiers, à l'échelle du dispositif, influence l'indice d'attaque de la moniliose. La structure spatiale des arbres forestiers influence la variance et la distribution de facteurs microclimatiques, et on suppose que c'est par ce biais qu'elle est liée à l'indice d'attaque de la moniliose (Martens *et al.*, 2000; Beer *et al.*, 1997). Parmi ces facteurs microclimatiques l'humidité relative de l'air et la vitesse des vents sont probablement parmi les principaux capables d'influencer le développement de la moniliose.

Martens (2000) a montré que la structure spatiale horizontale des arbres a peu d'effet sur la moyenne de la lumière sous canopée, par contre, elle influence la variance de ce facteur. La variance pour une structure agrégée est supérieure à celle pour une structure aléatoire, qui elle-même est supérieure à celle pour une structure régulière. La structure agrégée va donc créer, au sein d'un même dispositif, des zones à fort ombrage à l'endroit de l'agrégat, et des zones sans ombrage entre deux agrégats. En revanche, la structure spatiale régulière va créer un ombrage moyen sur toute la surface du dispositif. On peut penser, que la structure spatiale des arbres influence également les variances des facteurs physiques directement liés à l'ombrage et la présence d'arbre, comme l'humidité relative de l'air et la vitesse des vents.

Moniliophthora roreri, comme beaucoup de pathogènes, n'a pas les mêmes besoins tout au long de son cycle de vie. Certains de ces besoins peuvent même être opposés. Ainsi, *M. roreri* a besoin d'eau libre et d'une humidité relative élevée pour sa phase de germination jusqu'à la pénétration dans la cabosse (Porrás and Gonzales, 1984 B). Pendant cette phase, une faible aération est favorable à la germination. Au contraire (Thévenin and Trocmé, 1996), le processus de dissémination se fait le plus fréquemment, au cours de périodes où l'humidité relative est faible, car la dispersion la plus efficace est effectuée par le vent, à sec (Dias, 1957).

La structure agrégée des arbres d'ombrage pourrait donc favoriser les variations microclimatiques au sein d'un même dispositif et fournir ainsi deux niches différentes. La présence dans un même dispositif d'agrégat d'arbres forestiers dans lesquels la germination est favorisée (forte humidité relative et faible aération) et de zone entre agrégats dans lesquelles la dissémination est favorisée (faible humidité relative et forte

Tableau 7 : Coefficients de corrélation de Kendall entre variables d'interaction spatiale entre cacaoyers et arbres forestiers, densité en cacaoyers et en arbres forestiers et loglg. Les coefficients significatifs au seuil de 10% sont notés en gras.

Variables	loglg	Axe 1 CAFO1	Axe 2 CAFO2
$L_{12}(1)cafo$	-0.27	0,26	0,30
$L_{12}(2)cafo$	-0.01	0,28	0,53
$L_{12}(3)cafo$	-0.18	0,45	0,40
$L_{12}(4)cafo$	-0.13	0,53	0,36
$L_{12}(5)cafo$	-0.05	0,65	0,25
$L_{12}(6)cafo$	-0.22	0,60	0,12
$L_{12}(7)cafo$	-0.24	0,74	-0,02
$L_{12}(8)cafo$	-0.27	0,63	-0,12
$L_{12}(9)cafo$	-0.15	0,62	-0,10
$L_{12}(10)cafo$	-0.09	0,47	-0,27
loglg	1,00	-0,23	-0,07
Dca	-0,17		
Dfo	-0,09		

Tableau 8 : Moyennes et écart-type des variables d'interaction spatiale entre cacaoyers et arbres forestiers. Calculés sur les 29 dispositifs

	Moyenne	Écart-type
$L_{12}(1)cafo$	-0,18	0,37
$L_{12}(2)cafo$	-0,18	0,28
$L_{12}(3)cafo$	-0,19	0,36
$L_{12}(4)cafo$	-0,14	0,37
$L_{12}(5)cafo$	-0,06	0,41
$L_{12}(6)cafo$	-0,09	0,32
$L_{12}(7)cafo$	-0,14	0,34
$L_{12}(8)cafo$	-0,11	0,30
$L_{12}(9)cafo$	-0,13	0,36
$L_{12}(10)cafo$	-0,08	0,42

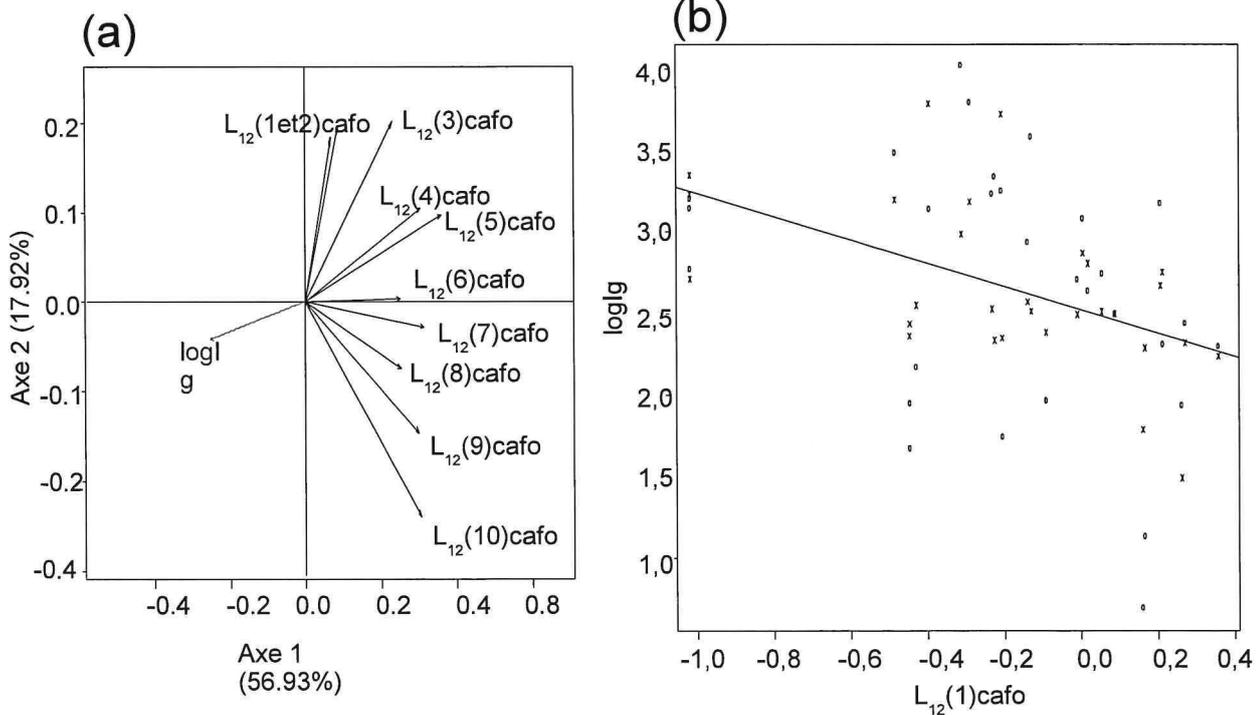


Figure 7 : Lien entre les variables d'interaction spatiale entre cacaoyers et arbres forestiers et l'indice d'attaque lg

(a) Projection des variables d'interaction spatiale $L_{12}(1\text{à}10)cafo$ sur les deux premières composantes principales de l'ACP réalisée sur ces variables. Entre parenthèses figure le pourcentage d'inertie de chaque axe. (b) Graphique des valeurs observées et prédites par le modèle explicatif de loglg (respectivement rond et croix) en fonction de la variable $L_{12}(1)cafo$. La droite de régression est calculée sur les valeurs prédites.

aération) entraînerait à l'échelle du dispositif une augmentation de l'indice d'attaque. Par contre, la structure spatiale régulière des arbres forestiers qui favoriserait une humidité relative et une aération moyenne sur toute la surface du dispositif ne favorisant ainsi aucune phase du cycle de vie du pathogène en particulier, entraînerait un indice d'attaque faible à l'échelle du dispositif. Aujourd'hui, on recommande un ombrage moyen sur les parcelles infectées de moniliose (Mossu, 1990). L'obtention d'un ombrage moyen se réalise en gérant la densité d'arbres forestiers mais aussi leur structure spatiale (Martens *et al.*, 2000). D'après notre étude, une structure spatiale régulière des arbres forestiers serait à recommander dans le cadre de la lutte contre la moniliose. Cependant, cette même structure pourrait s'avérer favorable à d'autres populations de bioagresseurs (Schroth *et al.*, 2000). L'approfondissement des connaissances dans ce domaine pourrait permettre d'émettre des recommandations prenant en compte l'ensemble des problèmes sanitaires des plantations.

En plus de l'effet de la structure spatiale des arbres forestiers sur les variables microclimatiques, on peut supposer que la structure spatiale aura également un effet-barrière. Des études ont montré que la présence d'espèces non-hôtes ou résistantes permettait de diminuer l'intensité d'une épidémie car une partie de l'inoculum était capturé par les espèces non-hôtes (Mundt, 2002). On peut supposer que la structure spatiale régulière des arbres forestiers permettrait une plus grande capture de l'inoculum au sein du dispositif ce qui diminuerait l'indice d'attaque. On peut également penser que la structure spatiale régulière des arbres forestiers empêcherait une plus grande partie de l'inoculum de sortir du dispositif, qu'une structure spatiale agrégée. Enfin, le rôle de la pluie dans la dissémination de la moniliose paraît surtout clair dans la propagation de la maladie d'une cabosse à l'autre au sein d'un même arbre (Thévenin and Trocmé, 1996). On peut supposer qu'une structure spatiale régulière des arbres forestiers intercepte les précipitations pour une plus grande quantité de cacaoyers qu'une structure spatiale agrégée. Ce qui permettrait une diminution de l'infection au sein d'un même arbre et donc une diminution globale de l'indice d'attaque à l'échelle du dispositif.

D'autre part, nos résultats montrent que plus il y a de cacaoyers à une distance de 1m des arbres forestiers et moins l'indice d'attaque du bioagresseur est forte. On peut émettre deux hypothèses : (i) un effet négatif du fait de l'ombrage sur la dissémination des conidies produites sur les cabosses du cacaoyer, pour les raisons déjà explicitées plus haut et/ou (ii) un effet barrière de l'arbre d'ombrage qui intercepte les conidies produites sur des cabosses malades d'autres cacaoyers et évite la contamination du cacaoyer protégé.

La structure spatiale des cacaoyers et la moniliose

Les cacaoyers sont espacés de 2 à 3m sur la quasi-totalité des dispositifs étudiés. Généralement, les structures spatiales régulières diminuent l'indice d'attaque comparées aux structures agrégées (Brown and Bolker, 2004). Dans notre étude le manque de situations contrastées ne permet pas d'évaluer l'effet de cette structure régulière sur le bioagresseur. Green (1977) a montré que les conidies pouvaient être transportées à 30 m dans le sens du vent à partir de cabosses infectées situées à 2 m du sol. On peut penser que, du fait de la grande distance de dissémination de la moniliose, la distance de régularité de 2 à 3 m entre les cacaoyers ne soit pas suffisante pour empêcher le bioagresseur d'être transporté d'un arbre à l'autre. Par contre, ce qui semble influencer l'indice d'attaque à l'échelle du dispositif est la perturbation de la régularité dès les faibles distances. La présence de zones dépourvues de cacaoyers, visibles à plusieurs endroits au sein du dispositif diminue l'indice d'attaque de la moniliose. On peut supposer que la présence de ces zones

Tableau 9 : Coefficients de corrélation de Kendall entre variables de structure spatiale des cacaoyers, densité en cacaoyers et loglg. Les coefficients significatifs au seuil de 10% sont notés en gras.

Variables	loglg	Axe 1 CA1	Axe 2 CA2
L(1)ca	-0,04	0,09	0,55
L(2)ca	-0,02	-0,15	0,43
L(3)ca	-0,22	-0,13	0,65
L(4)ca	-0,23	0,33	0,57
L(5)ca	-0,25	0,47	0,40
L(6)ca	0	0,48	0,23
L(7)ca	-0,11	0,56	0,44
L(8)ca	-0,13	0,68	0,35
L(9)ca	-0,04	0,64	0,11
L(10)ca	-0,03	0,64	0,10
loglg	1,00	-0,09	0,25
Dca	-0,17		

Tableau 10 : Moyennes et écart-type des variables de structure spatiale des cacaoyers. Calculés sur les 29 dispositifs

	moyenne	Écart-type
L(1)ca	-0,74	0,44
L(2)ca	-1,33	0,47
L(3)ca	-1,16	0,62
L(4)ca	-0,56	0,45
L(5)ca	-0,26	0,27
L(6)ca	-0,20	0,30
L(7)ca	-0,17	0,40
L(8)ca	-0,14	0,40
L(9)ca	-0,08	0,38
L(10)ca	-0,01	0,42

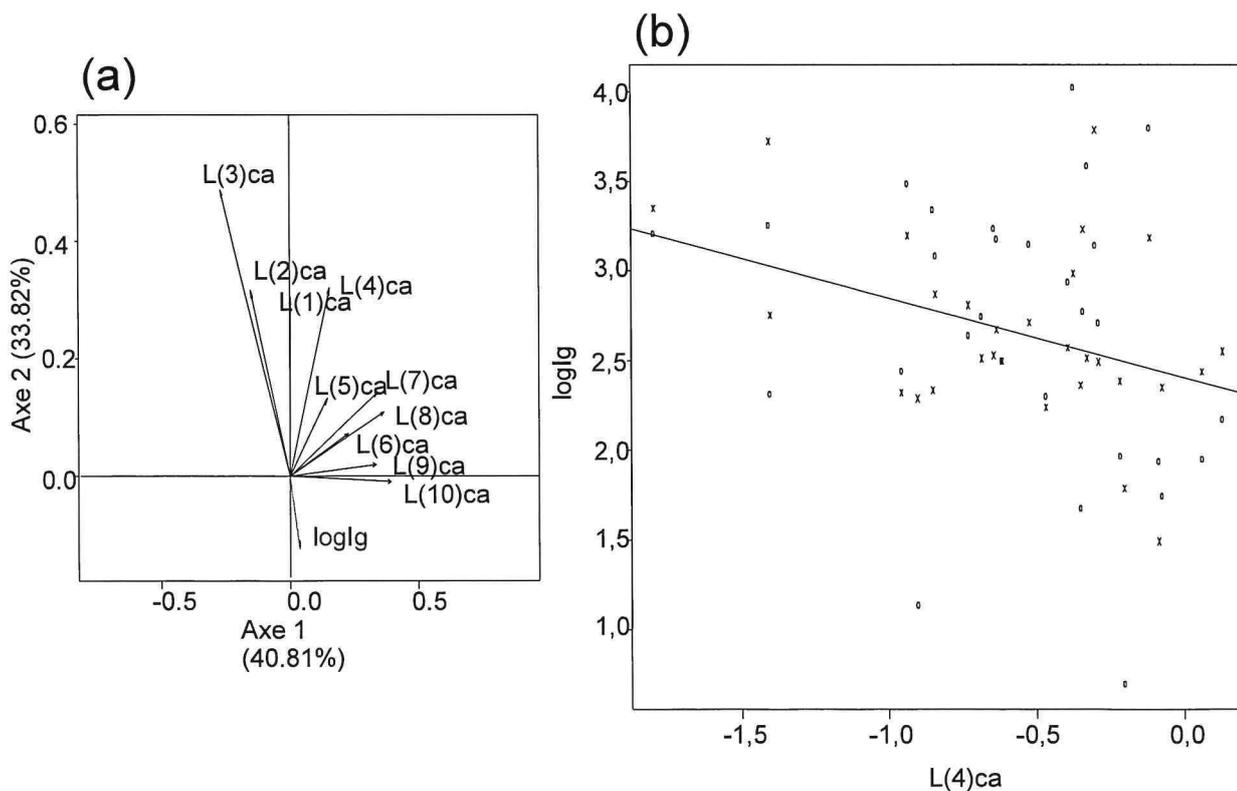


Figure 8 : Lien entre les variables de structure des cacaoyers et l'indice d'attaque Ig

(a) Projection des variables de structure spatiale L(1)à10)ca sur les deux premières composantes principales de l'ACP réalisée sur ces variables. Entre parenthèses figure le pourcentage d'inertie de chaque axe. b) Graphique des valeurs observées et prédites par le modèle explicatif de loglg (respectivement rond et croix) en fonction de la variable L(4)ca. La droite de régression est calculée sur les valeurs prédites.

dépourvues de cacaoyers, isole la moniliose au sein de patchs de cacaoyers sans possibilité d'atteindre les cacaoyers situés de l'autre côté de cette zone. Cette perturbation de la régularité peut se réaliser avec ou sans réduction de la densité en cacaoyers, suivant la distance de régularité et la taille des zones dépourvues de cacaoyers. Ces résultats rejoindraient le constat de Watve (1997) qui a montré que l'agrégation pourrait augmenter le nombre d'hôtes saints car, lorsque la distance entre agrégats augmente, la probabilité de transmission du pathogène d'un agrégat à un autre diminue et la probabilité d'extinction stochastique du pathogène augmente. De ce fait, une structure spatiale agrégée optimisée pourrait s'avérer avantageuse pour l'hôte. L'étude à plus grande échelle de la structure spatiale des cacaoyers permettrait d'identifier si la structure spatiale des cacaoyers est agrégée aux grandes distances, avec une structure régulière au sein des agrégats, comme semble l'indiquer certains dispositifs. Il faudrait alors identifier la taille des agrégats et leurs distances les uns des autres afin de déterminer si cette structure est corrélée à une diminution de l'indice d'attaque de la moniliose.

Les effets d'autres facteurs

Le modèle explicatif de l'indice d'attaque de la moniliose sur les cabosses, proposé dans notre étude, explique 34% de la variance de l'indice. D'autres facteurs que la structure spatiale des végétaux de l'agroforêt influencent l'indice d'attaque de la moniliose. En effet, des résultats obtenus sur le même réseau de dispositifs de la région de Talamanca, indiquent que l'indice d'attaque sur les cabosses est influencé par la taille des cacaoyers, l'altitude des plantations, la charge fruitière et les pratiques de l'agriculteur, en particulier les pratiques sanitaires. La construction d'un modèle global, prenant en compte l'ensemble des résultats obtenus sur ce réseau de dispositifs est actuellement envisagée. La prise en compte de l'ensemble de ces facteurs pourrait permettre de proposer des pistes pour la création de systèmes plus résistants à la moniliose.

Conclusion et perspectives

La structure spatiale agrégée des arbres forestiers favorise le développement de la moniliose, certainement du fait de la création de deux niches différenciées, ombrage dense et plein soleil, dans lesquelles au moins un des moments du cycle de vie du pathogène est favorisé. La gestion de la structure spatiale horizontale de ces végétaux pourrait permettre une réduction de l'indice d'attaque de la moniliose à l'échelle du dispositif. Malgré tout, il serait imprudent d'émettre des recommandations de gestion sans prendre en compte les autres facteurs influençant la moniliose. La clarification de ces différentes influences permettra de tenir compte de l'organisation spatiale dans la conception et la gestion des systèmes complexes, dans le but d'une optimisation du rendement et des bénéfices écologiques de ces systèmes.

Suite à ce travail, des études supplémentaires seront envisagées afin de répondre à plusieurs objectifs. Un travail sera réalisé sur la constitution des catégories afin de tenir compte de l'ensemble des végétaux du SAF (prise en compte de la taille mesurée, de la qualité d'hôte et de non-hôte). Des études sur le lien entre structure spatiale et variables microclimatiques seront envisagées afin de confirmer ou infirmer les hypothèses formulées pour expliquer l'effet de la structure spatiale des arbres forestiers sur le développement de la moniliose. Enfin, l'augmentation de la taille des dispositifs pourrait permettre des études à plus grandes échelles qui permettraient, en particulier, de mieux comprendre le rôle joué par la structure spatiale des cacaoyers sur le développement de la moniliose.

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mes deux encadrants : Marie-Ange Ngo Bieng et Christian Cilas qui ont suivi ce travail de très près. Je les remercie pour le temps qu'ils m'ont accordé, leurs remarques et conseils avisés et les nombreuses discussions que nous avons eues ensemble. Mes remerciements les plus sincères vont également à monsieur Jacques Avelino pour son aide précieuse à la réflexion et à l'écriture de ce rapport, et à monsieur Olivier Deheuvels qui malgré une période très chargée a su m'accorder un peu de son temps. Je remercie également monsieur Jacques Wery, pour l'accueil qu'il m'a fait au sein de son unité de recherche.

Bibliographie

- Aerts, R. (1999). Interspecific competition in natural plant communities: mechanisms, trade-offs and plant-soil feedbacks. *Journal of Experimental Botany* 50(330): 29-37.
- Akaike, H. (1974). New Look at Statistical-Model Identification. *Ieee Transactions on Automatic Control* AC19(6): 716-723.
- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture Ecosystems & Environment* 74(1-3): 19-31.
- Aylor, D. E. (1990). The Role of Intermittent Wind in the Dispersal of Fungal Pathogens. *Annual Review of Phytopathology* 28: 73-92.
- Babin, R., Hoopen, G. M. T., Cilas, C., Enjalric, F., Yede, Gendre, P. & Lumaret, J. P. Impact of shade on the spatial distribution of *Sahlbergella singularis* in traditional cocoa agroforests. *Agricultural and Forest Entomology* 12(1): 69-79.
- Babin, R., Hoopen, G. M. T., Cilas, C., Enjalric, F., Yede, Gendre, P. & Lumaret, J. P. (2010). Impact of shade on the spatial distribution of *Sahlbergella singularis* in traditional cocoa agroforests. *Agricultural and Forest Entomology* 12(1): 69-79.
- Barot, S. (2004). Mechanisms promoting plant coexistence: can all the proposed processes be reconciled? *Oikos* 106(1): 185-192.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D. & Somarriba, E. (1997). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38(1-3): 139-164.
- Brophy, L. S. & Mundt, C. C. (1991). Influence of Plant Spatial Patterns on Disease Dynamics, Plant Competition and Grain-Yield in Genetically Diverse Wheat Populations. *Agriculture Ecosystems & Environment* 35(1): 1-12.
- Brown, D. H. & Bolker, B. M. (2004). The effects of disease dispersal and host clustering on the epidemic threshold in plants. *Bulletin of Mathematical Biology* 66(2): 341-371.
- Dahlquist, R. M., Whelan, M. P., Winowiecki, L., Polidoro, B., Candela, S., Harvey, C. A., Wulfhorst, J. D., McDaniel, P. A. & Bosque-Perez, N. A. (2007). Incorporating livelihoods in biodiversity conservation: a case study of cacao agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Biodiversity and Conservation* 16(8): 2311-2333.
- Dawson, T. & Fry, R. (1998). Agriculture in nature's image. *Trends in Ecology & Evolution* 13(2): 50-51.
- Deheuvels, O., Avelino, J., Somarriba, E., Rodriguez Arias, I. & Malezieux, E. Structure and productivity of Cocoa based Agroforestry Systems. *Working paper to be submitted in 2010*.
- Dias, J. (1957). Observaciones sobre la incidencia de *Monilia* del cacao en Ecuador. *Turrialba* (7): 95-99.
- Eddleston, M., Karalliedde, L., Buckley, N., Fernando, R., Hutchinson, G., Isbister, G., Konradsen, F., Murray, D., Piola, J. C., Senanyake, N., Sheriff, R., Singh, S., Siwach, S. B. & Smit, L. (2002). Pesticide poisoning in the developing world - a minimum pesticides list. *Lancet* 360(9340): 1163-1167.
- Evans, H. C. (1981). Pod rot of cocoa caused by *Moniliophthora roreri*. *Phytopathological papers* (24): 1-44.

- Evans, H. C. (1998). Disease and sustainability in the cocoa agroecosystem. In *In : Proceedings of the First International Workshop on Sustainable Cocoa Growing* Panama City.
- Fowler, R. L., Desrosiers, R. & Hopp, H. (1956). Evaluation of Certain Factors Affecting the Yield of Cacao in Ecuador. *Ecology* 37(1): 75-81.
- Franzen, M. & Mulder, M. B. (2007). Ecological, economic and social perspectives on cocoa production worldwide. *Biodiversity and Conservation* 16(13): 3835-3849.
- Fukai, S. & Trenbath, B. R. (1993). Processes Determining Intercrop Productivity and Yields of Component Crops. *Field Crops Research* 34(3-4): 247-271.
- Goreaud, F. (2000). Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et à la modélisation des peuplements complexes. . In *ENGREF*, Vol. Thèse de doctorat en Sciences forestières, 362p.
- Green, M. J. (1977). Estudios sobre *Monilia rozeri* adelantados en Caldas-Colombia. *El Cacaotero Colombiano* 2(25).
- Hurvich, C. M. & Tsai, C. L. (1995). Model Selection for Extended Quasi-Likelihood Models in Small Samples. *Biometrics* 51(3): 1077-1084.
- Illian, J., Penttinen, A., Stoyan, H. & Stoyan, D. (2008). *Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns*. England.
- Isbell, F. I., Polley, H. W. & Wilsey, B. J. (2009). Biodiversity, productivity and the temporal stability of productivity: patterns and processes. *Ecology Letters* 12(5): 443-451.
- Leibee, G. L. & Capinera, J. L. (1995). Pesticide Resistance in Florida Insects Limits Management Options. *Florida Entomologist* 78(3): 386-399.
- Lotwick, H. W. & Silverman, B. W. (1982). Methods for Analyzing Spatial Processes of Several Types of Points. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Methodological* 44(3): 406-413.
- Malezieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., de Tourdonnet, S. & Valantin-Morison, M. (2009). Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29(1): 43-62.
- Martens, S. N., Breshears, D. D. & Meyer, C. W. (2000). Spatial distributions of understory light along the grassland/forest continuum: effects of cover, height, and spatial pattern of tree canopies. *Ecological Modelling* 126(1): 79-93.
- Meloni, S. (1998). A simplified description of the three-dimensional structure of agroforestry trees for use with a radiative transfer model. *Agroforestry Systems* 43(1-3): 121-134.
- Mendez, V. E., Shapiro, E. N. & Gilbert, G. S. (2009). Cooperative management and its effects on shade tree diversity, soil properties and ecosystem services of coffee plantations in western El Salvador. *Agroforestry Systems* 76(1): 111-126.
- Metropolis, N. & Ulam, S. (1949). The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association* 44(247): 335-341.
- Mossu, G. (1990). *Le cacaoyer*. Paris.
- Mundt, C. C. (2002). Use of multiline cultivars and cultivar mixtures for disease management. *Annual Review of Phytopathology* 40: 381-+.
- Ngo Bieng, M. A. (2007). Construction de modèles de structure spatiale permettant de simuler des peuplements virtuels réalistes. Application aux peuplements mélangés chêne sessile - pin sylvestre de la région centre. In *ENGREF*, 209p.
- Ostfeld, R. S., Glass, G. E. & Keesing, F. (2005). Spatial epidemiology: an emerging (or re-emerging) discipline. *Trends in Ecology & Evolution* 20(6): 328-336.
- Perry, G. L. W., Miller, B. P. & Enright, N. J. (2006). A comparison of methods for the statistical analysis of spatial point patterns in plant ecology. *Plant Ecology* 187(1): 59-82.
- Ploetz, R. C. (2007). Cacao diseases: Important threats to chocolate production worldwide. *Phytopathology* 97(12): 1634-1639.

-
- Porras, U. V. H. & Gonzales, L. C. (1984 B). Epifitiologia de la moniliasis del cacao (*Monilia roleri*) y su relación con el ciclo de producción en la zona de Matina, Costa Rica. *Fitopatología* 19(2): 78-84.
- Ripley, B. D. (1977). Modeling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Methodological* 39(2): 172-212.
- Schroth, G., Krauss, U., Gasparotto, L., Aguilar, J. A. D. & Vohland, K. (2000). Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agroforestry Systems* 50(3): 199-241.
- Thévenin, J. M. & Trocmé, O. (1996). Moniliophthora pod rot of cocoa. *Plantations, Recherche, Développement* 3(6): 397-406.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418(6898): 671-677.
- Torquebiau, E. (2007). *L'agroforesterie. Des arbres et des champs*. Paris.
- Trenbath, B. R. (1993). Intercropping for the Management of Pests and Diseases. *Field Crops Research* 34(3-4): 381-405.
- Watve, M. G. & Jog, M. M. (1997). Epidemic diseases and host clustering: An optimum cluster size ensures maximum survival. *Journal of Theoretical Biology* 184(2): 165-169.
- Wiersum, K. F. (2004). Forest gardens as an 'intermediate' land-use system in the nature-culture continuum: Characteristics and future potential. *Agroforestry Systems* 61-2(1): 123-134.

Annexe 1

L'ACP présentée dans cette annexe est réalisée sur les 30 variables :
L(1à10)ca, L(1à10)fo et L₁₂(1à10)cafo

Tableau 1 : Coefficients de corrélation de Kendall entre les variables de structure et les axes de l'ACP. Seules les variables significativement corrélées sont indiquées (p<0,01). Entre parenthèse figure le pourcentage d'inertie des axes

	Axe 1 (57,8%)	Axe 2 (10,95%)
L(1)fo	0,42	-0,53
L(2)fo	0,55	-0,35
L(3)fo	0,73	
L(4)fo	0,67	
L(5)fo	0,73	
L(6)fo	0,68	
L(7)fo	0,67	
L(8)fo	0,67	
L(9)fo	0,61	
L(10)fo	0,44	0,41

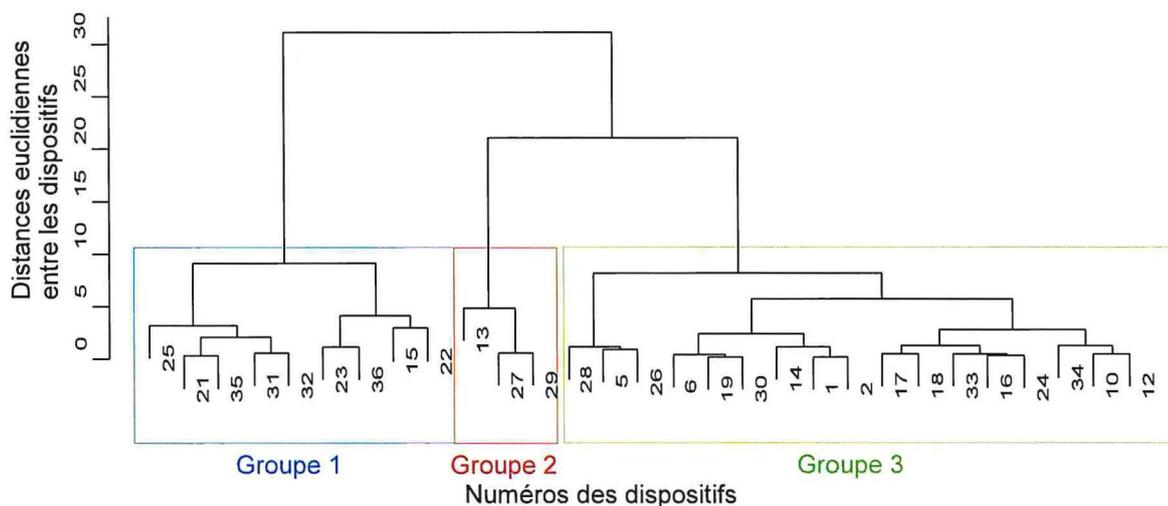


Figure 1 : Typologie des structures spatiales des SAF à base de cacaoyers de la région de Talamanca. 3 groupes retenus

Annexe 1

Dans le cadre de l'étude du lien entre la structure spatiale des végétaux des cacaoyères de Talamanca et l'indice d'attaque d'un bioagresseur, un premier objectif était de caractériser la structure spatiale des SAF à base de cacaoyers. Nous présentons dans cette annexe les résultats de cette caractérisation qui se synthétisent par une typologie d'organisation spatiale.

Méthodes

Une Analyse en Composantes Principales a été réalisée sur l'ensemble des variables de structure des cacaoyers, des arbres forestiers et de l'interaction spatiale entre ces deux catégories. Seuls les premiers axes de l'ACP sont retenus, de manière à sommer au minimum 75% de la variabilité exprimée par l'ensemble des variables de structure. Nous utilisons ensuite les coordonnées des dispositifs sur ces axes comme variables indépendantes dans une classification ascendante hiérarchique. C'est cette dernière analyse qui nous permet de faire apparaître une typologie de SAF à base de cacaoyers pour un ensemble de variables données (Avelino *et al.*, 1997 ; Kristensen, 2003). Pour chaque groupe de la typologie, nous déterminons par test de Kruskal-Wallis l'implication de chacune des variables de structure dans la constitution du groupe.

Résultats

Les variables de structure significativement corrélées ($p < 0.01$) aux deux premiers axes de l'ACP, regroupant 68,76% de l'inertie, sont uniquement des variables de structure des arbres forestiers (Tableau 1). La classification ascendante hiérarchique indique trois grands groupes distincts (Figure 1). Ces trois groupes se différencient clairement sur l'axe 1 de l'ACP (Figure 2).

Le groupe 1 (en bleu sur les figures) est caractérisé par des moyennes de $L(1 \rightarrow 10)_{fo}$ inférieure à zéro (Figure 3). Ces moyennes sont significativement différentes de celles des groupes 2 et 3. Le groupe 1 est donc caractérisé par une structure régulière de ses arbres forestiers (Tableau 2 et 3)

Le groupe 2 (en rouge sur les figures) est caractérisé par des moyennes de $L(1 \rightarrow 10)_{fo}$ supérieures à zéro (Figure 3). Ces moyennes sont significativement différentes de celles des groupes 2 et 3 pour la majorité des rayons r . Le groupe 2 est donc caractérisé par une structure agrégée de ses arbres forestiers (Tableau 2 et 3).

Le groupe 3 (en vert sur les figures) est caractérisé par des moyennes de $L(1 \rightarrow 10)_{fo}$ proche de zéro (Figure 3). Ces moyennes sont significativement différentes de celles des groupes 1 et 2 pour la majorité des rayons r . Le groupe 3 est donc caractérisé par une structure aléatoire de ses arbres forestiers (Tableau 2 et 3).

Discussion

La structure spatiale des arbres forestiers présente une diversité allant de l'agrégation significative (groupe 2) à la régularité significative (groupe 1) en passant par des structures aléatoires (groupe 3). Cette diversité rend les variables de structure spatiale des arbres forestiers discriminantes par rapport aux autres variables de structure qui varient beaucoup moins au sein du réseau de cacaoyère. Les structures aléatoires des arbres forestiers peuvent s'expliquer par l'extension naturelle des arbres forestiers dans les plantations de cacao. Le producteur n'interviendrait qu'en

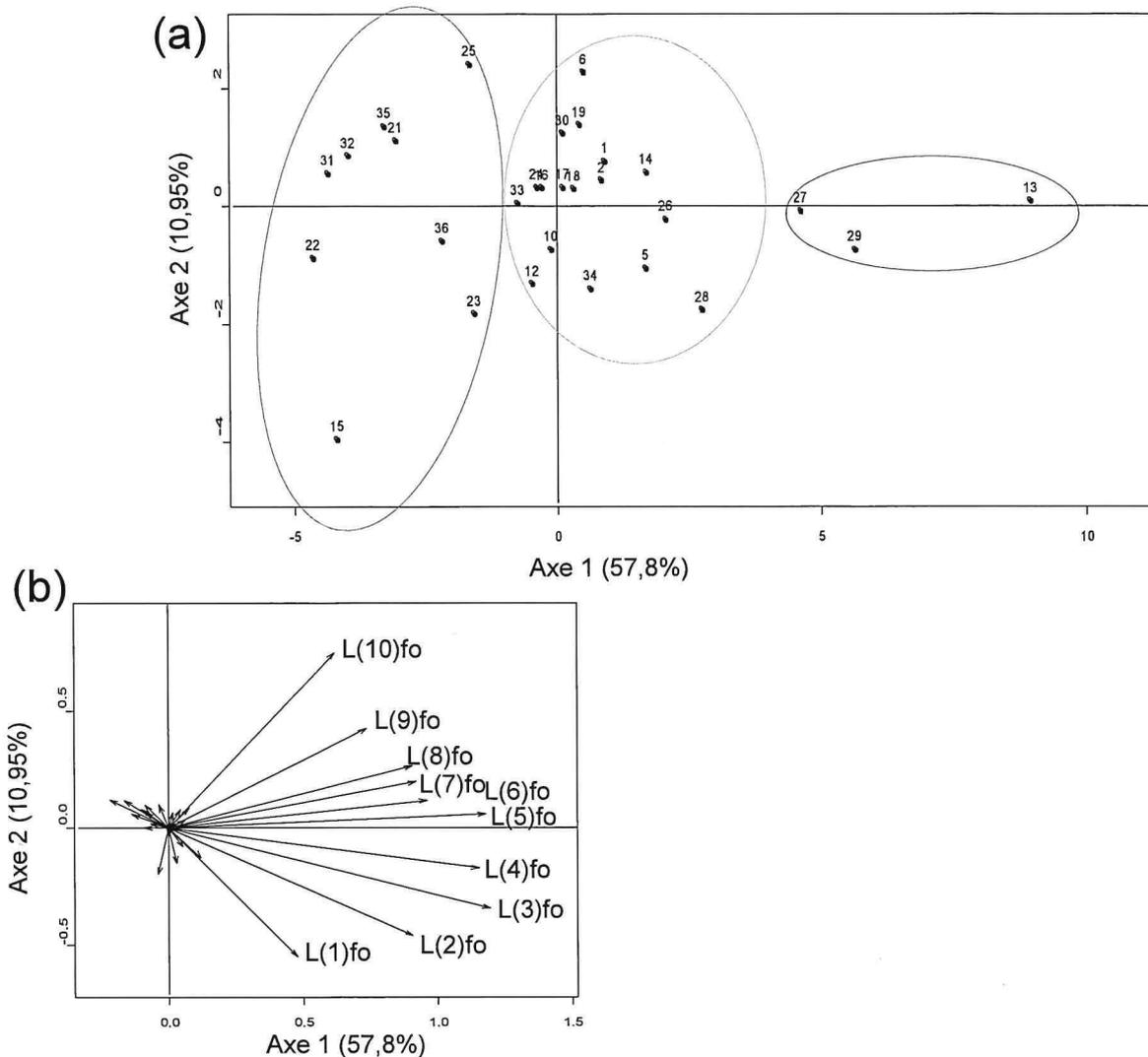


Figure 2 : Projection des variables et positions des dispositifs sur les axes 1 et 2 de l'ACP.
(a) Position des dispositifs sur les deux premiers axes de l'ACP. Les dispositifs appartenant aux groupes 1, 2 et 3 de la typologie de structure sont entourés respectivement en bleu, vert et rouge. **(b)** Projection des variables de structure (L(1)à10)ca, L(1)à10)fo et L_{12} (1)à10)cafo) sur les deux premiers axes de l'ACP. Seuls les noms des variables significativement corrélées à au moins l'un des deux axes sont indiqués.

Tableau 2 : Comparaisons de moyennes entre les groupes (test de Kruskal-Wallis). Seuls les moyennes des variables de structures qui diffèrent significativement ($p < 0,01$) sont notées.

	K-W	p-valyue
L(2)fo	11,92	<0,01
L(3)fo	17,01	<0,01
L(4)fo	18,17	<0,01
L(5)fo	19,45	<0,01
L(6)fo	18,64	<0,01
L(7)fo	20,12	<0,01
L(8)fo	16,10	<0,01
L(9)fo	13,00	<0,01
lp	5,59	0,06

Tableau 3 : Comparaisons multiples de moyenne entre les groupes (test de Kruskal-Wallis)

	Comparaison Groupe 1 et 2		Comparaison Groupe 1 et 3		Comparaison Groupe 2 et 3	
	k-W	p-value	k-W	p-value	k-W	p-value
L(2)fo	7,10	<0,01	5,83	<0,05	6,19	<0,05
L(3)fo	6,32	<0,05	12,11	<0,01	6,19	<0,05
L(4)fo	6,23	<0,05	0,73	0,39	7,29	<0,01
L(5)fo	6,23	<0,05	14,44	<0,01	7,29	
L(6)fo	6,23	<0,05	14,44	<0,01	5,67	<0,05
L(7)fo	6,23	<0,05	15,27	<0,01	7,29	<0,01
L(8)fo	6,23	<0,05	10,28	<0,01	7,29	<0,01
L(9)fo	5,34	<0,05	7,12	<0,01	7,29	<0,01
lp	4,52	<0,05	0,00	0,96	5,18	<0,05

sélectionnant les espèces de son intérêt dans le milieu semis naturel. La structure résultant de ce système de gestion se rapprocherait, pour cette raison, de la structure aléatoire des systèmes naturels. La présence de structure régulière pourrait s'expliquer par une proximité des cacaoyères concernées du village. L'hétérogénéité de structure des arbres forestiers, comparée à l'homogénéité de structure des cacaoyers et de l'interaction entre cacaoyers et arbres forestiers peut expliquer la hiérarchie de facteurs influençant la moniliose.

Les cacaoyers des SAF à base de cacaoyers de la région de Talamanca sont structurés par une distance de régularité de 2 à 3 m entre les individus. Cette structure régulière peut être liée à la plantation initiale des cacaoyers dans la région de Talamanca en relation avec la cacaoculture. Les plantations de cacao des plaines de Talamanca ont d'abord été installées par une compagnie bananière (Chiriqui Land, subsidiaire de l'United Fruit Company) au milieu du 20^{ème} siècle, en remplacement des bananeraies qui étaient devenues peu rentables. Peu de temps après, la compagnie a abandonné le site et ce sont les ex-employés qui ont repris la plantation du cacao dans la région. Dans les deux cas, il s'agissait de plantations installées et conduites selon les normes les plus modernes de l'époque. Ces méthodes contrastaient avec les méthodes indigènes qui s'apparentaient plus à une cacaoculture de cueillette (Villalobos et Borge, 1995). Les populations indigènes qui avaient été chassées des plaines dans la première moitié du 20^{ème} siècle ont repeuplé les plaines et récupéré les plantations plantées par d'autres. Les structures aléatoires des cacaoyers aux plus grandes distances peuvent s'expliquer par des mortalités de cacaoyers qui aujourd'hui ne sont pas systématiquement remplacés.

Nos résultats montrent, dans une majorité de dispositifs, une indépendance entre la position des cacaoyers et celle des arbres forestiers. On peut supposer que l'installation des cacaoyers se fait préférentiellement proche des arbres forestiers du fait du caractère ombrophile des jeunes cacaoyers (Mossu, 1990). Puis, lors de la croissance des cacaoyers, les phénomènes de compétition entre cacaoyers et arbres forestiers créent une plus forte mortalité chez les cacaoyers très proches des arbres forestiers ce qui conduirait, à terme, à une structure intertype indépendante.

Les typologies de structure sont des moyens de description qui peuvent résumer la complexité des structures observées et indiquer quels sont les groupes de végétaux qui rendent ces systèmes hétérogènes. Notre perspective est d'étudier les relations entre les différentes structures spatiales mises en évidence et les performances de ces agroforêts, en termes de rendement et de pression des bio-agresseurs. La clarification de ces différentes influences permettra de tenir compte de l'organisation spatiale dans la conception et la gestion des systèmes complexes dans le but d'une optimisation du rendement et des bénéfices écologiques.

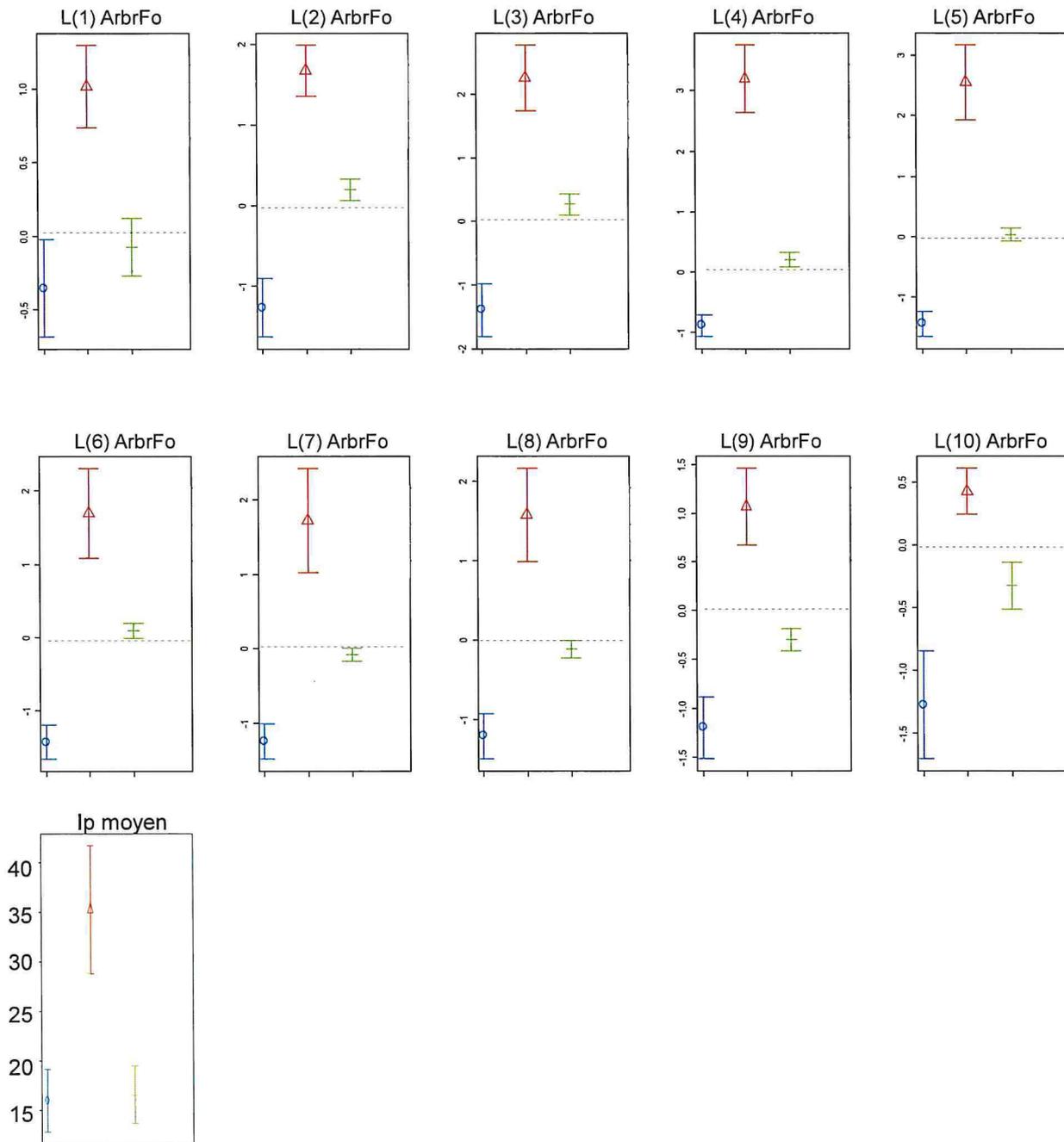


Figure 3 : Moyennes des variables de structure des arbres forestiers et de l'Ip entre les groupes de la typologie de structure spatiale.

Les moyennes des groupes 1, 2 et 3 sont respectivement représentées en bleu, rouge et vert. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards. La valeur $L(r)=0$ correspondant à une structure spatiale aléatoire est représentée en tiret.

Un poster au congré Agro2010 est accepté sur ce sujet

Spatial pattern analyses of cocoa (*Theobroma cacao*) agroforests in the Talamanca region, Costa Rica.

GIDOIN, C.^{1,2}, AVELINO, J.^{2,3}, CILAS, C.², DEHEUVELS, O.^{1,3} and NGO BIENG, MA¹.

1. UMR System. Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens. SupAgro, 2 Place Viala, 34060 Montpellier, cedex 1.
2. UPR 31 Maîtrise des bioagresseurs des cultures pérennes. Avenue Agropolis, 34398 Montpellier, cedex 5.
3. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 7170, Cartago, Turrialba, 30501, Costa Rica.

A major challenge in agronomy is to improve crop yields in eco-friendly agrosystems, especially given the human population increase forecast for around 2050. In this context of ecological intensification, use of natural ecological processes in agrosystems is an avenue to be explored. Natural ecosystems are characterized by strong heterogeneity, which would seem to give greater stability in their functioning, and thus more sustainable productivity (Barot *et al.*, 2004). Agroforestry is an agrosystem which uses that property of heterogeneity in terms of species composition (huge number of species) and spatial structure (vertical, horizontal, *etc.*) (Torquebiau, 2004). Several researchers have shown an interest in the species diversity of these systems, while very few have focused on characterizing their spatial structure.

The spatial structure of a stand is defined as the organization of individuals in space. It describes the local biotic environment around every tree, in interaction with the abiotic environment (Goreaud *et al.*, 1999). In complex agrosystems, such as agroforests, spatial structure could thus affect crop yields, particularly through favorable modifications to the microclimate and plant functioning, or by influencing pests and diseases (*e.g.* decrease in host density, barrier effect) (Schroth *et al.*, 2000). Spatial structure is an interesting characteristic of complex agrosystems, not only for their description, but also for understanding their functioning.

Objective and study sites

Our aim was to analyse the spatial structure of agroforests and suggest a typology of the various spatial structures identified.

In this study, we investigated cocoa agroforestry systems in the Talamanca region, Costa Rica. Cocoa farming is the main source of income for 5 to 6 million small farmers worldwide and there is increasing international demand for cocoa (Franzen & Borgerhoff Mulder, 2007). In Costa Rica, Talamanca's cocoa agroforestry systems produce about 50% of national cocoa production.

Data

Thirty-four 1000-m² plots (50 x 20 m) were installed in the studied systems, to represent the diversity existing in these agroforests. Inside each plot, the positions of trees were recorded and the species were classified in 5 categories: cocoa trees, forest trees, fruit trees, *Musaceae* and *Palmaceae*.

Methods

We analysed the spatial structure of each category using the L(r) Ripley function

(Besag in Ripley, 1977). It is used to classify local neighbourhood structures around each individual tree as regular, random or clustered spatial organization. We also analysed spatial interactions between categories using the intertype function (Lotwick & Silverman, 1982). This function is used to define intertype structures of attraction, independence or repulsion. Both functions have been used in numerous forestry studies to describe spatial structures of complex stands on several scales (Stoyan & Penttinen, 2000; Ngo Bieng *et al.*, 2006), but less often in agroforestry.

Results

The cocoa agroforestry systems in Talamanca displayed a diversity of spatial structures mainly influenced by the spatial structures of cocoa and forest trees. Cocoa trees showed spatial structures that could be regular (Fig.1C) at small distances (0-4 m), or random (Fig. 1D) as shown by the $L(r)$ curves for cocoa trees in two mapped plots (Figure 1 A and B). The spatial structures of forest trees could be regular, random or clustered, depending on the studied plots. Spatial interactions between categories generally tended towards independence.

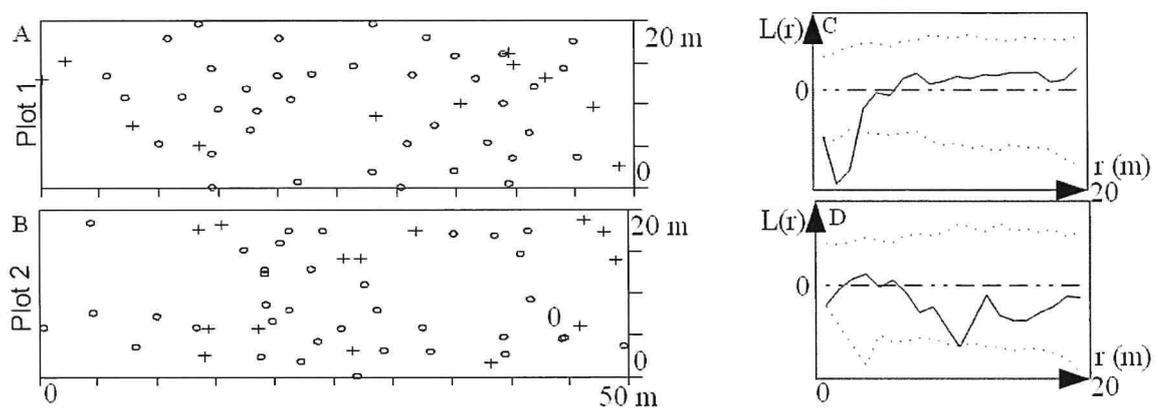


Figure 1. A and B mapping of two plots with cocoa trees (circles) and forest trees (crosses) (other categories are not represented). C and D, $L(r)$ curves (continuous lines) according to distances of analysis r for cocoa trees of both plots. Fig.1C, Highlights $L(r) < 0$ up to 4m, cocoa trees are regularly spaced, and random beyond. Fig.1D, shows that cocoa trees in plot 2 had a random spatial structure for all the studied distances. The dotted lines are the confidence interval representing the null hypothesis of random structure.

Interpretation and discussion

We highlighted a diversity of spatial structures, which we propose to organize in a typology of spatial structures based on analyses of the complete set of plots. This typology will be based on the spatial organization of cocoa and forest trees, but will also consider the spatial structures of other categories. Our prospect is to study relations between the different spatial structures underlined in the typology and the performance of these agroforests, in terms of yield, and resistance to pest and disease pressure. Clarification of these factors will make it possible to take into account spatial organization in the design and management of these complex systems, in order to optimize agronomic and ecological benefits.

Bibliography

Barot, S. and Gignoux, J. 2004. Mechanisms promoting plant coexistence: can all the proposed processes be reconciled? *Oikos*, 106, 158-192.

-
- Franzen, M., Borgerhoff Mulder, M. 2007. Ecological, economic and social perspectives on cocoa production worldwide. *Biodiversity and Conservation*, 16, 3835-3849.
- Goreaud, F., Courbaud, B., Collinet, F. 1999. Spatial structure analysis applied to modelling of forest dynamics: a few examples. In: Proceedings of the IUFRO workshop, Empirical and process based models for forest tree and stand growth simulation, 20-26 September 1997, Oeiras, Portugal. AnaAmaro & Margarida Tomé (Ed.). Novas Tecnologias. 155-172.
- Lotwick, H.W., Silverman, B.W. 1982. Methods for Analysing Spatial Processes of Several Types of Points. *Journal of the Royal Statistical Society*, 44, 406-413.
- Ngo Bieng, M.A., Ginistry, C., Goreaud, F., Perot, T. 2006. First typology of oak and scots pine mixed stands in Orléans forest (France), based on the canopy spatial structure. *New Zealand Journal of Forestry Sciences*, 36, 325-346.
- Ripley, B.D. 1977. Modeling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Methodological*, 39, 172-212.
- Schroth, G., Krauss, U., Gasparotto, L., Duarte Aguilar, J.A. and Vohland, K. 2000. Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agroforestry Systems*, 50, 199-241.
- Stoyan, D. and Penttinen, A. 2000. Recent Applications of Points Process Methods in Forestry Statistics. *Statistical Science*, 15, 61-78.
- Torquebiau, E. L'Agroforesterie: des arbres et des champs. Paris. L'Harmattan (Ed.). 2007. 154p.

Annexe 2

Précision sur la méthode de calcul des variables de structure spatiale

Dans le cadre de l'étude du lien entre la structure spatiale des végétaux des cacaoyères de Talamanca et l'indice d'attaque d'un bioagresseur, la structure spatiale a été étudiée via le formalisme des processus ponctuels. L'objectif de cette annexe est d'apporter des précisions sur les méthodes de calcul des intervalles de confiance et des effets de bords des fonctions $L(r)$ de Besag et $L_{12}(r)$ intertype

Calculs des intervalles de confiance des fonction $L(r)$ de Besag et $L_{12}(r)$ intertype

Pour la fonction $L(r)$ de Besag et Ripley, l'intervalle de confiance, correspondant à l'hypothèse nulle d'une distribution aléatoire, est construit selon la méthode de Monte Carlo. On parle ainsi d'agrégation ou de régularité significative (pour des valeurs respectivement positives ou négatives de $L(r)$) lorsque la fonction $L(r)$ sortira de l'intervalle de confiance, avec un risque local de 1% de se tromper. Pour la fonction intertype, l'intervalle de confiance, correspondant à l'hypothèse nulle d'une distribution indépendante des deux semis de points, est également simulé par la méthode de Monte Carlo. On parle d'attraction ou de répulsion significative (pour des valeurs respectivement positives ou négatives de $L_{12}(r)$) lorsque la fonction sortira de l'intervalle de confiance, avec un risque local de 1% de se tromper.

Calculs des effets de bord

L'effet de bord est corrigé par la méthode proposée par Ripley (1977), pour tout point i situé à une distance $e < r$ de l'un des bords. Sous l'hypothèse que la densité des points est identique dans la fraction de cercle de rayon r exclue de la parcelle à celle dans l'intérieur de la surface testée, la correction consiste à pondérer la valeur k_{ij} par le rapport entre le périmètre total et l'arc de cercle inclus dans la parcelle (Goreaud et Pelissier,). En vue de cette correction de l'effet de bord, une restriction sur la densité minimale du semis de points analysé est importante pour que la structure calculée ne soit pas principalement due à la correction. Dans cette étude, nous avons choisi une densité minimale de 10 individus par dispositif. Cette restriction réduit notre jeu de données à 29 dispositifs, la densité en arbres forestiers étant inférieure à 10 individus dans 7 dispositifs.

Annexe 3

Tableau 4 : Résultats globaux du modèle explicatif de l'indice d'attaque sur les chérelles Ip

Résultats globaux	
Modèle	$\text{Log}(I_p) = a + b \cdot L(1)fo + c \cdot L_{12}(3)cafo$
Nombre d'observation	29
Shapiro test (logIp29)	W=0,97 (p=0,49)
r^2	0,34
r^2 ajusté	0,29
AICc	53,09
Erreur standard résiduel	0,54
F-statistic	F=6,68 (p-value<0,01)
Shapiro test (résidu)	W= 0,96 (p-value=0,38)
Breush Pagan test (résidu)	BP=0,08 (p-value=0,96)
Durbin-Watson test (résidu)	DW=1,65 (p-value=0,17)

Tableau 5 : Analyse de la variance de l'Ip.

Décomposition de la variance de l'Ip en variances expliquées par chaque variable du modèle et en variance résiduel. Résultats du test de Fisher qui permet d'estimer si les variables du modèle expliquent une part significative de la variance de l'Ip.

Analyse de la variance					
	Df	SumSq	MeanSq	F value	Pr(>F)
L(1)fo	1	2,30	2,30	7,89	<0,01
$L_{12}(3)cafo$	1	1,60	1,60	5,48	<0,05
Résidus	26	7,59	0,29		

Tableau 6 : Estimation des coefficients du modèle explicatif de l'Ip.

Test de Student sur chaque paramètre pour estimer si celui ci est différent de 0.

Paramètres				
	Estimation des paramètres	Erreur standard	T value	Pr(> t)
a	2,64	0,11	22,94	<0,01
b	0,32	0,12	2,81	<0,01
c	-0,47	0,29	-1,63	0,12

Annexe 3 : Modèle explicatif de l'Indice d'attaque de la moniliose sur les chérelles

Dans le cadre de l'étude du lien entre la structure spatiale des végétaux d'un SAF et les indices d'attaque d'un bioagresseur, le même travail que celui présenté dans le rapport a été réalisé sur l'indice d'attaque de la moniliose sur les chérelles (fruits en cours de croissance). Ce travail a été réalisé en suivant la même stratégie que celle utilisée et décrite dans le rapport pour étudier le lien entre structure spatiale et indice d'attaque sur les cabosses (fruits ayant atteints leur taille finale).

Résultats

Le meilleur modèle linéaire multiple permettant d'expliquer la variation de $\log(I_p)$ (variable indice d'attaque sur les chérelles transformée par la fonction logarithmique) en fonction des variables de structure est le modèle prenant en compte deux variables explicatives : $L(1)_{fo}$ des arbres forestiers et $L_{12}(3)_{cafo}$ de l'interaction entre cacaoyers et arbres forestiers. Le modèle explicatif de l'indice d'attaque I_p s'écrit :

$$\log(I_p) = a + b.L(1)_{fo} + c.L_{12}(3)_{cafo}$$

Avec $L(1)_{fo}$ la variable $L(r)$ de Besag des arbres forestiers pour un rayon de 1m. De fortes valeurs de $L(1)_{fo}$ indiquent que les arbres forestiers sont agrégés aux rayons de 1m et une faible valeur indique qu'ils sont régulièrement structurés pour les rayons de 1m. $L_{12}(3)_{cafo}$ est la variable de structure intertype calculée sur les rayons de 3m sur les cacaoyers et les arbres forestiers. De fortes valeur de $L_{12}(3)_{cafo}$ indiquent une tendance à la proximité des cacaoyers et des arbres forestiers dans les rayons de 3m, à l'inverse de faibles valeurs indiquent une tendance à la répulsion entre cacaoyers et arbres forestiers pour ces mêmes rayons. Ce modèle explique 29% de la variance totale de l'indice. Le test de Fisher indique que le modèle est significativement explicatif. La normalité, l'homoscédasticité et l'indépendance des résidus sont respectées (Tableau 4).

L'analyse de la variance réalisée sur ce modèle indique que le facteur influençant le plus fortement l' I_p est la structure spatiale des arbres forestiers dans des rayons de 1m, puis l'interaction spatiale entre cacaoyers et arbres forestiers dans des rayons de 3m (Tableau 5).

Le coefficient de $L(1)_{fo}$ est significativement positif ($p < 0.01$) ce qui indique un lien linéaire positif entre $L(1)_{fo}$ et $\log(I_p)$ (Tableau 6). L'analyse de la variance indique que la variable $L(1)_{fo}$ explique une part significative de la variance du $\log(I_p)$ ($p < 0.01$) (Tableau 5). On en déduit que plus la structure des arbres forestiers est agrégée sur les rayons de 1m plus l'indice d'attaque de la moniliose sur les chérelles est fort (Figure 1a).

Le coefficient de $L_{12}(3)_{cafo}$ n'est pas significativement négatif (Tableau 6). Il n'existe donc pas de lien linéaire significatif entre $L_{12}(3)_{cafo}$ et l'indice d'attaque du bioagresseur sur les chérelles. Par contre, $L_{12}(3)_{cafo}$ explique une part significative ($p < 0.05$) de la variance de l'indice d'attaque sur les chérelles (Tableau 5).

Discussion

Ces résultats vont dans le même sens que ceux du modèle explicatif de l'indice d'attaque de la moniliose sur les cabosses. L'agrégation des arbres forestiers a

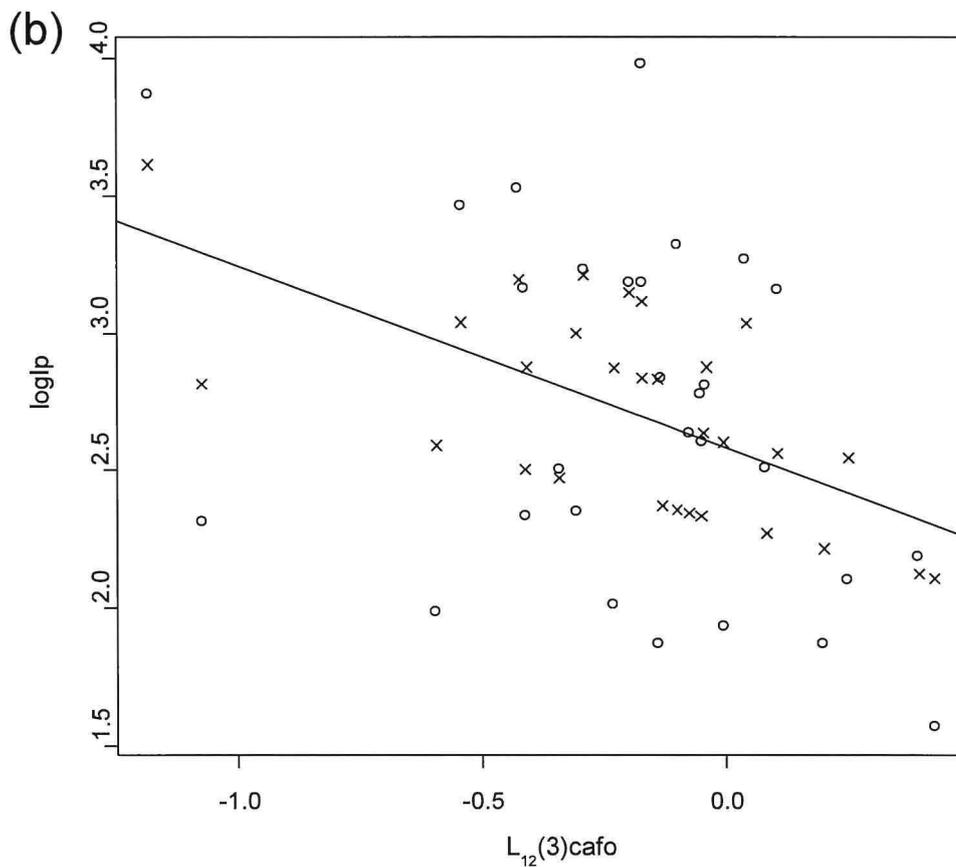
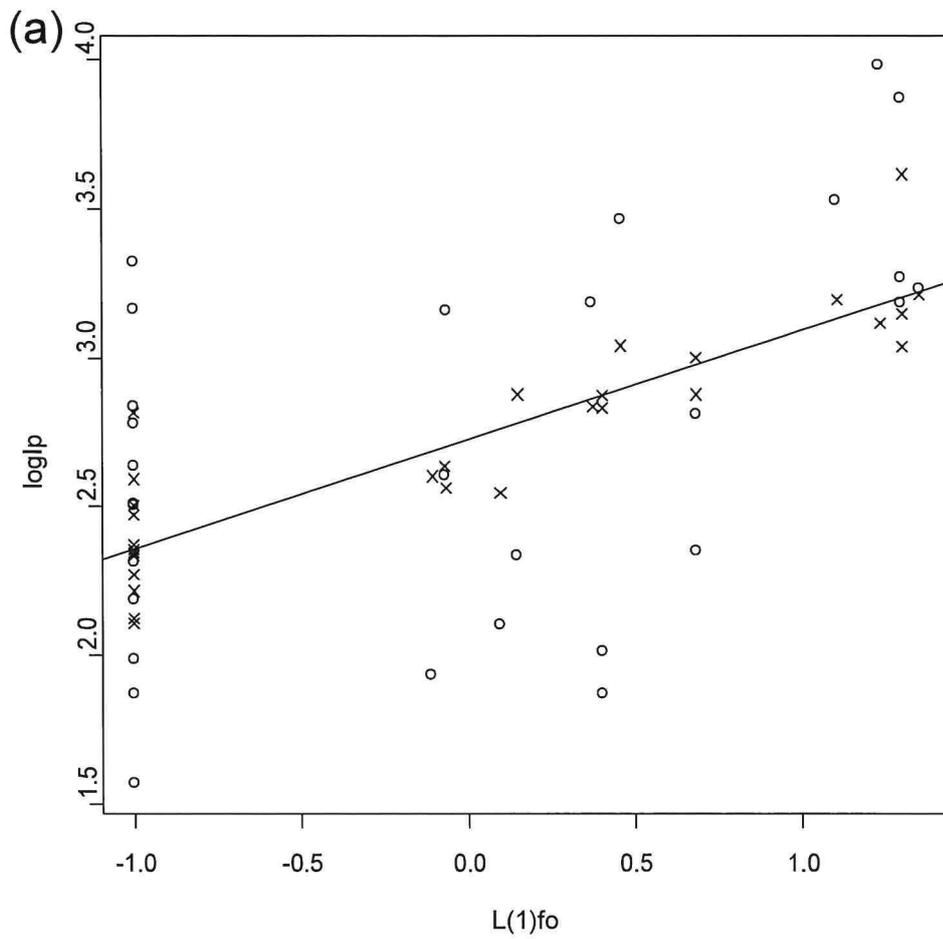


Figure 1 : Lien entre les variables de structure et l'indice d'attaque sur les chérelles Ip
 (a) Graphique des valeurs observées et prédites de loglp (respectivement rond et croix) en fonction de la variable L(1)fo. La droite de régression est calculée sur les valeurs prédites. (b) Graphique des valeurs observées et prédites de loglp (respectivement rond et croix) en fonction de la variable $L_{12}(3)cafo$. La droite de régression est calculée sur les valeurs prédites.

tendance à augmenter l'indice d'attaque de la moniliose sur les chérelles comme sur les cabosses. Par contre, le modèle explicatif de l'Ip exclut un lien linéaire entre l'indice d'attaque des chérelles et l'interaction spatiale entre cacaoyers et arbres forestiers bien que cette interaction explique une partie significative de la variance de l'indice. Dans de futures études il faudrait tester le lien entre $L_{12}(3)_{\text{cafo}}$ et l'indice par d'autres modèles que les modèles linéaires. Pour finir, aucun lien, même non linéaire, n'a été mis en évidence entre l'indice d'attaque sur les chérelles et la structure spatiale des cacaoyers. Des études sur la différence de mécanismes d'infection selon l'âge du fruit pourraient permettre d'expliquer les différences entre le modèle explicatif de l'indice d'attaque sur les cabosses et celui sur les chérelles.

Résumé

La structure spatiale d'un peuplement est définie comme l'organisation des individus dans l'espace. Elle décrit donc l'environnement biotique local autour de chaque arbre en interaction avec l'environnement abiotique. Dans les systèmes agroforestiers, la structure spatiale est susceptible d'influencer le rendement des cultures, particulièrement par des modifications favorables du microclimat et du fonctionnement de la plante, ou par des effets sur les bio-agresseurs (diminution de la densité de l'hôte, ou effet barrière par exemple). Nous avons étudié le lien entre l'indice d'attaque d'un bioagresseur du cacaoyer, la moniliose (*Moniliophthora roreri*) et la structure spatiale horizontale des cacaoyers et des arbres d'ombrage de systèmes agroforestiers de Talamanca au Costa Rica. Pour cela, nous avons construit un modèle explicatif de l'indice d'attaque par les variables de structure spatiale calculées suivant le formalisme des processus ponctuels. La présence dans un même dispositif d'agrégat d'arbres forestiers dans lesquels la germination est favorisée et de zone entre agrégats dans lesquelles la dissémination est favorisée entraînerait à l'échelle du dispositif une augmentation de l'intensité d'attaque. La proximité entre cacaoyers et arbres forestiers sur des distances très courtes diminue l'intensité de l'attaque. La structure spatiale des cacaoyers est régulière de façon homogène dans les dispositifs. Il semblerait que des perturbations de cette régularité diminuerait l'intensité d'attaque du bioagresseur. La compréhension des liens entre caractéristiques structurales des systèmes agroforestiers complexes et les attaques de bioagresseurs pourrait permettre de concevoir des systèmes plus résistants à ces bioagresseurs, et ainsi optimiser les bénéfices agronomiques et écologiques de ces systèmes.

Mots-clés : processus ponctuels, microclimat, model explicatif, bioagresseurs, interactions spatiales.

Abstract

The spatial structure of a stand is defined as the organization of individuals in space. It describes the local biotic environment around every tree, in interaction with the abiotic environment. In complex agrosystems, such as agroforests, spatial structure could thus affect crop yields, particularly through favorable modifications of the microclimate and plant functioning, or by influencing pests and diseases effects (e.g. decrease in host density, barrier effect). We studied the link between the intensity of frosty pod rot attack, a disease of cocoa caused by *Moniliophthora roreri*, and spatial structure of cocoa and forest trees in cocoa agroforestry systems in the Talamanca region, Costa Rica. We wrote an explanatory model of the disease intensity, explain by spatial structure estimated by statistical analysis of spatial point patterns. The presence, in a plot, of clusters of forest trees, in which germination is enhanced, and areas between clusters, in which the spread is enhanced, increases the disease intensity. The proximity between cocoa and forest trees, at very short distances, reduces the disease intensity. Spatial structure of cocoa trees is uniformly regular in plots. It appears that disruption of this regularity reduces the disease intensity. Understanding the links between structural features of complex agroforestry systems and intensity of pests and diseases will allow to take into account spatial organization in the design and management of these complex systems, in order to optimize agronomic and ecological benefits.

Keywords : point patterns, microclimate, explanatory model, pests and diseases, spatial interactions.