Sommaire

Résumés 1
Liste des abréviations 8
Remerciements 9
Introduction 10
1 Contexte de l'étude 11
1.1.1 Le cacaoyer 11
1.1.2 La plante 11
1.1.3 Les systèmes de production 13
1.2 Les bioagresseurs du cacaoyer 14
1.2.1 La moniliose 14
1.2.2 La pourriture brune 18
1.3 Les systèmes agroforestiers tropicaux 22
1.3.1 Définitions et généralités 22
1.3.2 Les services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers 23
1.3.3 La complexité des agroforêts 24
1.4 La structure spatiale des arbres en système agroforestier 24
1.4.1 Définition de la structure spatiale, intérêts et applications 24
1.4.2 Présentation des premiers résultats de l'étude 25
1.4.3 Application au contexte présent : la zone d'Upala 26
1.5 Objectif et hypothèse de l'étude 29
2 Matériel et méthodologie de l'étude 30
2.1 Matériel : la sélection des parcelles 30
2.2 Méthodologie : cartographie des dispositifs 30
2.3 Comptage de cabosses et calcul de l'indice d'attaque 32
2.4 Caractérisation de l'organisation spatiale des individus 33
2.4.1 Caractérisation de la moyenne des environnements locaux 34
2.4.2 Classification ascendante hiérarchique des dispositifs 35
2.4.3 Caractérisation de l'environnement local individuel 36
2.4.4 Modèle linéaire mixte généralisé 36
3 Résultats de l'étude 42
3.1 Résultats obtenus pour un dispositif 42
3.2 Variabilité de l'indice d'attaque au sein des parcelles 46
3.3 Classification ascendant hiérarchique des dispositifs en fonction de la structure spatiale 46
3.4 Résultats à l'échelle individuelle 47
3.4.1 Résultats obtenus pour la moniliose 47
3.4.2 Résultats obtenus pour la pourriture brune 53

4 Discussion liée à l'étude 55
4.1 Avantages et limites de l'étude 55
4.1.1 L'analyse statistique 55
4.1.2 Le comptage et la coupe sanitaire 55
4.1.3 Qualité de l'ombrage ..... **Erreur ! Signet non défini.**
4.2 Discussion générale 55
4.2.1 A l'échelle de l'individu 55
4.3 Discussion à l'échelle de la parcelle 57
5 Perspectives de l'étude 59
Conclusion générale 60
Bibliographie 61
Table des annexes 65

Liste des tableaux

Tableau 1 : Estimation des différentes strates selon la hauteur des arbres..... 32
Tableau 2 : Estimation de la productivité et de l'incidence des maladies pour chaque cacaoyer suivi 33
Tableau 3 : Estimation de la productivité et de l'incidence des maladies pour chaque cacaoyer suivi : exemple d'un dispositif 45

Liste des graphiques

Graphique 1 : Courbe de L(r) du peuplement « cacaoyer » 43
Graphique 2 : Courbe L(r) du peuplement « forestier »..... 44
Graphique 3 : Courbe L(r) du peuplement « fruitier » 45
Graphique 4 : Histogramme de l'incidence de la moniliose et de la pourriture brune par dispositif 46
Graphique 5 : Variation de l'AIC pour le peuplement cacaoyer..... 48
Graphique 6 : Variation de l'AIC pour le peuplement forestier 49
Graphique 7 : Variation de l'AIC pour le peuplement fruitier..... 49
Graphique 8 : Variation de l'AIC pour le peuplement bananier 50
Graphique 9 : Histogramme des résidus du modèle final 53
Graphique 10 : Diagramme Quantile-Quantile des résidus du modèle final 53

Liste des cartes

Carte 1 : localisation de la zone d'étude à l'échelle du pays (Google earth, 2015) 27
Carte 2 : La zone d'étude 27

Liste des figures

Figure 1 : Chérelle (en haut) et fleurs de cacaoyer (en bas). (Curtet, 2015) 12
Figure 2 Cacaoyer en période de production (Curtet, 2015)..... 12
Figure 3 : Symptômes externes (à gauche) et internes (à droite) causés par *M.roreri* (Curtet, 2015)..... 15
Figure 4 : Cycle de vie et mode de propagation de *M.roreri* (Philips-Mora, et al., 2009). 16
Figure 5 : Symptômes externes causés par P.palmivora (Curtet, 2015) 19
Figure 6 : Les différents symptômes et facteurs de propagation de la pourriture brune (Philips-Mora, et al., 2009) 21
Figure 7 : Représentation de la structure spatiale horizontale d'un peuplement réel au semis de point (Goreaud, 2000) 25
Figure 8 : Evolution de l'intensité de la moniliose en fonction de la structure spatiale des forestiers 26
Figure 9 : Diagramme ombrothermique de la zone d'Upala..... 28
Figure 10 : Schéma du dispositif expérimental (repère) 31
Figure 11 : Prise de position d'un cacaoyer 32
Tableau 1 : Estimation des différentes strates selon la hauteur des arbres..... 32
Figure 11 : Schéma du dispositif expérimental pour le comptage 33
Figure 13 : Illustrations des différentes distributions spatiales (régulière, aléatoire et agrégée) d'après Goreaud, 2000 34
Figure 14 : Courbes de L(r) pour les différentes distributions (régulière, aléatoire et agrégée) d'après Goreaud, 2000 35

Figure 15 : Exemple de fonctionnement de la méthode des k-plus proches voisins..... 37
Figure 16 : Exemple d'application de la méthode des k plus proches voisins à l'étude..... 37
Figure 17 : Cartographie du dispositif..... 42
Figure 18 : Cartographie du peuplement des cacaoyers..... 42
Figure 19 : Cartographie du peuplement « forestier »..... 43
Figure 20 : Cartographie du peuplement « fruitier »..... 44
Figure 21 : Dendrogramme des dispositifs cartographiés en fonction de leurs structures spatiales pour la moniliose 47
Figure 22 : Résultats du modèle intermédiaire..... 50
Figure 23 : Résultats complémentaires du modèle intermédiaire 51
Figure 24 : Résultats du modèle final..... 52
Figure 25 : Résultats complémentaires au modèle final 52
Figure 26 : Différents types de semis de cacaoyers : classique (à gauche) et en « pied de poule » (à droite) 57

Liste des abréviations

% pourcent

°C: Degré Celsius

CAH: Classification Ascendante Hiérarchique

CATIE : Centro Agronómico y Técnico de Investigación y Enseñanza

Cf.: confere, se référer à

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

Et al. : Et alii, et autres personnes

Etc. : Et cætera,

Fig. : figure

g : gramme

GLM: Modèle linéaire généralisé é

GLMM : Modèle linéaire mixte généralisé

ha : hectare

kg : kilogramme

pH: potentiel hydrogène

mm : millimètre, unité de précipitation (1mm=1L/m2= 10 m3/ha)

t: tonne

SAF : systèmes agroforestiers

Remerciements

Je tiens à remercier ma maitre de stage Marie-Ange Ngo Bieng pour m'avoir accueillie et m'avoir permis de réaliser ce stage au sein du Cirad. Merci pour ta bonne humeur, ta patience, tes précieux conseils et ton soutien tout au long de mon travail.

Je souhaite également remercier Philipe Tixier pour sa disponibilité et ses conseils avisés en statistiques qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Merci à l'ensemble de l'équipe du Cirad présente au CATIE pour sa sympathie durant ces six mois.

Un très grand merci à l'ensemble des producteurs d'Upala pour leur disponibilité, leur gentillesse, et leur accueil chaleureux. Je remercie tout particulièrement nos techniciens Shayrus et Evry pour leur excellent travail, leur compagnie et leur amitié.

Merci à Mariela Leandro, doctorante au CATIE pour ses conseils lors de mes recherches bibliographiques.

Merci à mon tuteur Patrice Rey pour son aide et son avis durant ces six mois.

Un immense merci à ma binôme de stage Laudine Alem, pour tous ces moments passés en ta compagnie. Tu es une merveilleuse collègue, colocataire et amie. Mon seul regret est de ne pas pouvoir me fier à ton sens de l'orientation.

Merci à Sorayda, Fernanda, Carlos, Sébastian et Valentina pour leur accueil et leur affection. Vous êtes une famille fantastique !

Merci à Peter pour ses précieuses relectures et son aide lors de la rédaction.

Enfin merci infiniment à ma famille et mes parents pour leur éternel soutien.

Introduction

La production mondiale de cacao s'élève à quatre millions de tonnes par an. Assurée à 95% par de petits producteurs dont les exploitations familiales font moins de 10ha, elle est la base de diverses industries : chocolatières ou cosmétiques (Barrel, et al., 2009). Aujourd'hui le cacao est de plus en plus consommé dans le monde et l'offre peine à combler la demande. On estime que y faire face, on devra produire 1 million de tonnes supplémentaires d'ici 2020. Or aujourd'hui, la production de cacao est freinée par deux facteurs : les conditions climatiques défavorables et les maladies ; c'est à ce dernier élément que l'on s'intéressera (Jagoret, et al., 2014).

Les maladies et ravageurs de cultures du cacaoyer sont nombreux : maladie du balai de sorcière, le swollen shoot, la pourriture brune, la moniliose, etc. Parmi celles-ci, la moniliose et la pourriture brune sont responsables des principales pertes de la production cacaoyère du Costa Rica. Actuellement, les producteurs ne disposent d'aucun moyen de lutte efficace contre ces deux maladies fongiques.

Cette étude s'inscrit dans un cadre de régulation agroécologique. Le Cirad propose de s'intéresser à la variation du voisinage des cacaoyers dans les agroforêts d'Upala. L'objectif de cette étude est de déterminer quelle peut être l'influence de la variation du voisinage sur l'indice d'attaque de ces deux maladies.

Ainsi, après avoir présenté le contexte et les éléments méthodologiques nécessaires à la compréhension de l'étude, nous caractériserons l'environnement local du cacaoyer. A travers nos analyses, nous montrerons quels sont les éléments influençant l'indice d'attaque de la moniliose et de la pourriture brune

Rapport-Gratuit.com

1 Contexte de l'étude

Cette première section a pour but d'introduire le contexte dans lequel se situe notre étude. Dans un premier temps, nous présenterons des éléments botaniques essentiels de la plante. On se focalisera ensuite sur les deux maladies étudiées : la moniliose et la pourriture brune. Dans une troisième partie, nous verrons les agroforêts à cacaoyer, agrosystèmes complexes adoptés par les petits producteurs de cacao. Nous évoquerons alors les principaux services écosystémiques associés à la complexité de ces agroforêts. Enfin, nous introduirons plus spécifiquement l'objectif de notre étude : montrer comment la structure spatiale des agroforêts joue un rôle dans le service de régulation agroécologique des bioagresseurs du cacaoyer. Notre étude est appliquée aux agroforêts à cacaoyer de la zone d'Upala, au Costa Rica.

1.1.1 Le cacaoyer

Le cacaoyer cultivé, dont le nom botanique est *Theobroma cacao L.*, est un arbre de sous-bois originaire des forêts tropicales humides d'Amérique latine et centrale. Il appartient à désormais à la famille des Malvaceae (Phillips-Mora, et al., 2007). Sur les vingt-deux espèces du genre *Theobroma*, seule *T.cacao* est une culture commerciale. Le cacaoyer est cultivé entre des latitudes de 20° Nord et Sud et peut pousser jusqu'à 1000m d'altitude sous l'équateur. Il atteint son plein développement vers l'âge de dix ans. Cependant il est productif bien avant cet âge puisque les fleurs et les fruits apparaissent dès sa troisième ou quatrième année. Le rendement optimum est généralement atteint vers six ou sept ans (Mossu, 1990). Il produit en moyenne jusqu'à 30 ans mais il peut être exploité bien plus longtemps. Il peut vivre plus de 80 ans (Barrel, et al., 2009).

1.1.2 La plante

Variabilité génétique de T.cacao

Il existe 3 grands groupes de cacaoyer: Criollo, Forestano et Trinitario.

Le Criollo qui signifie «local » en espagnol et dont les fruits sont généralement verts puis rouge, représente 1% du commerce mondial. Il rassemble les cacaoyers qui sont domestiqués depuis très longtemps et qui fournissent du cacao aux arômes très recherchés. On les croise encore dans de vieilles plantations mais ils ont été délaissés car ils sont très sensibles aux maladies dont la moniliose et la pourriture brune et ont une croissance lente. Le groupe Forastero plus diversifié que le précédent représente 80% de la production mondiale actuelle. Ces cacaoyers se retrouvent donc très majoritairement dans les plantations des principaux pays producteurs. Ils possèdent des fruits verts qui jaunissent à maturité et dont les fèves sont plus ou moins aplaties. Ses qualités gustatives sont reconnues. Enfin, le Trinitario rassemble les hybrides issus des croisements entre les deux groupes précédents. Il présente des types très diversifiés et hétérogènes. On le retrouve aussi dans les principaux pays producteurs puisqu'il représente environ 20% du commerce mondial. Le Trinitario fournit un cacao de qualité intermédiaire (Mossu, 1990) (Barrel, et al., 2009).

De manière générale, on estime que 70% des cacaoyers cultivés appartiennent à des populations peu ou pas sélectionnées. L'autre partie vient de variétés hybrides sélectionnées et issues d'un croisement inter-groupe. Les critères de sélection se basent sur la qualité mais surtout sur la productivité et la résistance aux maladies. On note aussi que 5% des variétés seraient clonales (Barrel, et al., 2009).

Figure 1 : Chérelle (en haut) et fleurs de cacaoyer (en bas). (Curtet, 2015)

Figure 2 Cacaoyer en période de production (Curtet, 2015)

Eléments de physiologie de la plante

Nous présentons ici quelques caractères physiologiques du cacaoyer.

On observe généralement la première floraison vers la troisième ou quatrième année après la germination même si elle peut se produire dès la deuxième année pour les arbres très précoces. Généralement, les cacaoyers d'une même plantation ont leurs périodes de floraison synchrones. Même s'il y a des fleurs toute l'année, on distingue tout de même deux pics de floraisons marqués par an (Mossu, 1990). Le cacaoyer produit donc toute l'année mais il existe cependant deux pics de production que l'on appellera récolte intermédiaire et récolte principale (CNUCED;OMC, 2001). Ces deux pics ont lieu en juin-juillet pour la production intermédiaire et novembre-décembre pour la principale.

A début de son développement, le fruit est appelé « chérelle ». C'est lorsqu'il a atteint sa taille définitive après 5 à 6 mois que l'on parle de cabosse. Il est important de mentionner que indépendamment des maladies, la perte des chérelles peut être due à un dessèchement sur l'arbre. Ce phénomène est une sorte de mécanisme physiologique de régulation de la fructification et peut affecter 20 à 90% des chérelles formés (Mossu, 1990).

Les caractères des cabosses c'est-à-dire la forme, la taille et la couleur sont extrêmement variables selon le génotype. Le poids du fuit oscille entre les variétés. Une cabosse pèse en moyenne 400 à 500 g et contient 100 à 120 graines ce qui donnera une production de 35 à 40 g de cacao marchand (Barrel, et al., 2009).

Ecologie de T.cacao

De nombreux facteurs écologiques interviennent pour que la croissance, la floraison et la fructification du cacaoyer soit optimale et régulière. De par la complexité de leurs interactions, il est difficile de connaitre exactement l'influence de chacun (Mossu, 1990).

Pour que le cacaoyer soit productif, la température doit être comprise entre 20 et 32°C avec un optimum de 25°C. Le minimum absolu requis est de 10°C. En dessous la plante stoppe sa croissance (Mossu, 1990).

La pluviométrie est un facteur écologique très important car il peut affecter les rendements d'une année sur l'autre. Comme le cacaoyer est une plante relativement sensible

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

au déficit hydrique, les pluies doivent être abondantes (1500-2000mm/an) et réparties sur la totalité de l'année. Si ce n'est pas le cas, il peut entrer en concurrence avec d'autre plantes (d'ombrage ou adventices). Cependant, le cacaoyer tolère une saison sèche à condition qu'elle ne dure pas plus de 3 mois (Mossu, 1990) (Barrel, et al., 2009).

Pour son bon développement, le cacaoyer a donc besoin d'une atmosphère chaude et humide. Par conséquent, l'humidité relative est généralement élevée : environ 70-80% la journée et atteint 100% la nuit. Pour préserver cette humidité atmosphérique il est important de protéger la plantation du vent (brise-vent, arbres d'ombrages etc.) (Mossu, 1990).

Comme nous l'avons précisé précédemment, le cacaoyer est un arbuste de sous-bois, c'est pourquoi il est cultivé traditionnellement sous ombrage (naturel ou artificiel). Un ombrage provisoire et relativement dense est indispensable pendant les trois premières années de croissance. Il ne doit pas laisser passer plus de 50% de la luminosité. Cependant, le cacaoyer est par la suite capable de s'adapter aux différentes conditions de lumières. Il peut croître sous un ombrage très dense à condition que la température avoisine les 32°C. En revanche, il a été montré que l'ombrage devient un facteur limitant à la production dans le cas où tous les autres facteurs écologiques sont extrêmement favorables. Le maintien ou non de l'ombrage est un choix qui doit être fait en fonction des conditions climatiques et des moyens économiques dont dispose le producteur : apport d'engrais ou d'insecticides par exemple. Rappelons, qu'un ombrage permanent permet de limiter les besoins et par conséquent assure une production plus régulière malgré des rendements moins importants qu'en plein soleil : la pression parasitaire est plus intense en plein soleil (Mossu, 1990) (Barrel, et al., 2009).

Enfin, le sol est aussi un élément important à prendre en compte dans la production de la plante. Le bon développement du cacaoyer nécessite un sol qui assure une bonne rétention de l'eau, légèrement acide (pH entre 5,5 et 7) ainsi qu'une teneur en matière organique élevée (Barrel, et al., 2009).

1.1.3 Les systèmes de production

La cacaoculture est la principale source de revenu de 5 à 6 millions de petits producteurs dans le monde. Les superficies de leurs exploitations sont en général comprises entre 2 et 10 ha. Les rendements moyens sont très variables mais ils atteignent en moyenne 350 kg/ha (Jagoret, et al., 2015). Les systèmes de production de cacao sont multiples et vont de la monoculture, et plantations à ombrage léger jusqu'aux systèmes agroforestiers (SAF) complexes (Jagoret, et al., 2014) (Deheuvels, 2011).

Dans le modèle intensif, on applique le principe de monoculture suite à une défriche totale d'une parcelle forestière. Les plantations maintiennent de bons rendements durant les vingt premières années puis la production s'effondre car le sol s'appauvrit. Dans ces systèmes intensifs, les producteurs n'ont ni les moyens, ni le savoir faire pour appliquer des produits phytosanitaires et fertiliser leurs sols. La durée de vie de ces exploitations est de 20 à 30 ans. Les producteurs vont ensuite installer de nouvelles parcelles sur une zone forestière défrichée (Jagoret, et al., 2014). Ce modèle peu durable est retrouvé dans une grande partie des pays producteurs de cacao comme la Côte d'Ivoire (Jagoret, 2011).

La cacaoculture sous SAF propose un modèle plus diversifié qui apporte des rendements satisfaisants tout en diminuant la consommation d'intrants. La durée de vie des parcelles agroforestières peut dépasser cinquante ans car l'association d'espèces fruitières et forestières contribue au maintien du sol en réduisant l'érosion et en maintenant sa fertilité (Jagoret, et al., 2014). L'Amérique centrale est à ce titre un exemple où les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers sont associés à plusieurs dizaines d'espèces ligneuses et non ligneuses (Deheuvels, 2011).

Nous avons donc rappelé les éléments agronomiques liés à la plante et aux systèmes de production. La partie suivante portera sur les bioagresseurs du cacaoyer. Cette plante est soumise à de nombreux ravageurs, virus et maladies. On se focalisera sur deux maladies fongiques, importantes dans notre zone d'étude.

1.2 Les bioagresseurs du cacaoyer

1.2.1 La moniliose

La moniliose est une maladie causée par le pathogène *Moniliophthora roreri*. Ce champignon est un basidiomycète de l'ordre des Agariscales et appartenant à la famille des Marasmiaceae. Il attaque les fruits de l'espèce *Theobroma* dont *T .cacao* (Aime, et al., 2005) (Phillips-Mora, 2003). Les premières traces de moniliose remontent à 1851 en Colombie (Phillips-Mora, et al., 2007). Aujourd'hui elle est présente dans de nombreux pays d'Amérique latine comme au Venezuela et plus récemment en Amérique centrale, puisqu'elle n'a été signalée au Costa Rica qu'en 1978 et au Mexique en 2005 (González, et al., 2008). Les pertes causées par *M.roreri* sont peu importantes à l'échelle mondiale, car cette maladie est absente des principaux pays producteurs de cacao. Cependant, elle reste le principal facteur limitant de la production dans de nombreux pays d'Amérique comme au Costa Rica (Ploetz, 2007) (Mariau, 1999). A l'échelle de la parcelle, on estime en moyenne une perte de récolte de 30% mais on peut atteindre 100% lorsque les conditions de développement de *M.roreri* sont favorables (Phillips-Mora, et al., 2007). Nous détaillerons dans cette partie les principaux symptômes ainsi que le cycle de développement de *M. roreri*.

Symptômes

Les symptômes causés par *M.roreri* sont observés sur les fruits de *T.cacao*. Il existe une multitude de symptômes qui varient selon l'âge de la cabosse.

Les cabosses âgées de moins de 2 mois sont plus susceptibles d'être touchées par la maladie et le délai d'incubation est de 40 jours. Les premiers symptômes sur les cabosses relativement jeunes sont l'apparition de point huileux et la déformation de la cabosse. Des lésions et des tâches de couleur brun-café vont envahir la surface du fruit causant des nécroses. Au bout de 3-5 jours, on observe la formation d'un tapis blanc-crème qui va libérer des spores. A l'intérieur du fruit, les fèves se nécrosent et forment une masse compacte (End, et al., 2014). A l'extérieur, la cabosse est momifiée. On compte alors 7 à 43 millions de spores par centimètres carré, ce qui est amplement suffisant pour la dispersion de la maladie. Pour les cabosses âgées de plus de 2 mois, le délai d'incubation est plus long (60 jours) et les premiers symptômes se manifestent par l'apparition de tâches sur le fruit. A ce stade, l'infection se limite à de la pourriture sur la coque et n'atteint pas ou peu les fèves. Les cabosses sont le plus souvent viables en termes de récolte (Thévenin, et al., 1996) (Sánchez Mora, et al., 2012).

A toutes les phases de développement de la maladie, il existe des symptômes internes et externes. Les dégâts externes se résument à une déformation, des nécroses, et une pourriture de la cabosse. Cependant sur certains fruits âgés de 60 à 80 jours, il est possible de ne pas observer de dommages externes, alors que les tissus internes sont nécrosés. Ils vont former avec la pulpe et les semences une masse compacte entourée par une substance aqueuse. Ceci entraine la destruction intégrale des fèves et donc la mort du fruit. Un autre symptôme parfois observé est la maturation prématurée du fruit. La cabosse va alors changer de couleur et prendre l'apparence d'un fruit mûr mais qui en réalité ne l'est pas (Sánchez Mora, et al., 2012).

Figure 3 : Symptômes externes (à gauche) et internes (à droite) causés par *M.roreri* (Curtet, 2015)

Cycle de vie de M.roreri

Le fruit est la principale source d'inoculum de *M.roreri*. Aujourd'hui encore, la forme de reproduction de ce pathogène n'est pas parfaitement connue. Nous savons cependant que ce champignon est hémibiotrophe c'est-à-dire qu'il infecte les tissus vivant du fruit et qu'il va poursuivre son développement dans les tissus morts (Thévenin, et al., 1996) (Carion, 2014). Sa reproduction asexuée est la seule structure connue actuellement et est capable de causer l'infection (Sánchez Mora, et al., 2012). Son cycle se distingue par deux phases principales:

- La première est la phase biotrophique qui rassemble les étapes de germination des conidies et l'invasion intercellulaire de l'épiderme des cabosses. Les conidies qui se sont déposées sur le fruit vont germer (selon des conditions favorables) et pénétrer dans la coque du fruit. Elles se développent entre les cellules à la fois dans les parties interne et externe du fruit.

- La phase suivante correspond à la phase abiotrophique ou nécrotique.de l'apparition des premiers symptômes externes à la sporulation et à la dissémination. A cette étape, *M.roreri* envahit les cellules et provoque les premières nécroses. Ensuite les spores se développent à la surface du fruit et se disséminent (Thévenin, et al., 1996).

La période d'incubation de ce pathogène, avant l'apparition des premiers symptômes est relativement longue. Cette période varie de 3 à 8 semaines, et selon plusieurs critères : intensité d'attaque de la maladie, âge du fruit, sensibilité de l'arbre, ainsi que les conditions climatiques que nous allons détailler dans la section suivante (Sánchez Mora, et al., 2012).

Conditions de développement

M.roreri est d'autant plus dangereux pour la production de cacao qu'il est capable de s'adapter à des conditions climatiques très variées. En effet, il peut évoluer dans de larges gammes de température (18.6 à 28°C) et de précipitation (780mm à 5,500mm). Il est également présent dans un large panel d'altitudes, allant du niveau de la mer jusqu'à plus de 1000m (Phillips-Mora, et al., 2007). Il est important de noter que les conditions de développement de *M.roreri* sont similaires à celles de la culture du cacaoyer.

Il a été montré que l'humidité relative et la température sont des facteurs qui influencent les phases du cycle de vie du champignon. Une humidité relative élevée (93%) et une température relativement basse (22°C) favorisent la germination et la pénétration des conidies dans le fruit. Ceci correspond à la phase biotrophique de *M.roreri*. En revanche, la libération et la dispersion des spores (phase nécrotique) sont favorisées par une humidité relative plus basse (71-74%) et une température aux alentours de 26 °C (Sánchez Mora, et al.,

2012). Le cycle de la maladie est donc dépendant des conditions microclimatiques dans une parcelle.

En plus des conditions climatiques, les autres facteurs qui influencent le développement de la maladie sont la durée de présence de la maladie sur le site, l'âge de la plantation (car les vieux arbres ont tendance à être plus sensibles à *M.roreri*), la conduite de la parcelle, notamment au niveau de la gestion des maladies. La santé des parcelles voisines est aussi un facteur important si l'on veut minimiser les risques de dissémination du pathogène. Ces modes de propagation sont détaillés dans la partie suivante (Thévenin, et al., 1996).

Facteurs de dissémination de la maladie

Il existe plusieurs facteurs de dissémination de *M.roreri.*

L'eau ou plus précisément les éclaboussures des gouttes de pluies, sont susceptibles de former de petits nuages de spores pouvant contaminer les cabosses voisines. Le ruissèlement de l'eau, en particulier sur le tronc, entraine également une contamination des cabosses présentes sur celui-ci. Cependant, l'eau reste un facteur de dissémination de proche en proche .Le vent est le principal mode de propagation des spores sur de plus longues distances (jusqu'à 30m pour des cabosses situées à 2m de hauteur) (Thévenin, et al., 1996). Quant aux insectes et aux animaux (singes, écureuils), ils peuvent participer à la dissémination de la maladie par la présence de spores sur leurs corps ou dans leurs tractus digestifs, mais ce mode de dispersion reste marginal. En revanche, l'activité humaine, par le transport de matériel végétal contaminé est une source de propagation très importante. En effet, c'est certainement par ce moyen que *M. roreri* a franchi les barrières géographiques. Ce champignon ayant une longue période d'incubation, les cabosses contaminées et paraissant encore saines ont pu être déplacées et ainsi contaminer d'autres espaces jusqu'alors saines (Phillips-Mora, 2003).

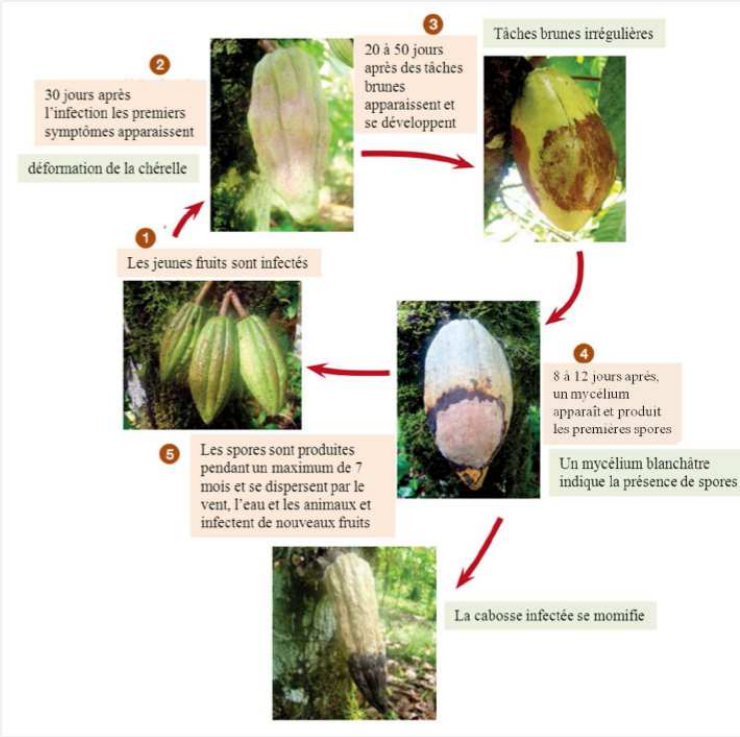


Figure 4 : Cycle de vie et mode de propagation de *M.roreri* (Philips-Mora, et al., 2009).

Méthodes de luttes existantes

La prévention est la meilleure des stratégies pour lutter contre cette maladie dans les zones qui ne sont pas encore contaminées (Phillips-Mora, et al., 2007). De manière générale, on recommande des pratiques culturales classiques comme un bon drainage, une densité d'arbres appropriée, une fertilisation correcte, un élagage régulier, un contrôle des mauvaises herbes, etc. Ces pratiques optimisent le développement du cacaoyer, ce qui crée pour le pathogène des difficultés à s'établir dans la parcelle. Ces méthodes de lutte sont préventives. Dans le cas où *M.roreri* est installé, les pratiques culturales évoquées précédemment contribuent à réduire l'intensité d'attaque (Sánchez Mora, et al., 2012).

- Techniques culturales

La méthode de contrôle la plus recommandée est la récolte sanitaire des fruits malades. Les cabosses présentant des signes d'infection sont ramassées dans les premières heures de la matinée ou en fin d'après midi (après 16h) car l'humidité relative ne favorise pas une libération des spores. La récolte des fruits infectés doit se faire dans sa globalité et efficacement, pour éviter que des cabosses oubliées disséminent les spores (Sánchez Mora, et al., 2012). Après la récolte sanitaire, les cabosses atteintes par la moniliose peuvent être laissées sur la parcelle car le champignon perd vite son pouvoir infectieux. De plus le déglacement des fruits infectés est déconseillé car il peut entrainer une dispersion des spores (Thévenin, et al., 1996).

Il est recommandé d'effectuer une récolte ou coupe sanitaire régulière pour limiter la sporulation sur les cabosses. Une récolte sanitaire hebdomadaire est considérée comme plus efficace qu'une récolte sanitaire mensuelle ou bi-mensuelle. Une coupe bi-hebdomadaire serait plus efficace encore pour faire baisser l'incidence de moniliose, mais elle est considérée comme moins rentable pour le producteur. En effet, ce moyen de lutte demande beaucoup de travail et de main d'œuvre (Phillips-Mora, et al., 2007). De manière générale, la coupe sanitaire est effectuée au même moment que la récolte (Thévenin, et al., 1996).

La deuxième méthode de lutte culturale envisagée est la modification du microclimat afin de créer des conditions défavorables au développement de *M.roreri.* Il s'agit par exemple de limiter la stagnation de l'eau et d'abaisser suffisamment l'humidité relative en drainant le sol de façon superficielle. Il s'agit également de faciliter la circulation de l'air, en désherbant la parcelle, taillant régulièrement les cacaoyers et en régulant l'ombrage. Ceci favorisera une bonne pénétration de la lumière et l'évacuation de l'humidité (Thévenin, et al., 1996) (Phillips-Mora, et al., 2007).

Une taille régulière des cacaoyers permet également de réduire l'auto-ombrage, donc la création d'un microclimat sous l'arbre qui favoriserait la propagation de la moniliose.

- Lutte chimique

Les fongicides de contact utilisés pour lutter contre *M.roreri* permettent de réduire le nombre de cabosses touchées. Cependant, il est difficile de les appliquer efficacement de part l'architecture des cacaoyers et la répartition des cabosses sur l'arbre. Les applications de fongicides se font pendant la saison des pluies (ce qui correspond à la période de production). Le fongicide est alors lessivé par les précipitations. Tous ces facteurs rendent la lutte chimique partiellement efficace. D'un point de vue économique, cette méthode n'est pas adaptée pour les producteurs, car les coûts d'application sont élevés et non rentables pour des parcelles avec de faibles surfaces de production et des rendements limités ; ce qui correspond à la majorité des producteurs d'Amérique centrale. Enfin, il faudrait traiter au moment des

pics de production, soit deux fois par an, ce qui est d'autant plus coûteux (Thévenin, et al., 1996).

- Lutte biologique

À l'heure actuelle, ce type de contrôle ne permet pas de lutter efficacement contre *M.roreri* même si les études avec des microparasites sont très prometteuses comme c'est le cas au Pérou, avec *Trichodermasp, Clonostachysrosea* et *Clonostachysbyssicola* (Sánchez Mora, et al., 2012).

- Lutte génétique

L'amélioration génétique est une voie prometteuse dans la lutte à long terme contre *M.roreri* (Phillips-Mora, et al., 2007). Depuis une dizaine d'années, le CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) travaille sur la création de clones tolérants et résistants à *M.roreri*. Les premiers clones ont fait leur apparition sur le marché et dans les parcelles des producteurs en 2007 (Phillips-Mora, et al., 2007). On distingue aujourd'hui six clones commercialisés à travers l'Amérique centrale que l'on peut classer en deux groupes :

- Le premier rassemble les clones du CATIE (CATIE-R1, CATIE-R4 et CATIE-R6) pour lesquels les pertes sont inférieures à 25%. En particulier pour le CATIE-R6 qui enregistre des pertes de moins de 10%.
- Le second groupe réunit les clones CC-137, ICS-95 T1et PMCT-58 qui ont des pertes inférieures à 30% mais il a été observé les deux dernières années une forte augmentation de l'incidence de la maladie sur ces clones.

D'un point de vue pratique, il est recommandé de mélanger les variétés clonales sur une même parcelle afin de créer un effet compensatoire entre les clones plus ou moins résistants à *M.roreri*. Ceci permet de réduire la dissémination et le développement de la maladie (Phillips-Mora, et al., 2012). La lutte génétique est d'autant plus efficace si elle est couplée avec d'autres moyens de lutte.

Certains clones (CATIE-R4 et CATIE-R6) présentent des qualités gustatives intéressantes (sélectionnées comme « cacao d'excellence » au salon du chocolat de Paris en 2009), cependant d'un point de vue économique, installer des clones représente un coût d'investissement pour les producteurs. De plus, le développement des clones est récent, et leurs caractéristiques (production, résistances aux bioagresseurs etc.) ont été analysées sur dix ans seulement et il serait intéressant de les analyser sur la durée potentielle de production d'un cacaoyer (soit de 40 à 50 ans).

De plus, bien qu'ils soient intéressants en terme de rendement à court terme, ils nécessitent un apport régulier de fertilisants, contrairement aux cacaoyers issus de semences locales ; ce qui demande un investissement supplémentaire des producteurs (Phillips-Mora, et al., 2012) (Phillips-Mora, et al., 2014).

1.2.2 La pourriture brune

Généralités

La pourriture brune est une maladie fongique causée par le pathogène *Phytophthora*. Ce champignon est un oomycète appartenant à la famille des Phytiaceae et de l'ordre des Peronosporales (Cooke, et al., 2000). Originaire d'Asie et plus ancien que *M.roreri*, il est identifié pour la première fois en 1907. Aujourd'hui on compte une soixantaine d'espèces de *Phytophtora*, qui touchent environ 150 plantes tropicales comme le cocotier, le durian et la papaye (Cooke, et al., 2000) (Widmer, 2014). Plusieurs espèces de *Phytophtora* touchent le

cacaoyer en fonction de la zone géographique. Si cette maladie cause les pertes les plus importantes au niveau mondial, c'est en raison des nombreuses espèces pathogènes existantes dans toutes les zones productrices du monde, dont *Phytophtora megakarya*, qui est la forme la plus agressive et uniquement présente en Afrique de l'Ouest (Ploetz, 2006). La virulence plus importante de *P.megakarya* comparée à *P.palmivora* que l'on trouve au Costa Rica est liée à sa sporulation plus dense à la surface de la cabosse, donc à une augmentation significative de la charge d'inoculum (Ploetz, 2006). A l'échelle mondiale, la pourriture brune est la plus grosse contrainte de la production cacaoyère puisqu'elle peut causer jusqu'à 20 à 25% de pertes de la production attendue (Evans, 2007). Au Costa Rica, les pertes causées par *P.palmivora* sont moindres. Nous nous focaliserons dans ce travail sur *P.palmivora* pour lequel nous décrirons les principaux symptômes, son cycle de vie, ses conditions de développement ainsi que les méthodes de luttes existantes.

Symptômes

La maladie touche généralement les fruits mais peut aussi infecter les fleurs, et causer le cancer du tronc (lésions dans le bois), qui diminue la vigueur de l'arbre et affecte sa capacité de production. Dans notre cas, nous nous intéresserons uniquement aux symptômes liés au fruit,ceux-ci étant les plus courants. Le symptôme le plus commun de ce pathogène est l'apparition de petites tâches brunes à l'une des extrémités (inférieures ou supérieures) du fruit. Les lésions vont alors grandir et les tâches noires vont s'étendre rapidement jusqu'à recouvrir la totalité de la surface de la cabosse. Des spores vont se développer à la surface du fruit qui va aussi se dessécher. Dans le même temps, le pathogène se développe dans les tissus internes et cause des lésions qui rendent inutilisables les fèves en une quinzaine de jours. A la surface du fruit les spores vont se développer et former une cabosse dite « momifiée » (Guest, 2007) (Widmer, 2014).

Figure 5 : Symptômes externes causés par P.palmivora (Curtet, 2015)

Cycle de vie de P.palmivora

Le cycle de vie de *P.palmivora* serait généralement asexué. C'est pendant cette phase que ce pathogène se reproduit sous forme de zoospores qui, après germination, produiront des sporophytes entre quatre et cinq jours après l'infection, pouvant arriver à maturité en quelques minutes au contact de l'eau libre. Lorsque les conditions sont défavorables, le champignon peut produire des chlamydospores qui germeront quand les conditions favorables se présenteront. C'est cette phase asexuée qui marque le début de l'attaque parasitaire (Cilas, 2004).

Conditions de développement

Il y a plusieurs facteurs susceptibles d'influencer les conditions de développement de *P.palmivora*, essentiellement liés aux conditions édapho-climatiques. En effet, la pluie et l'humidité relative sont favorables au développement de la maladie. Il a été montré que la sporulation est encouragée par une forte humidité relative. Plus généralement, en condition humide, une seule cabosse est capable de produire 4 millions de spores. C'est aussi avec l'humidité que les sporanges se transforment en zoospores. Celles-ci ont besoin de 20-30 min dans l'eau libre et à la surface de la plante pour s'enkyster, germer et pénétrer dans les tissus libres. C'est principalement pour cette raison que le pic d'épidémie coïncide avec la saison des pluies (Cilas, 2004).

La température et la lumière ont aussi des effets sur le cycle de *P.palmivora*. Le pathogène est capable de se développer entre 11°C et 30°C. L'optimum de température de la phase sexuelle est de 20°C[1] et l'optimum de température de la phase asexuée se situe entre 27,5°C et 30°C (Brasier, 1969) (Widmer, 2014).

Facteurs de dissémination de la maladie et source d'inoculum

Les spores à la surface des cabosses malades se propagent principalement par l'eau de pluie. Elle transporte les spores par écoulement, du haut en bas de l'arbre, ou bien de bas en haut par « effet splash », grâce à l'énergie cinétique des gouttes. Elles peuvent aussi être transmises par contact entre cabosses ou bien par le biais du vent, même si cela reste négligeable. Les fourmis seraient également un vecteur de propagation (Erwin, et al., 1983) (End, et al., 2014).

Notons aussi que, comme pour la moniliose, les activités humaines par le commerce de pépinière ou le transport de matériel végétal malade sont aussi des vecteurs de propagation de *P.palmivora* (End, et al., 2014).

Au-delà des facteurs de dissémination, *P.palmivora* a une capacité de survie grâce à la production de chlamydospores. Ce pathogène peut donc rester dans le sol durant 10 mois (selon la couverture du sol). Le mycélium et les chlamydosposres sont capables de survivre dans le matériel végétal infecté, les racines ou les cabosses momifiées (Guest, 2007).

Pour lutter efficacement contre la pourriture brune, il faut donc prendre en compte en plus de son cycle de vie et de ses facteurs de dissémination, sa capacité à survivre en saison sèche sur la parcelle. Cette dernière est une difficulté supplémentaire dans la lutte contre *P.palmivora*.

[1] En conditions in vitro

Rapport-Gratuit.com

Figure 6 : Les différents symptômes et facteurs de propagation de la pourriture brune (Philips-Mora, et al., 2009)

Méthodes de luttes existantes

Comme P.palmivora cause peu de dommages, la mise en place de méthode de lutte n'est pas systématique. Il existe cependant plusieurs moyens de contrôle existants.

- Contrôle par les pratiques culturales

La lutte culturale rassemble plusieurs techniques dont la coupe sanitaire des cabosses malades et la densité de semis de cacaoyers. En effet, la récolte sanitaire bimensuelle ou hebdomadaire peut réduire la pourriture brune de 35 à 66 % (Krauss, et al., 2002). En revanche le faible espacement des pieds de cacaoyers, un feuillage épais et un climat très humide contribuent au développement du pathogène. Au Ghana, il a été observé une réduction de la pourriture brune de 12,4% à 5,2% en diminuant la densité de semis de 8x8 pieds[2] à 12x12 pieds (Erwin, et al., 1996). On a également observé que les pratiques culturales comme la taille des arbres, le contrôle de la couverture du sol et la fréquence de récolte avaient un impact efficace sur le développement de la maladie.

- Lutte chimique

Comme pour la moniliose, la lutte chimique fait face aux mêmes contraintes. La période de production étant en saison des pluies, les fongicides appliqués sont lessivés et donc partiellement efficaces. De plus, comme le fruit est sensible à la maladie à tous ses stades de développement, il est nécessaire de faire des interventions répétées. C'est donc une opération coûteuse en temps et en main d'œuvre, peu rentable pour les petites exploitations (Brooks, 2005) (Muller, 1973).

[2] 1 pied = 0,3048 mètre

- Lutte biologique

Le contrôle biologique par des bactéries ou des champignons est en cours de développement (Brooks, 2005). Cependant, la complexité de la maladie, son cycle de vie court, la mobilité de ses spores ainsi que sa capacité de reproduction rendent le contrôle biologique difficile à appliquer (Guest, 2007).

- Lutte génétique

La lutte génétique reste une perspective efficace pour lutter sur le long terme contre la pourriture brune. Les clones développés par le CATIE sont résistants à la pourriture brune (CATIE R1, CATIE R4, CATIE R6, CC-137, ICS-95 T1, PMCT-58); et présentent des taux d'infection de *P.palmivora* inférieurs à 7% (Phillips-Mora, et al., 2012).

Pour la moniliose comme pour la pourriture, il n'existe à l'heure actuelle aucun moyen permettant de lutter à 100% contre ces deux maladies et les dégâts qu'elles causent impactent lourdement la production.

Après avoir présenté la plante et les bioagresseurs liés à l'étude, nous allons, dans la section suivante, présenter les SAF. C'est le système de production appliqué par les producteurs de la zone d'Upala. Nous donnerons dans un premier temps des généralités sur ces systèmes, et nous nous focaliserons sur les différents services écosystémiques apportés par ces SAF, notamment le service qui nous intéresse dans le cadre de ce travail : la régulation des bioagresseurs.

1.3 Les systèmes agroforestiers tropicaux

1.3.1 Définitions et généralités

L'agroforesterie est une pratique omniprésente dans les pays tropicaux, qui y est ancrée depuis le début de l'agriculture. L'agroforesterie devient un enjeu rural et suscite un intérêt scientifique à partir de 1970 (Torquebiau, 2007). Ce concept très large est défini de nombreuses façons plus ou moins complexes. Parmi les différentes versions existantes, la définition du Word Agroforestry Centre est l'une des plus couramment utilisées : « L'*agroforesterie est un système dynamique de gestion des ressources naturelles reposant sur des fondements écologiques qui intègre des arbres dans les exploitations agricoles et le paysage rural et permet ainsi de diversifier et maintenir la production afin d'améliorer les conditions sociales, économiques et environnementales de l'ensemble des utilisateurs de la terre.* » (AFAF, 2014). Cette définition assez complète présente les avantages de cette pratique en appuyant sur l'aspect de gestion des ressources mais aussi des bénéfices socio-économiques et environnementaux. La seconde définition permettra d'insister sur l'enjeu agricole et précise cette idée de « fondements écologiques » en appelant la notion de services. *«L'agroforesterie est une mise en valeur du sol par l'association simultanée ou séquentielle de ligneux et de cultures saisonnières ou d'animaux, afin d'obtenir des produits ou des services utiles à l'homme»* (Torquebiau, 2000).

Par cette définition on comprend que l'agroforesterie est basée sur au moins deux composantes principales qui sont, la culture et l'arbre. Même si elle est présente dans les zones tempérées, c'est sous les tropiques que les SAF sont les plus courants car l'agriculture tropicale se prête plus facilement aux associations de cultures. On peut aisément comprendre, qu'il en ressort une multitude de combinaison de SAF de par la diversité des arbres et des cultures de ces régions. Plusieurs classifications de ces systèmes ont été établies au cours de

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

ces dernières années mais la tâche est complexe. Nous nous baserons sur la classification de Toquebiau qui a décliné en plusieurs catégories ces systèmes : Les cultures sous couverts arborés, les agroforêts, l'agroforesterie en disposition linéaire, animale et séquentielles (Torquebiau, 2007). Parmi celles-ci, nous étudierons plus précisément le cas des agroforêts.

La principale caractéristique d'une agroforêt est sa composante arborée dense et multiétagée, c'est-à-dire comportant plusieurs strates d'espèces variées. De manière générale, ces parcelles tendent vers une physionomie forestière où l'agencement spatial des espèces peut être cultivé ou naturel. Ce type de SAF regroupe plusieurs types de parcelles dont les agroforêts villageoises ou encore appelées « forêts-jardins ». Ces surfaces assez étendues et toujours basées sur le principe d'association « arbre-culture » sont orientées à des fins de production commerciales. Elles reposent essentiellement sur les différentes productions des arbres présents sur la parcelle (Torquebiau, 2007).

1.3.2 Les services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers

La notion de service écosystémique élaborée dans les années 1990, définit une partie des relations entre les écosystèmes et l'homme à travers les bénéfices fournis par les écosystèmes aux hommes (Ezzine de Blas,D, 2013). On peut les classer en quatre catégories :

- Les services d'auto-entretien : ils rassemblent les services liés à la régénération comme par exemple le cycle du carbone. Son bon fonctionnement assure les trois autres catégories.
- Les services de prélèvement fournissent les produits issus des écosystèmes : production de nourriture, eau douce, fibre etc.
- Les services de régulation permettent la régulation du climat et des maladies.
- Enfin les services culturels donnent naissance à des héritages culturels et éducatifs.

Nous allons nous pencher essentiellement sur le service de production, de contrôle biologique et du microclimat (Pedrono, et al., ND) (Alcamo, et al., 2003).

Service de production

Ce service permet de produire plusieurs cultures sur une même parcelle. Au sein d'une agroforêt à cacaoyer, on peut généralement trouver en plus des cacaoyers (composante principale), une production de fruits issue des différentes espèces fruitières présentes. Celle-ci peut être vendue ou autoconsommée. Egalement, les présences d'espèces forestières sur la parcelle peuvent fournir un bois d'œuvre ou de construction. Il est aussi possible de trouver des plantes à usage médicinal (Jagoret, 2012). En termes de production, la parcelle agroforestière est rentable puisque les rendements combinés sont plus élevés (Bayala, ND). Au niveau économique, le service de production est aussi très intéressant puisqu'en plus d'une diversification alimentaire, il contribue à diversifier le revenu des producteurs et à le stabiliser (Bayala, ND). Cette biodiversité a donc un rôle « économiquement utile » (Jagoret, 2011).

Service de régulation des bioagresseurs

Cette régulation est le fait de la biodiversité présente dans les agroforêts. La présence d'une multitude d'espèces, engendre une régulation écologique. Elle crée un système plus équilibré qui permet un environnement favorable à la protection des cultures. Cette biodiversité s'oppose aux systèmes de type monoculture. La diversité des cultures dans un SAF et leurs dispositions dans la parcelle peuvent jouer le rôle d'effet barrière et protège ainsi

la culture principale. Cette biodiversité des agroforêts joue un rôle « écologiquement utile » (Jagoret, 2011).

Service de régulation du climat

Les SAF sont caractérisés par la création de leurs propres microclimats et par « l'effet-tampon » dans les situations extrêmes (Bayala, ND).Ce service est étroitement lié aux deux autres présentés précédemment car il permet de créer des conditions favorables à la culture.

1.3.3 La complexité des agroforêts

Dans certains cas, les agroforêts peuvent être confondues avec la forêt secondaire (Torquebiau, 2007). Cela arrive lorsqu'elles abritent des plantes spontanées, qui poussent en association avec les cacaoyers. Nous avons montré plus hauts quels avantages on peut tirer des agroforêts. Cependant, cette combinaison d'espèces sur une même parcelle est plus délicate à appréhender et à conduire que les systèmes de type monoculture. Il est difficile en effet, de caractériser et de quantifier les interactions multiples et le partage des ressources entre les différents individus et espèces. Ce genre de système doit donc être étudié sur le long terme pour percevoir les différents aspects de sa durabilité (Jagoret, 2011).

Il peut exister une grande variabilité des SAF entre les régions, au sein d'une même région, et même parfois jusqu'à l'intérieur d'une même parcelle (Deheuvels, 2011). Ceci s'explique parce que les SAF sont adaptés à l'environnement local. Il faut donc avoir un minimum d'expérience pour accorder le SAF aux conditions locales et en tirer les meilleurs bénéfices en minimisant les contraintes (Bayala, ND).

Afin d'apporter des éléments de réponses sur les interactions entre les individus dans les SAF, notamment sur le service de régulation des bioagresseurs et du climat, nous proposons d'étudier la structure spatiale de ces agroforêts. Dans la partie suivante, nous présenterons ce qu'est la structure spatiale et son intérêt. Nous évoquerons les premiers résultats de l'étude réalisée auparavant sur cette même thématique.

1.4 La structure spatiale des arbres en système agroforestier

1.4.1 Définition de la structure spatiale, intérêts et applications

« Le concept de structure spatiale d'un peuplement forestier regroupe les différentes caractéristiques de l'utilisation horizontale et verticale de l'espace par les arbres » (Goreaud, 2000). La structure spatiale verticale consiste à diviser la végétation présente par classe de hauteur ainsi qu'établir les strates de végétation. Nous réduirons la structure spatiale horizontale à la répartition des arbres sur la parcelle.

La structure spatiale a d'abord été utilisée en écologie forestière. Des études sylvicoles ont montré que l'étude la structure horizontale pouvait participer à la compréhension des mécanismes de structuration des communautés en écologie (Goreaud, 2000). Elle permet de décrire l'environnement local qui influence la croissance, la mortalité et la régénération d'un peuplement. Par leurs structures multi-étagées proches et souvent héritées de la forêt naturelle, on peut appliquer aux agroforêts, cette méthode utilisée en foresterie. Cette transposition est intéressante car elle apporte des éléments nouveaux pour comprendre les SAF dont les caractéristiques et les mécanismes sont mal connus (Gidoin, 2013).

De nombreuses études ont déjà abordé la thématique de la structure verticale dans les agroforêts à cacaoyers du Cameroun et du Costa Rica (Deheuvels, 2011).

On y distingue quatre strates de végétation : la strate haute est composée majoritairement d'arbres forestiers de 15 à 30m de hauteur. Dans la strate dite « intermédiaire », on retrouve généralement les arbres fruitiers d'environ 5 à 15m de haut. La strate basse est essentiellement composée de bananiers et de cacaoyers entre 2 et 5m de haut. Enfin la dernière strate appelée « inférieure » est composée de jeunes plants et d'herbacées inférieurs à 2m. Notons que dans les agroforêts du Costa Rica, la strate inférieure est souvent inexistante (Deheuvels, 2011) (Gidoin, 2013). C'est la classification la plus utilisée dans les études de structures verticales des agroforêts au Costa Rica. C'est également sur cette classification que nous allons nous baser pour distinguer les différentes strates de peuplement lors de notre étude.

La structure spatiale horizontale des agroforêts a été moins étudiée. Les travaux ont jusque là portés sur la surface terrière, le nombre d'espèces présentes dans les jardins de case etc.

Il existe différents moyens de représenter la structure spatiale. Pour cette étude, on se basera sur la représentation utilisée dans la thèse de François Goreaud (2000) : chaque position d'un arbre A_i.est caractérisée par un point aux coordonnées (x ;y) dans un repère orthonormé. Chaque peuplement sera représenté par un semis de point (Goreaud, 2000).

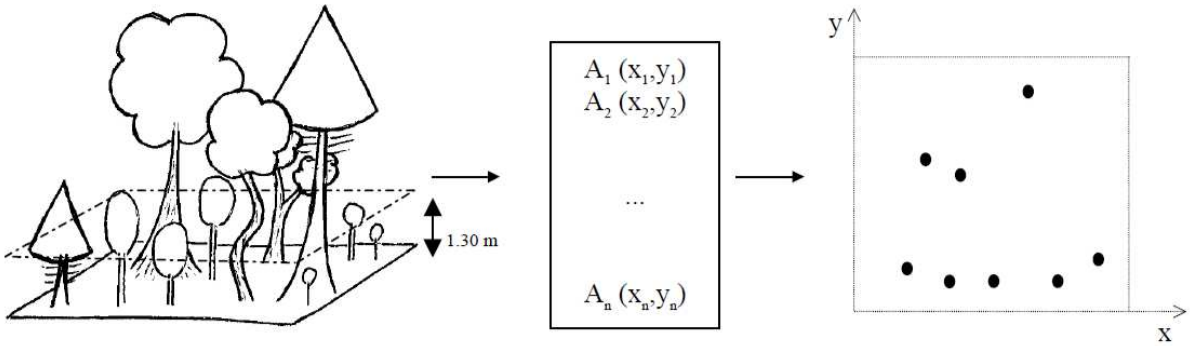


Figure 7 : Représentation de la structure spatiale horizontale d'un peuplement réel au semis de point (Goreaud, 2000)

La mise en relation des bioagresseurs avec la structure spatiale des peuplements a fait l'objet de la thèse de Cynthia Gidoin en 2013. Cette présente étude est la suite de ses travaux.

Dans la partie suivante, nous présenterons donc les premiers résultats de Mme Gidoin. Nous présenterons les points essentiels qui nous servirons à poursuivre cette étude.

1.4.2 Présentation des premiers résultats de l'étude

Dans sa thèse Cynthia Gidoin a étudié « les relations entre structure du peuplement végétal et bioagresseurs dans les agroforêts à cacaoyers ». Ses zones d'études sont situées dans la région de Talamanca, au Costa Rica, ainsi qu'au Cameroun. Dans ses travaux, elle a mis en évidence un lien entre structure spatiale et bioagresseurs (la moniliose au Costa Rica, les mirides et *P. megakarya* au Cameroun).

De cette thèse les principaux résultats sont les suivants :

Au Costa Rica, il a été observé différentes structures spatiales des arbres forestiers allant de l'agrégation à la régularité. Ceci semble indiquer un gradient croissant de gestion. En effet, la structure d'une agroforêt peu ou pas gérée tend vers une structure agrégée. Dans une parcelle gérée, le producteur sélectionne sur sa parcelle les arbres afin de diminuer la compétition entre les différents individus et donc à éliminer les agrégats.

Cynthia Gidoin constate que l'intensité de la moniliose et la densité en mirides diminuent lorsque les arbres forestiers sont disposés de façon aléatoire ou régulière. A l'inverse, elle augmente lorsque les arbres sont répartis de façon trop clairsemée ou de manière agrégée.

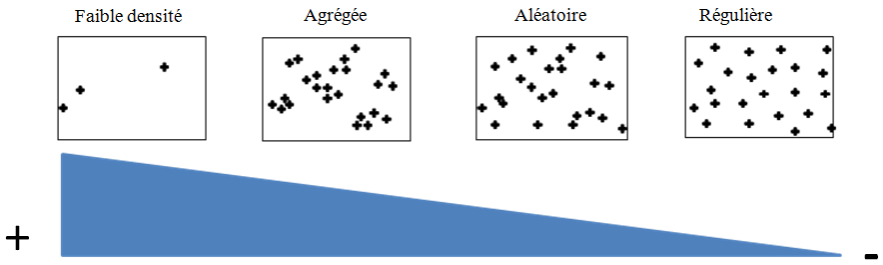


Figure 8 : Evolution de l'intensité de la moniliose en fonction de la structure spatiale des forestiers

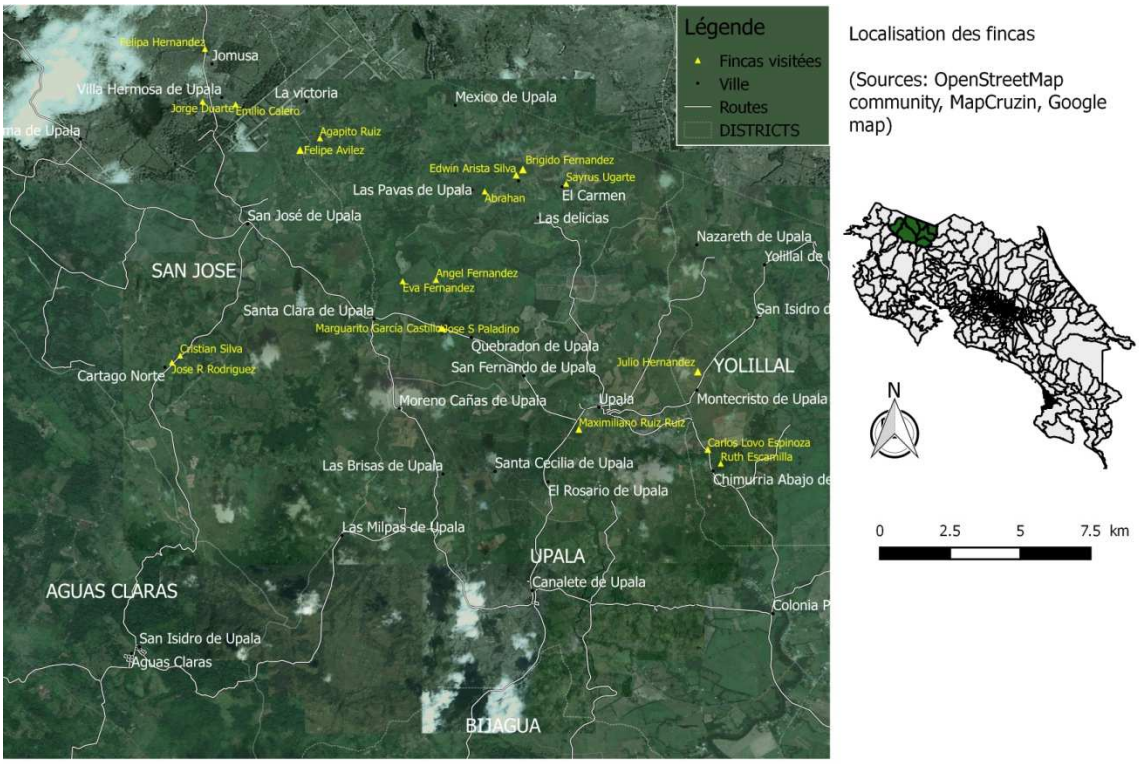
Ceci valide l'hypothèse principale : la structure des agroforêts influence la régulation naturelle des bioagresseurs. Pour les cacaoyers ayant une distribution régulière sur la grande majorité des parcelles, il a été montré que leurs densités jouaient un rôle dans la régulation de la maladie. En effet, l'intensité de la moniliose diminue lorsque la densité en cacaoyers augmente. Quant à *P.megakarya*, son indice d'attaque diminue quand le nombre de cacaoyer augmente sur la parcelle. La thèse précise également que les bananiers n'ont pas d'impact ni sur la moniliose, ni sur *P.megakarya*. Quant aux fruitiers, ils sont trop peu représentés sur les parcelles pour pouvoir analyser leurs impacts sur les bioagresseurs.

Enfin, il a été montré que la quantité de tissus sensible avait un impact sur l'indice d'attaque des bioagresseurs. On entend par tissus sensibles la production de fruit. L'intensité de la moniliose et de *P.megakarya* augmente lorsque la production de cabosse augmente.

1.4.3 Application au contexte présent : la zone d'Upala

Notre zone d'étude est située au Nord du Costa Rica dans la région d'Alajuela et plus précisément dans le canton d'Upala. Le climat de cette zone est tropical, avec une température moyenne de 26,5°C et des précipitations annuelles de 2026 mm (Climate-data, ND). Les mois de mai à novembre sont les mois pluvieux et la saison sèche s'étend de février à avril. Le reste de l'année est ponctué par des périodes de pluies mais les précipitations sont moins importantes. Ce type de climat est idéal pour la cacaoculture car les températures et les précipitations correspondent aux besoins de la plante.

Carte 1 : localisation de la zone d'étude à l'échelle du pays (Google earth, 2015)



Carte 2 : La zone d'étude

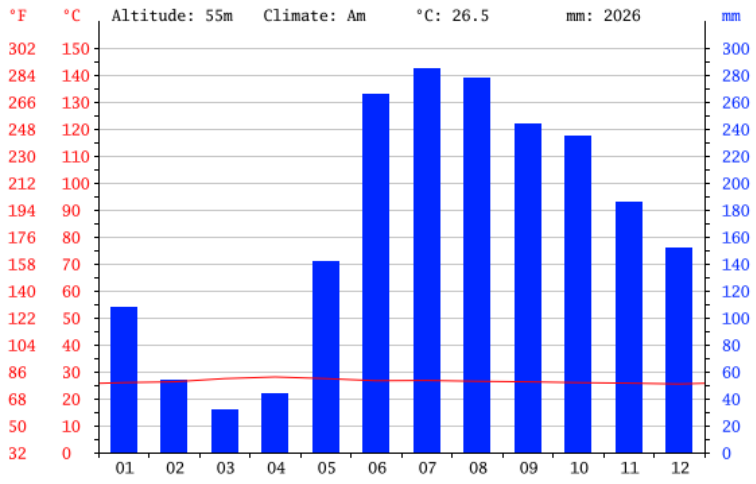


Figure 9 : Diagramme ombrothermique de la zone d'Upala

Upala a d'ailleurs longtemps été l'une des principales zones de production de cacao. Cependant l'arrivée de la moniliose en 1980 à Upala a décimé la production et contraint les producteurs à renoncer à la cacaoculture (Phillips-Mora, 2003). La plupart des cacaoyers ont été coupés pour laisser place à l'élevage, et les surfaces de cultures annuelles comme le riz, le maïs et le haricot ont augmenté. Une nouvelle culture de rente a également fait son apparition dans la région : l'ananas. En effet, les terres ont été louées aux industriels qui cultivent ce fruit de façon intensive. Cependant, certains producteurs ont conservé leurs cacaoyers par tradition ou par attachement familial. C'est pourquoi aujourd'hui l'on trouve de vielles plantations avec des arbres toujours productifs bien qu'ils soient âgés de plus de 35 ans. Ces producteurs ont d'ailleurs constaté que la moniliose avait baissé depuis que les plantations de cacao étaient moins présentes dans la zone.

Aujourd'hui, la première zone de production étant la province de Limon qui comptabilise 1560,1ha semés dont 1350,6ha productifs. La province d'Alajuela est la deuxième région productrice de cacao avec en 2014, 920 ha de cacaoyers semés dont 640 ha productifs. Dans cette région on constate une volonté de relancer l'activité cacaoyère puisqu'on comptabilise 280 ha de jeunes plantations qui vont entrer en production dans les prochaines années (INEC, 2014). Nous avons constaté que de nombreuses plantations sont réaménagées et de nouvelles pratiques s'implantent. On observe plusieurs stratégies de la part des producteurs. La majorité des producteurs qui aménage de nouvelles parcelles se tournent vers les variétés clonales résistantes ou tolérantes à la moniliose. Le CATIE, qui travaille sur le sujet depuis déjà depuis une dizaine d'années, fournit des clones à certains producteurs depuis 2007 dans le cadre de plusieurs projets (création de jardins clonaux par exemple). Ces plantations sont jeunes et ont un bon potentiel de production. Notons aussi qu'elles comptent généralement moins d'arbres d'ombrage que les plantations plus âgées. D'autres producteurs souhaitent préserver les anciennes plantations issues de semences locales c'est pourquoi l'on trouve de nombreuses plantations de cacaoyers de types « Criollo » ou « Forastero ». On constate aussi que la majorité des producteurs pratiquent la récolte sanitaire, taillent leurs arbres et n'utilise que très peu voire aucun fongicide[3].

On compte actuellement 300 à 400 producteurs de cacao dans cette zone. D'un point de vue organisationnel, les producteurs ont créé une association en 2004 mais elle a été remplacée par une coopérative qui a vu le jour en novembre 2011 : COOPECACAO NORTE-

[3] Informations issues des enquêtes réalisées par Laudine Alem

NORTE R.L compte aujourd'hui 120 associés principalement situés dans les cantons d'Upala et de Guatuso. La majorité des plantations de cacao sont de petites tailles, 72% inférieure ou égale à 3ha ; les 28% restants entre 3 et 11ha (Phillips-Mora, et al., 2014).

Malgré le fort potentiel de production de cacao dans cette zone, la moniliose reste le principal facteur limitant. En effet, les pertes peuvent aller jusqu'à la totalité de la récolte quand les conditions sont particulièrement favorables au développement de la maladie. Selon les enquêtes réalisées par le CATIE auprès des producteurs de la coopérative en 2014, 10% affirment perdre entre 25 et 50% de leurs récoltes, et 40% d'entre eux indiquent que les pertes dépassent 50% de la récolte. Pour le reste, les pertes sont inférieures à 50%. Concernant la pourriture brune, celle-ci est bien moins destructrice que la moniliose puisque les producteurs affirment qu'elle cause des pertes d'environ 5% de la récolte (Phillips-Mora, et al., 2014).

1.5 Objectif et hypothèse de l'étude

L'objectif de notre travail sera de déterminer l'influence de la variation du voisinage (par la qualité et la quantité d'individus) sur l'indice d'attaque des bioagresseurs du cacaoyer en systèmes agroforestiers. Nous étudierons le cas de la moniliose et de la pourriture brune dans la zone de production d'Upala au Costa Rica.

Notre étude s'inscrit dans un cadre de régulation agroécologique des bioagresseurs. Nous souhaitons déterminer le type de structure spatiale permettant une régulation optimale de la moniliose et de la pourriture brune afin de proposer des configurations innovantes aux producteurs de cacao. Ce thème est d'autant plus important que les producteurs ne disposent d'aucun moyen de lutte efficace contre ces deux maladies fongiques. Nous émettons l'hypothèse, sur la base des études précédentes, que la disposition des arbres influence l'intensité de la moniliose et de la pourriture brune sur les parcelles agroforestières, en modifiant l'environnement local de chacun des cacaoyers. Cette dynamique participe à la création d'un modèle d'intensification écologique de la cacaoculture.

Ainsi, dans ce travail, nous allons plus loin en nous intéressant à la caractérisation de l'environnement local du cacaoyer. Notre étude se fait ainsi à l'échelle de l'individu.

2 Matériel et méthodologie de l'étude

Dans cette partie nous présenterons les outils méthodologiques nécessaires à l'étude : dans un premier temps, les éléments liés à la prise des données sur le terrain, à savoir la sélection des parcelles et la cartographie des dispositifs, puis nous présenterons les outils statistiques utilisés lors du traitement de données et l'analyse des résultats.

2.1 Matériel : la sélection des parcelles

Un premier travail d'enquête auprès des producteurs de la zone a été réalisé durant le mois de juin 2015 par ma binôme de stage Laudine ALEM, étudiante en année de césure à Montpellier SupAgro. Ses travaux ont permis de sélectionner les parcelles pour notre travail soit 20 parcelles agroforestières :

- composées de cacaoyers issus de semences locales et ne comportant pas de clones, car ces derniers sont résistants à la moniliose; ceci afin de ne pas avoir dans notre échantillon des parcelles de sensibilité différente aux maladies étudiées.
- des parcelles sans aucune application de produits phytosanitaires tel que des fongicides, (une application de fongicides pouvant introduire un biais) ont été écartées.
- Notre échantillon ne comporte pas de parcelles trop jeunes car peu ou pas productives, afin de pouvoir réaliser le comptage des cabosses.
- Nous avons également choisi de travailler avec des parcelles gérées et d'éliminer les parcelles abandonnées. Ces dernières, minoritaires, sont exclues de l'étude. L'incidence des maladies étant différente entre une parcelle maintenue en activité et une parcelle abandonnée.
- L'un des principaux critères de sélection est aussi la présence d'arbres d'ombrage. Nous avons ainsi éliminé les parcelles en plein soleil et celles où les arbres d'ombrage étaient peu présents.
- Enfin les deux derniers critères de sélection sont liés à la cartographie : nous avons sélectionné les parcelles dont la surface nous permettait d'installer un dispositif carré de 40m x 40m² ; en vérifiant que la densité du sous étage nous permette de réaliser notre travail de terrain (exclusion des parcelles trop denses en sous-étages).

De façon générale, donc, les parcelles sélectionnées possèdent de vieux cacaoyers toujours productifs, issus de semences locales, avec des arbres d'ombrage. Elles font l'objet d'une gestion régulière et sans application de fongicides. La surface et la visibilité sont suffisantes pour installer le dispositif et rendre la cartographie possible.

2.2 Méthodologie : cartographie des dispositifs

L'objectif de cette phase est d'obtenir la position de tous les arbres (que nous reporterons sur une carte) dans vingt dispositifs expérimentaux de 40m x 40m. Nous avons installé chaque dispositif expérimental à un endroit représentatif de la parcelle, sur une surface homogène4, comportant des arbres d'ombrage. Nous nous sommes également assurés de la bonne visibilité dans le dispositif à cartographier, de façon à effectuer les relevés de position des arbres dans les meilleures conditions. Nous avons placé le dispositif sur une

[4] C'est-à-dire pas de source d'hétérogénéité : un chemin, une rivière ou d'arbres tombés

Rapport-Gratuit.com

surface plane afin de ne pas faire trop varier la hauteur lors de la prise de mesure (pour ne pas fausser les mesures).

Pour effectuer le relevé de position des arbres dans le dispositif de 40m x 40m, nous avons utilisé un théodolite. Cet instrument sert le plus souvent en topographie pour prendre des mesures de distance et d'angle entre lui et une cible, ici un arbre. Pour effectuer la cartographie, nous avons installé le théodolite sur un point central du dispositif de manière à faciliter la prise de mesure. De même, nous l'avons placé à distance de gros arbres pour éviter d'éventuelles gênes (angles morts) dans les relevés de position. Cet instrument de mesure nous permet de créer ainsi un repère orthonormé où tous les arbres (cacaoyer, forestier, bananier et fruitier) sont localisés. Les coordonnées *(x,y)* de chacun des arbres dans ce repère orthonormé nous permettront d'analyser la structure spatiale du dispositif.

Etape 1 : Mise en place du dispositif

Une fois l'emplacement choisi, nous avons procédé à la mise en station du théodolite sur un trépied parfaitement horizontal (vérification du niveau par la bulle). Le relevé commence par le positionnement de « la ligne de base » (cf figure 10). Celle-ci permet de créer le repère dans lequel nous allons localiser les arbres. Les points (0 ; 0) et (0 ; 40) vont constituer cette ligne et seront placés respectivement à 20m de distance du théodolite, à peu près au centre du dispositif. Nous avons ensuite créé quatre points dits « fixes », qui représenteront les angles du dispositif : (20 ; 0), (-20 ; 0), (20 ; 40), (-20 ; 40)

Une fois les points fixes placés, nous les avons matérialisés par des piquets et délimités le dispositif avec un ruban (photo en annexe 1).

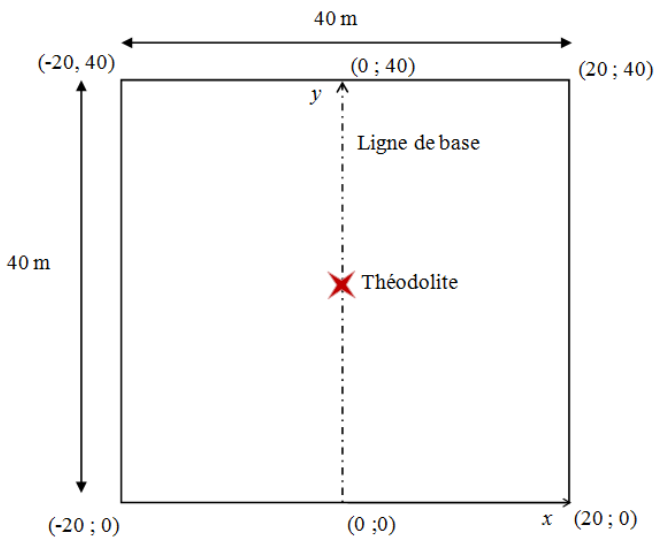


Figure 10 : Schéma du dispositif expérimental (repère)

Etape 2 : Relevé de positions des arbres

Cette phase nécessite trois opérateurs :

- L'opérateur 1 place le prisme au niveau du tronc de l'arbre cible, environ à 1,30m de hauteur.
- L'opérateur 2 vise le prisme avec le théodolite. L'instrument va alors déterminer les coordonnées *(x,y)* de l'arbre (à partir de sa distance et de son angle) dans le repère définit dans l'étape précédente et les enregistre.

Figure 11 : Prise de position d'un cacaoyer

- L'opérateur 3 note le type d'arbre, la strate de hauteur et lui attribue un code (CA=cacaoyer ; BA=bananier ; PA=palmier ; FU=fruitier ; FO= forestier) et un numéro d'ordre étiqueté sur le tronc. Exemple: CA001 : cacaoyer mesuré en premier. Il mesure aussi le diamètre et note le nom local pour les arbres d'ombrage fruitiers et forestiers. Ceci qui nous permet de connaitre les espèces d'arbres les plus fréquentes dans les cacaoyères et d'appréhender quel « type » d'ombrage ils exercent.

Nous réalisons cette opération, pour chacun des arbres vivants, et de hauteur supérieure à 2m. A la fin de cette phase de cartographie, nous aurons la position de tous les individus du dispositif : cacaoyers, bananiers, fruitiers, palmiers et forestiers.

Tableau 1 : Estimation des différentes strates selon la hauteur des arbres

Type d'arbre	Hauteur	Strate
cacaoyer	2-5m	1
bananier	2-5m	2
fruitier	5-15m	3
forestier	+ de 15m	4

Cas particulier

On réalise une correction lorsque que la visibilité est limitée c'est-à-dire lorsque l'on ne peut pas visualiser le prisme : trop de feuillage, arbre entre le théodolite et le prisme, etc. Dans ce cas, nous décalons le prisme et nous paramétrons manuellement le théodolite avec cette donnée.

2.3 Comptage de cabosses et calcul de l'indice d'attaque

Comptage de cabosses

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Pour avoir une estimation de la productivité ainsi que l'incidence de la moniliose et de la pourriture brune, nous avons procédé à un comptage des cabosses saines et malades. Compte tenu du temps que nous avions pour la phase de terrain, nous avons effectué le comptage sur le tiers des cacaoyers ; ces arbres étant choisi de manière aléatoire. Pour simplifier cette étape, nous avons séparé le dispositif en quatre placettes (cf fig 11).

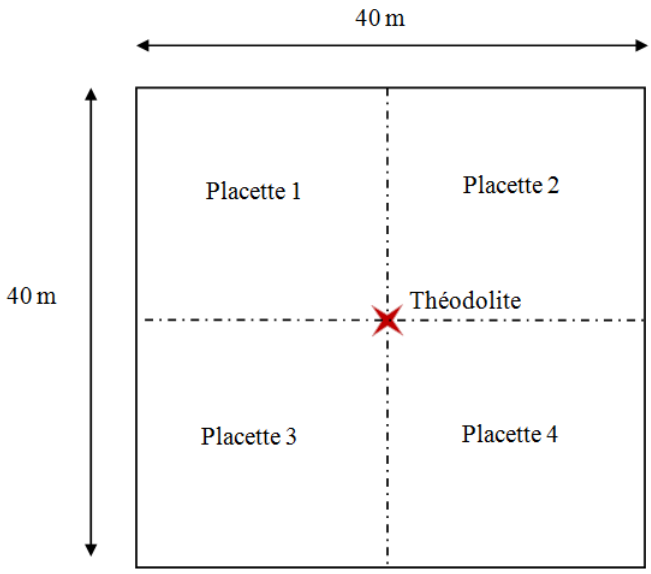


Figure 11 : Schéma du dispositif expérimental pour le comptage

Pour chaque cacaoyer sélectionné pour le comptage, nous avons chiffré le nombre de cabosses saines et atteintes par la moniliose, la pourriture brune et autres (ravageurs etc.) (cf tableau 2). Nous précisons que nous avons effectué le comptage toujours à 3 opérateurs dont un producteur ayant un œil plus exercé. Dans la suite du mémoire, les cacaoyers comptés seront appelés « cacaoyers suivis ».

Tableau 2 : Estimation de la productivité et de l'incidence des maladies pour chaque cacaoyer suivi

Numéro d'arbre	Cabosse saine	Moniliose	Pourriture brune	Autres dommages

Calcul de l'indice d'attaque

Nous calculons l'indice d'attaque *i* de la moniliose et de la pourriture brune à partir des données de comptage de chaque dispositif. C'est un pourcentage issu du nombre de cabosses comptées.

$$i = \frac{\sum_{cacaoyers} Nombre\ de\ fruits\ malades}{\sum_{cacaoyers}(nbr\ de\ fruits\ sains + nbr\ moniliose + nbr\ p.brune + nbr\ autres\ dommages)}$$

2.4 Caractérisation de l'organisation spatiale des individus

Nous détaillons ici les outils statistiques utilisés pour déterminer l'organisation spatiale à l'échelle de la parcelle puis à l'échelle individuelle.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Notre objectif est de caractériser l'influence de la structure spatiale sur l'indice d'attaque des bioagresseurs. Nous avons utilisé des outils classiques de statistiques. Nous les présentons ici, et les appliquerons à l'analyse de structure spatiale des arbres présents sur les dispositifs cartographiés.

Chacun des points représente la position *(x ;y)* relevée pour chacun des arbres cartographiés. A ces coordonnées, on peut associer des attributs comme l'espèce, la circonférence etc.

2.4.1 Caractérisation de la moyenne des environnements locaux

Pour déterminer l'organisation spatiale des différents peuplements, nous utiliserons la fonction de Ripley (1977).

La fonction de Ripley est un outil puissant de caractérisation des structures spatiales forestières. Elle fait partie des méthodes basées sur les distances, et donc dans notre cas sur les positions des arbres. Elle caractérise la structure spatiale du voisinage autour d'un point (Goreaud, 2000). La fonction K(r) de Ripley est définit de la façon suivante :

$$\lambda K(r) = (\text{Nombre de voisins à distance} \leq r)$$

Soit $\lambda K(r)$ l'espérance du nombre de voisins pour un point quelconque d'un semis,, à une distance inférieure ou égale à r. λ représente la densité du peuplement. On va alors comparer le motif ponctuel observé avec un motif ponctuel engendré par un processus aléatoire (ou de Poisson) (Noël Walter, 2001).Ce processus aléatoire correspondra à l'hypothèse nulle *H0* pour laquelle la répartition des points est complètement aléatoire. Pour *H0*, l'espérance du nombre de voisins à distance r d'un point quelconque du semis est $\lambda\pi r^2$, et donc $K(r)=\pi r^2$. Pour un processus agrégé, les points ont en moyenne plus de voisins que sous *H0*. On obtient donc $K(r)>\pi r^2$. A l'inverse, dans le cas d'un processus régulier, les points ont en moyenne moins de voisins que sous*H0*, et donc $K(r)<\pi r^2$ (Goreaud, 2000) (Ngo Bieng, 2007). Les différents processus sont illustrés ci-dessous :

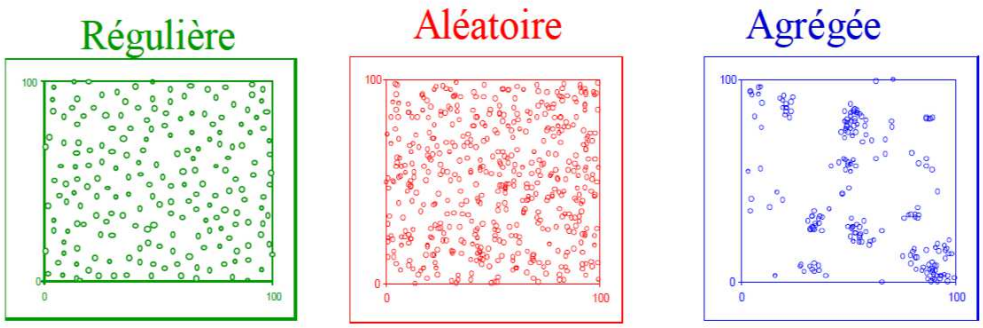


Figure 13 : Illustrations des différentes distributions spatiales (régulière, aléatoire et agrégée) d'après Goreaud, 2000

Nous utiliserons la fonction de Besag pour l'interprétation graphique de K(r). Celle-ci correspond à une fonction transformée de Ripley :

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

L'interprétation reste similaire que Ripley puisque pour un processus de Poisson, L(r)= 0. On obtient, pour un processus agrégé, L(r)>0 et dans le cas d'un processus régulier L(r) <0 (Goreaud, 2000) (Ngo Bieng, 2007).

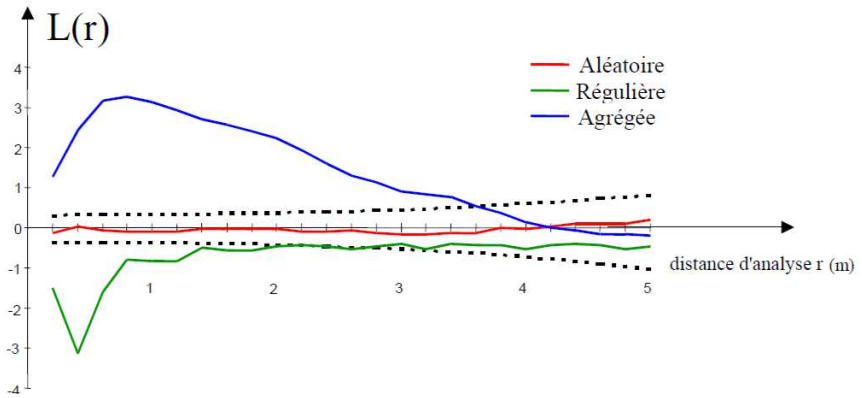


Figure 14 : Courbes de L(r) pour les différentes distributions (régulière, aléatoire et agrégée) d'après Goreaud, 2000

Dans cet exemple, on remarque deux courbes de résultats en dehors de l'intervalle de confiance. La courbe bleue, au dessus de l'intervalle, explique une distribution agrégée du peuplement. A l'inverse, la courbe verte caractérise un processus régulier de peuplement sur la parcelle. On parle de processus aléatoire lorsque la courbe reste dans l'intervalle de confiance (Goreaud, 2000) (Ngo Bieng, 2007).

Un avantage de la fonction de Ripley est que cette fonction permet de caractériser la répartition d'un peuplement à différentes distances simultanément. Il est donc nécessaire de connaître la position de la totalité des arbres, c'est pourquoi il faut cartographier l'ensemble de la zone que l'on souhaite étudier.

Nous avons ainsi caractérisé l'organisation spatiale des individus dans les dispositifs cartographiés. Notre objectif est maintenant d'identifier les similarités d'organisations spatiales entre les différents dispositifs, de manière à identifier une interaction entre différents patterns spatiaux, et incidence d'attaque des bioagresseurs étudiés (Gidoin, 2013).

Cette analyse est réalisée avec le logiciel R. le script est disponible en annexe 2.

2.4.2 Classification ascendante hiérarchique des dispositifs

La classification ascendante hiérarchique (CAH) permet d'organiser les individus d'un échantillon définis selon certaines variables en les regroupant de façon hiérarchique. Elle consiste à regrouper les individus les plus semblables entre eux, jusqu'à avoir rassemblé la totalité des individus de l'échantillon (Chevalier, et al., 2013).

L'échantillon de notre étude correspond aux vingt dispositifs cartographiés. L'objectif est de les organiser selon leurs organisations spatiales, caractériser par les valeurs des L(R) et éventuellement d'identifier des patterns agrégés, aléatoire ou réguliers. Les résultats de CAH seront présentés sous la forme d'un dendrogramme pour identifier les patterns mis en évidence.

On commence par regrouper deux à deux les individus les plus semblables, puis de moins en moins ressemblant jusqu'à avoir rassemblé la totalité des individus de l'échantillon (Chevalier, et al., 2013).

L'analyse est réalisée sur le logiciel R et le script est disponible en annexe 3.

2.4.3 Caractérisation de l'environnement local individuel

Dans ce travail, nous nous intéressons plus spécifiquement à l'environnement local de chacun des cacaoyers. Nous avons ainsi étudié le voisinage à différentes distances autour d'un cacaoyer suivi *i*, afin de caractériser l'influence de son de nombre de voisins à différentes distances sur son indice d'attaque (Mathieu-Dupas, 2010).

Principe

Cette approche est basée sur l'algorithme d'apprentissage k-nn (k-neighrest-neighbors). Le principe est d'affecter une classe aux plus proches voisins d'une observation. L'objectif ici est de faire une classification du voisinage d'un individu cible *x*, selon la caractéristique des voisins, et leur distance (Mathieu-Dupas, 2010).

Dans notre cas, nous travaillons sur des observations géolocalisées définies par des points appartenant à un système de coordonnées spatiales : le voisinage d'une observation *i* étant défini comme l'ensemble des autres points se trouvant à une distance *d* de celle-ci.

La classe de l'observation *i* est caractérisée par la classe majoritaire (nombre d'individus voisins les plus représentés) parmi les k plus proches voisins de l'observation *i*. Cette méthode se déroule en plusieurs étapes :

Etape 1: La première étape est de calculer la distance entre *i* et les autres points. La détermination des k plus proches voisins est basée sur une fonction de distance arbitraire *d(.,.)* faisant appel au calcul de la distance euclidienne, et dont la formule générale est:

$$d(x_i, x_j) = \left[\sum_{s=1}^{p} (x_{is} - x_{js})^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

Avec $d(x_i,x_j)$ la distance entre les deux points i et i de coordonnées (x_i,y_i) et $(x_{,j}y_j)$, appartenant à l'ensemble de points donnés et avec, pour un point i donné, x_{is} la valeur de sa s^e coordonnée.

Etape 2: La deuxième étape permet de réaliser une classification sur la base du calcul des distances : on comptabilise pour une distance donnée le nombre d'occurrence par classe parmi l'ensemble des voisins.

Etape 3 : Enfin, la dernière étape consiste à caractériser *i*. La classe que l'on affecte à *i* est alors la classe majoritaire présente dans l'ensemble S. On peut illustrer cette méthode par un exemple.

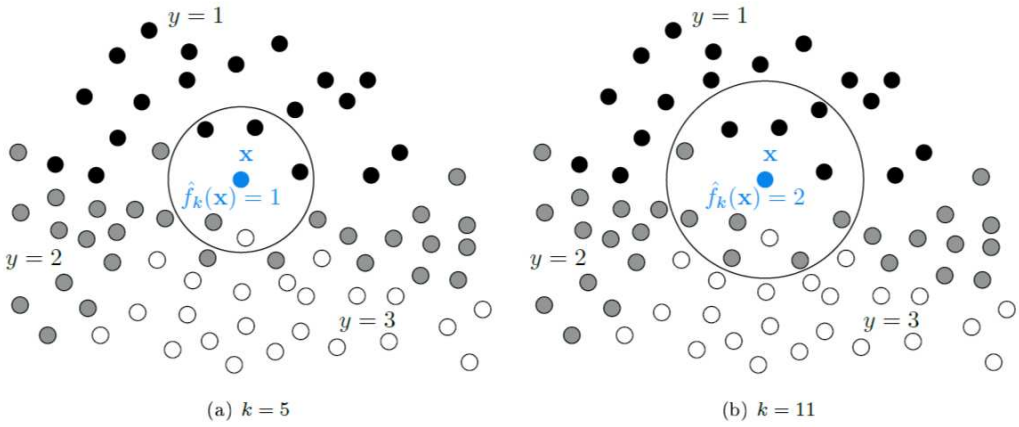


Figure 15 : Exemple de fonctionnement de la méthode des k-plus proches voisins

Soit k, le nombre de voisins et y la classe.Pour les deux cas, on observe 3 classes différentes :y=1 (noir), y=2 (gris), y= 3 (blanc). Le premier cas *(a)*, k=5, avec des points de classes différentes. La classe y=1 étant représentée en majorité avec 3 points contre 2 pour y=2 et 1 pour y=, l'observation x est alors identifiée à la classe y=1. Il en est de même pour le deuxième cas *(b)* : x sera attribué à la classe représentée majoritairement à savoir y=2.

Méthode appliquée à notre étude

Dans notre étude, nous avons déterminé le nombre de voisins à différentes distances de chaque cacaoyer suivi, sur la base de la méthode des k plus proches voisins. Mais nous utiliserons uniquement les deux premières étapes de la méthode présentée ci-dessus. En effet, notre objectif est de déterminer, pour chaque rayon de 1 à 10m, le nombre et la classe (cacaoyer, forestier, fruitier ou bananier) des voisins pour un individu donné.

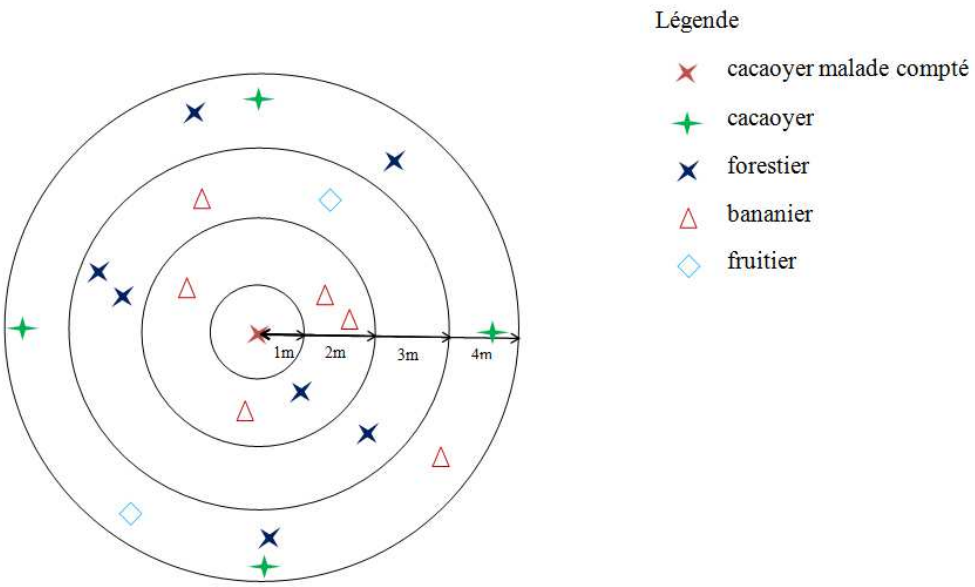


Figure 16 : Exemple d'application de la méthode des k plus proches voisins à l'étude

Nous avons ainsi construit un algorithme sous le logiciel R permettant de déterminer le nombre d'individus de chaque classe à différentes distances de chacun des cacaoyers suivis. Par exemple, pour le schéma ci-dessus, (fig16) pour r=3, nous avons un individu appartenant à la classe « fruitier », cinq « bananier » et quatre autres individus de la classe « forestiers ».

Effet de bord :

Pour ne pas prendre en compte les effets de bord, nous avons caractérisé le nombre de voisins des cacaoyers suivis dans un carré de 30m x 30m du dispositif d'origine de 40m x 40m. Nous n'effectuerons pas les comptages pour les cacaoyers situés au de la du carré de 30m*30m (petit schéma pour illustrer), car leurs voisins, particulièrement pour les grandes distances se situeraient en dehors du dispositif cartographié.

Avec cet algorithme, nous obtenons une matrice constituée du nombre de voisins situés entre 1m et 10m pour chacun des cacaoyers suivis. Cette matrice constitue la base de nos analyses à l'échelle individuelle. Notre objectif est ensuite d'étudier la corrélation entre l'indice d'attaque du cacaoyer suivi et son nombre de voisins à plusieurs distances. Pour cela, nous allons utiliser les modèles mixtes généralisés.

2.4.4 Modèle linéaire mixte généralisé

Pour étudier l'influence de l'environnement local sur l'indice d'attaque sur chaque individu suivi, nous avons choisi d'utiliser une méthode de régression linéaire : le modèle linéaire mixte généralisé (GLMM). Nous considérons ainsi :

- Nos variables à expliquer : l'incidence de moniliose et de pourriture brune
- Nos variables explicatives : le nombre de voisins à différentes distances de chaque individu suivi.

Par cette démarche, nous souhaitons déterminer quelles sont les variables qui ont une influence sur l'incidence individuelle des maladies, mais aussi leur impact (positif ou négatif) sur la moniliose et la pourriture brune. Nous expliquerons le principe de cette méthode puis nous l'appliquerons à notre étude.

Principe

Le GLMM dérive du modèle linéaire généralisé (GLM) qui permet d'étudier la liaison entre une variable dépendante Yi et un ensemble de variables explicatives Xi que l'on peut aussi appeler « prédicteurs » (Modgen, 2007). Ce modèle est représenté par la fonction suivante :

$$g\big(E(Y_i)\big) = g(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \cdots + \beta_i x_{ip} = \beta X_i$$

Avec g la fonction de lien, qui est la relation entre la combinaison des variables explicatives xi et l'espérance de la variable Y_i, β les paramètres pour les covariables et X_i la matrice de vecteur de covariables (Modgen, 2007) (Roch, ND).

Dans le cas de notre étude, les cacaoyers suivis appartiennent à 20 parcelles différentes donc on suppose qu'il y a des variations aléatoires entre deux individus cacaoyers de parcelles différentes. On utilisera alors un modèle mixte. Il nous permettra de prendre en compte « l'effet parcelle » que l'on considère comme un effet aléatoire (car il échantillonné au hasard dans la population considérée). Ci-dessous la fonction d'un modèle mixte :

$$Y_i = \beta X_i + \gamma_i Z_i + \varepsilon_i$$

Avec Y_i la mesure du sujet i, X_i les variables à effets fixes et β le paramètre. Z_i la variable à effets aléatoires et γ_i le paramètre. Enfin, ε_i représente l'erreur de mesure qui est indépendante de chaque observation.

On utilisera donc un modèle linéaire mixte généralisé (GLMM) dans lequel on retrouve les différents paramètres évoqués précédemment soit la prise en compte de combinaisons de variables explicatives à effets fixes et aléatoires. La fonction du GLMM devient la suivante :

$$g\left(E\left(Y_i \middle| \gamma_i\right)\right) = g(\mu_i) = \beta X_i + \gamma_i Z_i$$

Avec βX_i pour l'ensemble des covariables à effet fixes et $\gamma_i Z_i$ pour les covariables à effets aléatoire. g représente la fonction lien (Roch, ND).

Application à l'étude

L'objectif est de sélectionner le modèle le plus vraisemblable, composé uniquement des variables significatives ayant une incidence de la maladie. Pour cela, on utilisera le critère d'information d'Akaike (1974) (AIC) pour sélectionner les modèles. Nous comparons plusieurs modèles possibles qui correspondent aux différentes combinaisons de variables explicatives (spatiales et autres). On sélectionnera alors le modèle qui a l'AIC le plus faible, l'AIC est défini de la manière suivante (Lancelot, et al., 2005):

$$AIC = -2\log(L) + 2 * k$$

Avec L la vraisemblance maximisée, qui correspond à la valeur des paramètres maximisant la vraisemblance du modèle (Bailly-Bechet, ND) et *k* : le nombre de paramètres dans le modèle.

Etape 1 : Sélection de variables par construction de différents GL2M

Dans un premier temps nous sélectionnons les variables spatiales susceptibles d'avoir une influence sur les maladies, puis nous définissons d'abord notre modèle nul: M0 qui représente la variable explicative en fonction du facteur aléatoire « parcelle ». Cela donne le modèle suivant :

$$m0 = glmer(mon{\sim}(1|parc), data = dt, family = poisson)$$

Avec *glmer* la formule du GLMM sous le logiciel R, *mon*, variable explicative « moniliose », *parc*, facteur aléatoire « parcelle », *data*, le jeu de données appelé ici *« dt »* et *family*, le type de distribution des données ici Poisson.

Ensuite, nous avons construit plusieurs GLMM :

- Pour chacun des peuplements : cacaoyer, forestier, bananier et le fruitier.
- Pour un même peuplement, en fonction du nombre d'individus à plusieurs distances autour de chaque cacaoyer suivi.

Les modèles crées sont les suivants :

$$m_{cacaoyer} = glmer(mon{\sim}nca^{5} + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

$$m_{forestier} = glmer(mon{\sim}nfo^{6} + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

$$m_{fruitier} = glmer(mon{\sim}nfu^{7} + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

[5] nca : nombre de cacaoyers
[6] nfo : nombre de forestiers
[7] nfu : nombre de fruitiers

$$m_{bananier} = glmer(mon \sim nba^{8} + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

Nous calculons alors les AIC pour les différents modèles construits et nous les comparons à l'AIC du modèle nul M0, à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta AIC = AIC(M0) - AIC(M)$$

Nous déterminons ainsi la distance pour laquelle la variation d'AIC est la plus grande. Nous interpréterons à cette distance, le nombre de voisins qui a le plus d'influence sur la maladie. C'est donc cette variable qui sera utilisé dans le modèle final.

Etape 2 : Construction d'un modèle intermédiaire avec les variables spatiales expliquant la variabilité de l'indice d'attaque

Ce modèle permet d'expliquer l'indice d'attaque en fonction des variables sélectionnées précédemment, pour les différents peuplements. Nous construisons un nouveau GLMM avec les variables cacaoyer (nombres de cacaoyer à une distance donnée), forestier, bananier et fruitiers sélectionnées dans l'étape 1.

Le modèle nous donne les variables n'ayant pas d'impact significatif sur la maladie. Nous les supprimons une à une, l'objectif étant d'obtenir un modèle avec l'AIC le plus faible possible.

Etape 3 : Construction d'un modèle final avec les variables expliquant la variabilité de l'indice d'attaque

Cette étape permet de créer un ultime modèle utilisant les variables spatiales ainsi que les autres variables sélectionnées[9]. De la même façon nous sélectionnerons le modèle avec le plus faible AIC, soit le plus vraisemblable. Les variables appartenant à ce modèle sont celles qui ont un impact significatif sur l'incidence de la maladie.

Etape 4 : Vérification du modèle final

On s'assure que les estimations du modèle *m final* sont correctes à travers différentes vérifications :

- Examen des résidus :

Nous construirons l'histogramme des résidus du modèle. Il représente la différence entre la loi normale et la distribution observée. Si celui-ci présente une allure proche d'une courbe de Gauss, on considère que la normalité est vérifiée.

Nous tracerons aussi le diagramme quantile-quantile (Q-Q Plot) des résidus. Basé sur le même principe de comparaison avec la loi normale, si les points sont alignés sur la courbe (représentant la loi normale), alors la normalité du modèle est vérifiée.

- Coefficient de détermination (R^2):

Nous calculerons le coefficient de détermination du modèle *m final*. Il est compris entre 0 et 1 et détermine si le modèle construit est adapté. Si R^2 est proche de 0, alors le

[8] nba : nombre de bananier

Rapport-Gratuit.com

modèle n'explique pas l'indice d'attaque. Au contraire si $R^2 = 1$, alors on peut dire que le modèle est adapté et explique l'incidence de la maladie.

Le script de cette analyse est disponible en annexe 4.

Dans la partie suivante, nous présenterons les résultats obtenus. Dans un premier temps, nous allons présenter les résultats à l'échelle de la parcelle à travers l'exemple d'un dispositif. Ensuite, nous présenterons les résultats sur l'ensemble des parcelles en réalisant une classification ascendante hiérarchisée des dispositifs (en fonction de leurs structures spatiales). Enfin, nous traiterons les résultats obtenus à l'échelle de l'individu à travers différents modèles linéaires mixtes généralisés, en développant le cas de la moniliose puis de la pourriture brune.

3 Résultats de l'étude

3.1 Résultats obtenus pour un dispositif

Nous illustrons les résultats de l'étude à travers l'exemple pour un dispositif.

Cartographies et structures spatiales des différents peuplements

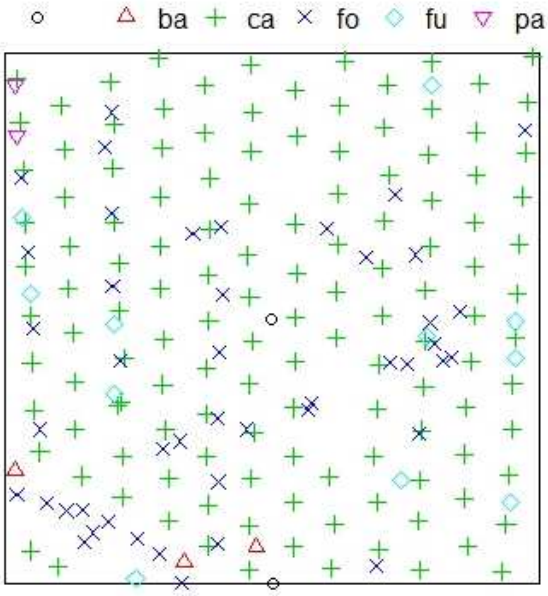


Figure 17 : Cartographie du dispositif

Pour chaque dispositif cartographié, nous avons réalisé une cartographie représentant l'ensemble des peuplements, ce qui permet d'avoir un aperçu des différentes dispositions spatiales de chaque peuplement sur le dispositif.

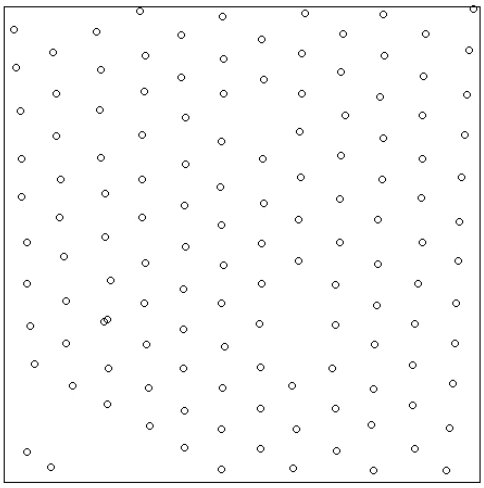
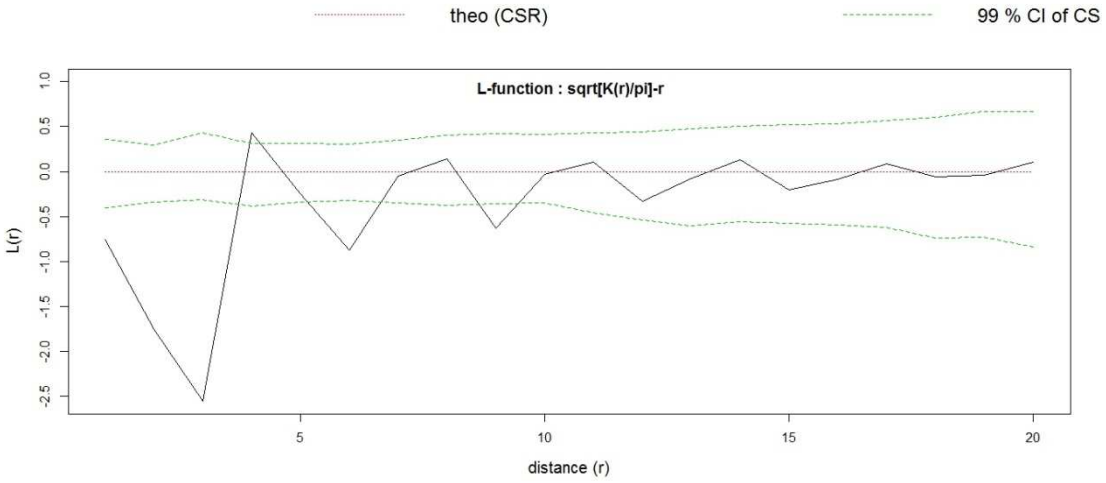


Figure 18 : Cartographie du peuplement des cacaoyers

Nous nous somme également intéressés à la structure spatiale de chaque peuplement du dispositif. Ci-dessus la cartographie des cacaoyers montre que la structure spatiale de ce peuplement est régulière. Comme les cacaoyers ont été semés par le producteur et selon une certaine densité, cela parait assez logique.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



Graphique 1 : Courbe de L(r) du peuplement « cacaoyer »

Le graphique ci-dessus représente la courbe L(r) des cacaoyers. Il confirme l'analyse que nous avons faite sur la cartographie à savoir, que ce peuplement à une structure spatiale régulière. L(r)<0 signifie que le processus est régulier. Celui-ci est significatif car la courbe est en dessous de l'intervalle de confiance (représenté en pointillé vert). On constate qu'il y a un pic vers 3 m ce qui approximativement correspond à la distance de semis (le plus souvent semé entre 3m x 3m ou 3m x 4m).

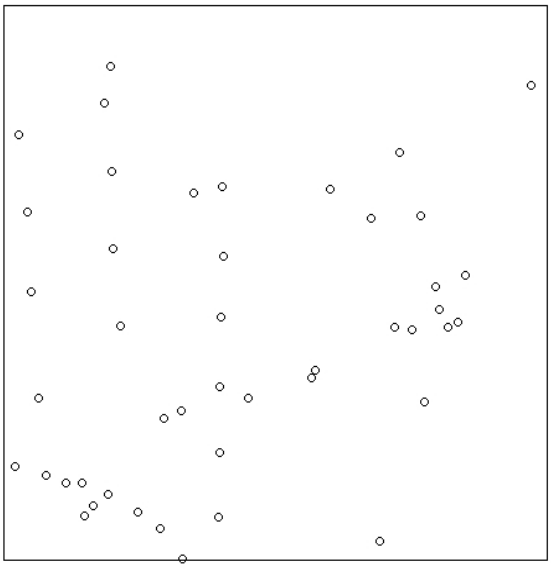
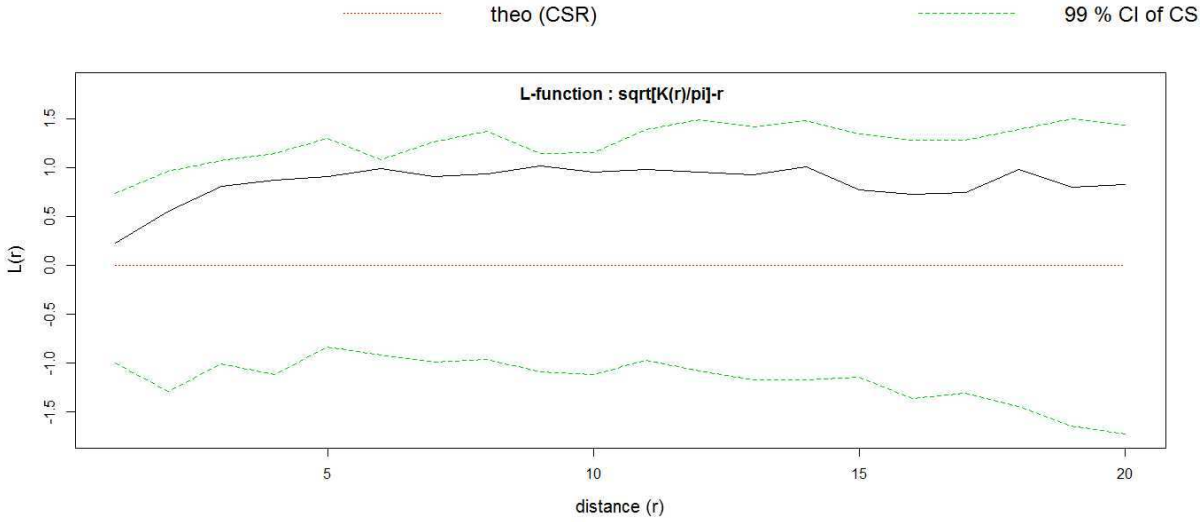


Figure 19 : Cartographie du peuplement « forestier »

Cette cartographie représente la répartition des forestiers sur le dispositif. Contrairement aux cacaoyers, il est visuellement plus difficile de définir leurs dispositions. On distingue à la fois des agrégats d'arbres et des rangées d'arbres. C'est dans ce cas que L(r) devient très intéressante car il est n'est pas possible de définir visuellement la structure spatiale.



Graphique 2 : Courbe L(r) du peuplement « forestier »

Ici, L(r) >0 mais n'est pas dans l'intervalle de confiance. La structure spatiale du peuplement des forestiers est donc aléatoire.

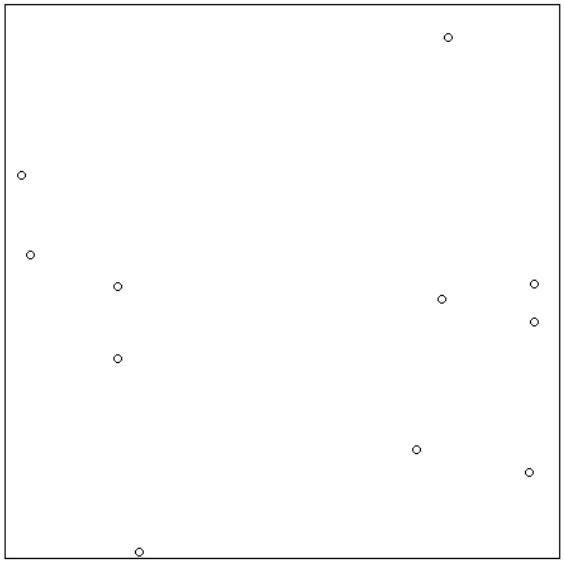
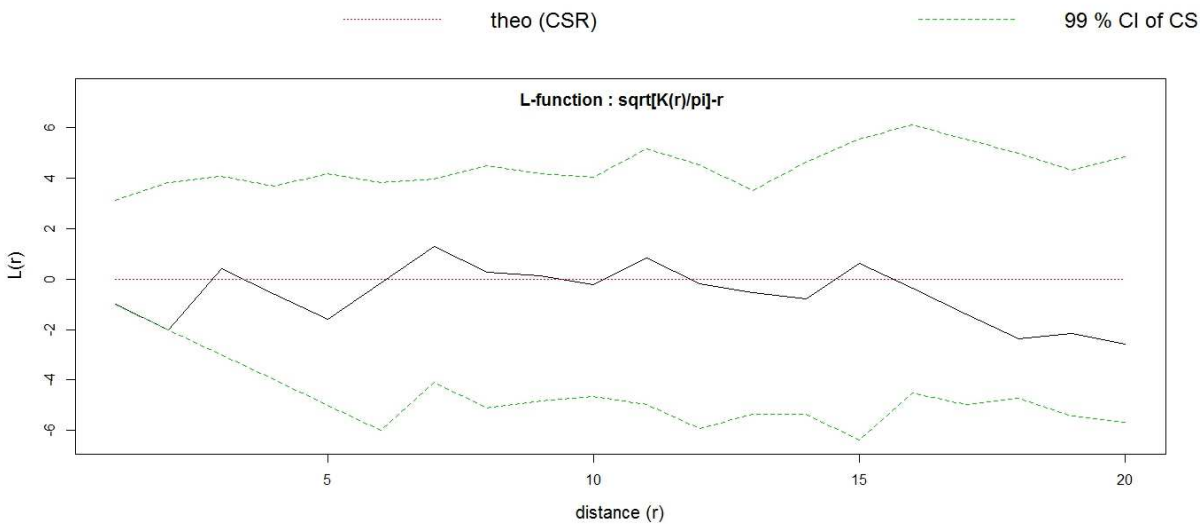


Figure 20 : Cartographie du peuplement « fruitier »

D'après la cartographie des arbres fruitiers, il est encore moins évident de déterminer la structure spatiale de façon visuelle, due au faible effectif de ce peuplement.



Graphique 3 : Courbe L(r) du peuplement « fruitier »

On se retrouve dans le même cas que les forestiers, la courbe ne sort pas de l'intervalle de confiance et les valeurs de L(r) tournent autour de 0: la structure spatiale des arbres fruitiers est aléatoire.

Comptage et calcul de l'indice d'attaque

Pour le tiers des cacaoyers nous avons relevé le nombre de cabosses saines ainsi que celles atteintes par la moniliose, par la pourriture brune et autres. Nous obtenons ce tableau :

Tableau 3 : Estimation de la productivité et de l'incidence des maladies pour chaque cacaoyer suivi : exemple d'un dispositif

Cacaoyer suivi	Cabosse saine	Moniliose	Pourriture Brune	Autres dommages	TOTAL
Ca002	6	2	3	0	11
Ca007	3	0	0	0	3
Ca009	20	0	7	0	27
Ca011	13	0	8	0	21
Comptage pour le tiers des cacaoyers soit ici 44…					
	309	33	73	87	502

Ces données vont nous permettre de déterminer l'incidence de la moniliose et de la pourriture en utilisant la formule suivante :

$$= \frac{\sum_{cacaoyers} Nombre\ de\ fruits\ malades}{\sum_{cacaoyers}(nbr\ de\ fruits\ sains + nbr\ moniliose + nbr\ p.brune + nbr\ autres\ dommages)}$$

$$i_{moniliose} = \frac{33}{502} = 0{,}0657$$

On arrondira le pourcentage de moniliose à 7%.

Calcul de l'indice d'attaque pour ce dispositif pour la pourriture brune:

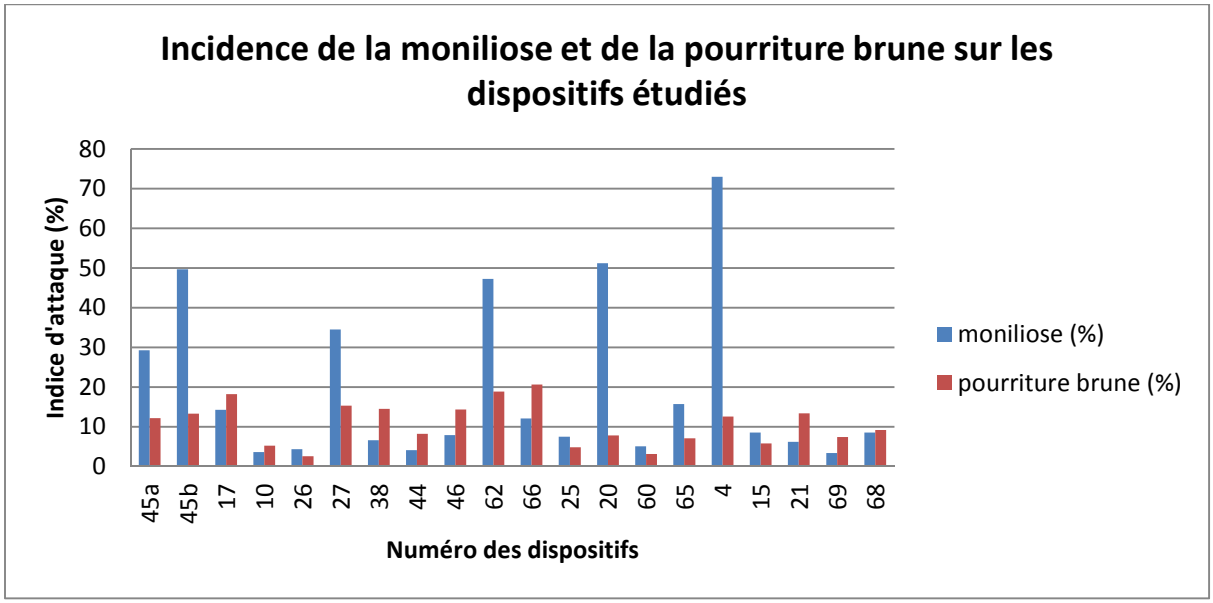
$$i_{pourriturebrune} = \frac{73}{502} = 0{,}1454$$

On arrondira le pourcentage de pourriture brune à 14%.

Cette analyse a été faite sur l'intégralité des dispositifs, nous allons maintenant présenter l'ensemble des résultats à l'échelle de la parcelle.

3.2 Variabilité de l'indice d'attaque au sein des parcelles

D'après nos données de comptage nous obtenons les indices d'attaques suivants pour les vingt dispositifs :



Graphique 4 : Histogramme de l'incidence de la moniliose et de la pourriture brune par dispositif

On a évalué en moyenne l'incidence de la moniliose sur l'ensemble des dispositifs à 20%. Cependant les indices d'attaques sont très disparates selon les dispositifs puisque qu'ils varient entre 3 et 73%. Pour la pourriture brune, on estime son incidence à 11% en moyenne, avec des résultats variant aussi selon le dispositif. On constate que l'indice d'attaque ne dépasse pas les 21%. Ces résultats concordent avec nos éléments bibliographiques ; la moniliose cause plus de dégâts que la pourriture brune et son incidence varie selon les exploitations agricoles.

A ce stade, nous avons déterminé la structure spatiale des dispositifs ainsi que leurs indices d'attaques. Nous allons maintenant relier ces deux éléments à travers une classification ascendante hiérarchique.

3.3 Classification ascendant hiérarchique des dispositifs en fonction de la structure spatiale

La CAH des dispositifs représentée ci-dessous par un dendrogramme ne prend en compte que 16 dispositifs sur les 20 cartographiés. Quatre dispositifs ont été écartés car ils contenaient moins de 10 forestiers. Nous avons ajouté à la classification les indices d'attaque calculés, représentés par un pourcentage sous chaque dispositif. Le dendrogramme pour la pourriture brune figure en annexe 5.

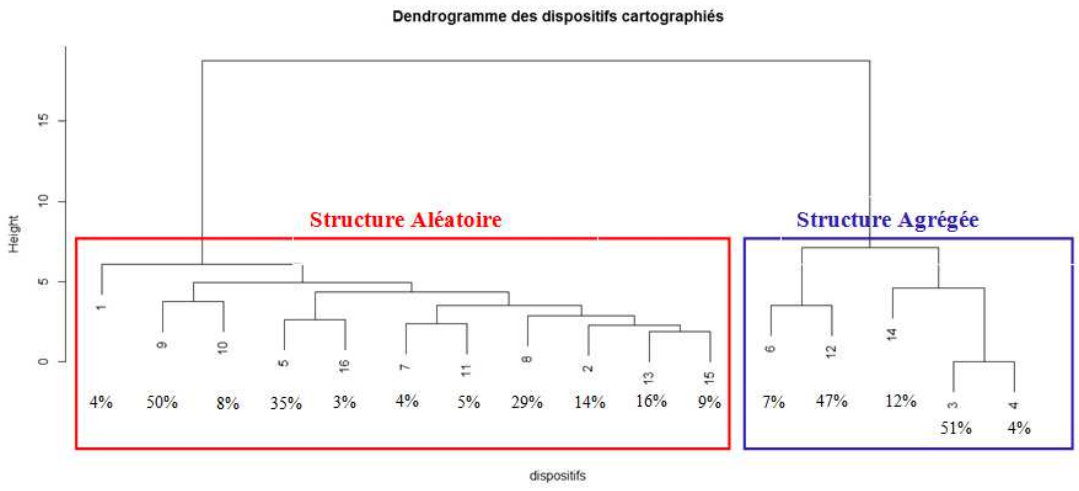


Figure 21 : Dendrogramme des dispositifs cartographiés en fonction de leurs structures spatiales pour la moniliose

Parmi les seize dispositifs, la majorité présente une structure aléatoire, seul cinq diffèrent par une structure agrégée, la structure régulière n'étant pas représenté.

On peut constater qu'il y a une variabilité de l'indice d'attaque au sein d'une même structure. En effet, pour la structure de type aléatoire, l'indice d'attaque varie de 3 à 50%. C'est aussi le cas pour la structure agrégée (entre 4 et 51%). On retrouve la même variabilité pour la pourriture brune.

Nous irons plus loin en passant de l'échelle de la parcelle à l'échelle de l'individu, en étudiant l'environnement local des cacaoyers suivis. On examinera la répartition du voisinage.

3.4 Résultats à l'échelle individuelle

Nous allons présenter les résultats obtenus à l'échelle des individus pour la moniliose, puis pour la pourriture brune. A cette échelle l'analyse de ces résultats est basée sur la matrice répertoriant pour chaque « cacaoyer suivi » le nombre de voisin par mètre. Plus de 800 individus sont représentés dans cette matrice. Un extrait de celle-ci a été placé en annexe 6.

3.4.1 Résultats obtenus pour la moniliose

Avant de commencer les analyses, nous avons étudié la distribution de notre population en fonction de la moniliose. Elle suit une loi de Poisson que nous intégrerons au modèle. Les histogrammes permettant de le vérifier se trouvent en 7. Les résultats seront détaillés selon les étapes énoncées dans la partie méthodologie des modèles mixtes linéaires généralisés.

Etape 1 : Sélection de variables par construction de différents GLMM

L'objectif de cette première étape est de sélectionner les variables spatiales susceptibles d'avoir une influence sur les maladies, ici la moniliose.

Cette sélection de variables se fait sur la différence d'AIC entre le modèle nul M0 et le modèle de chaque peuplement :

Pour rappel :

Le modèle nul :

$$M0 = glmer(mon{\sim}(1|parc), data = dt, family = poisson)$$

Le modèle pour chaque peuplement :

$$m_{cacaoyer} = glmer(mon{\sim}nca + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

$$m_{forestier} = glmer(mon{\sim}nfo + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

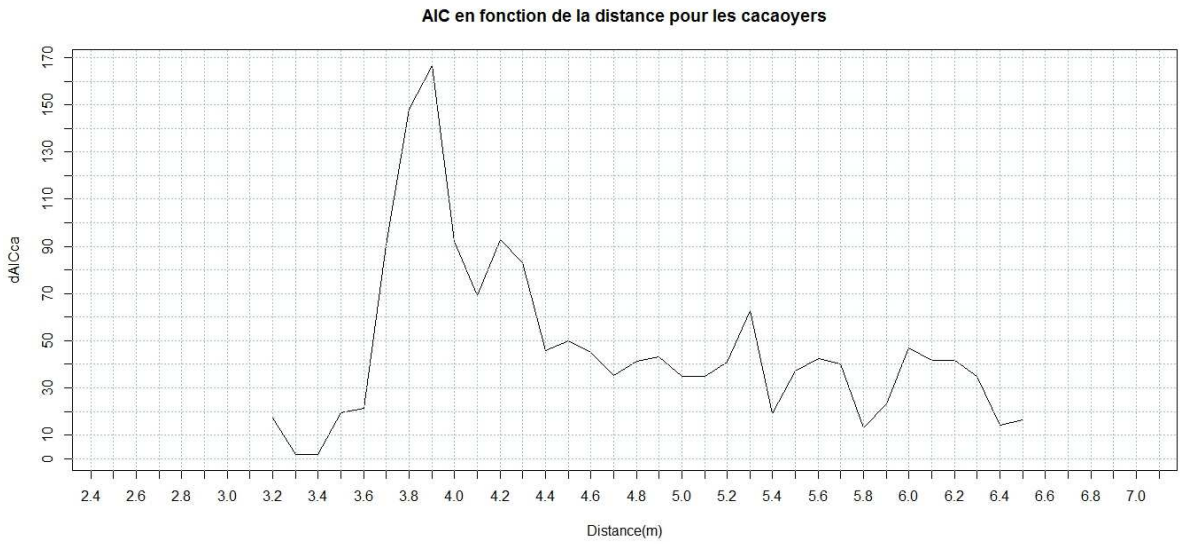
$$m_{fruitier} = glmer(mon{\sim}nfu + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

$$m_{bananier} = glmer(mon{\sim}nba + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

La variation de l'AIC :

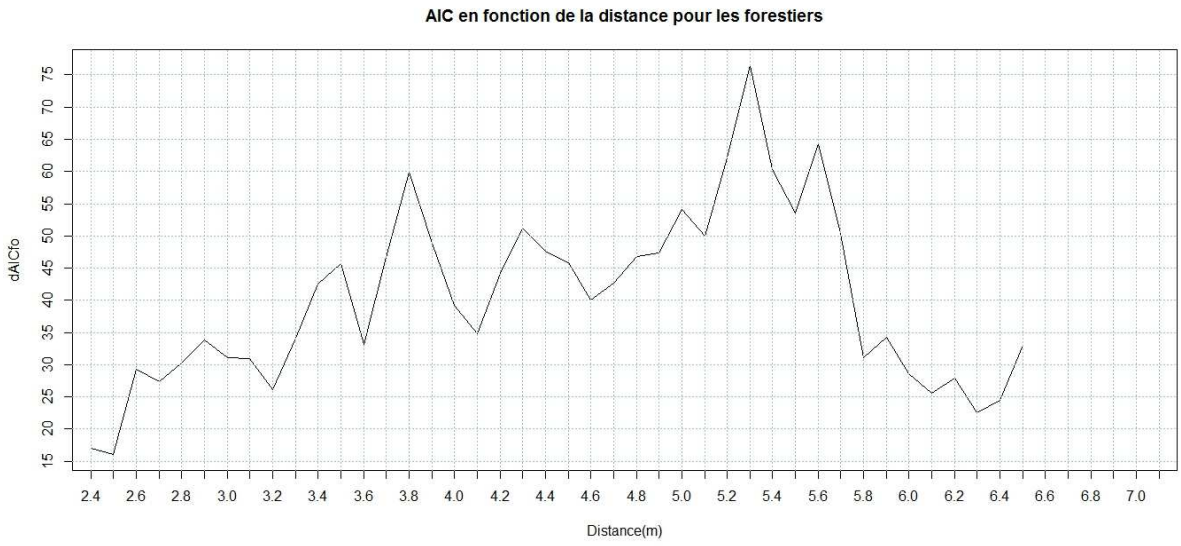
$$\Delta AIC = AIC(M0) - AIC(M)$$

L'ensemble des graphiques ci-dessous représentent la variation d'AIC (ΔAIC) en fonction de la distance.



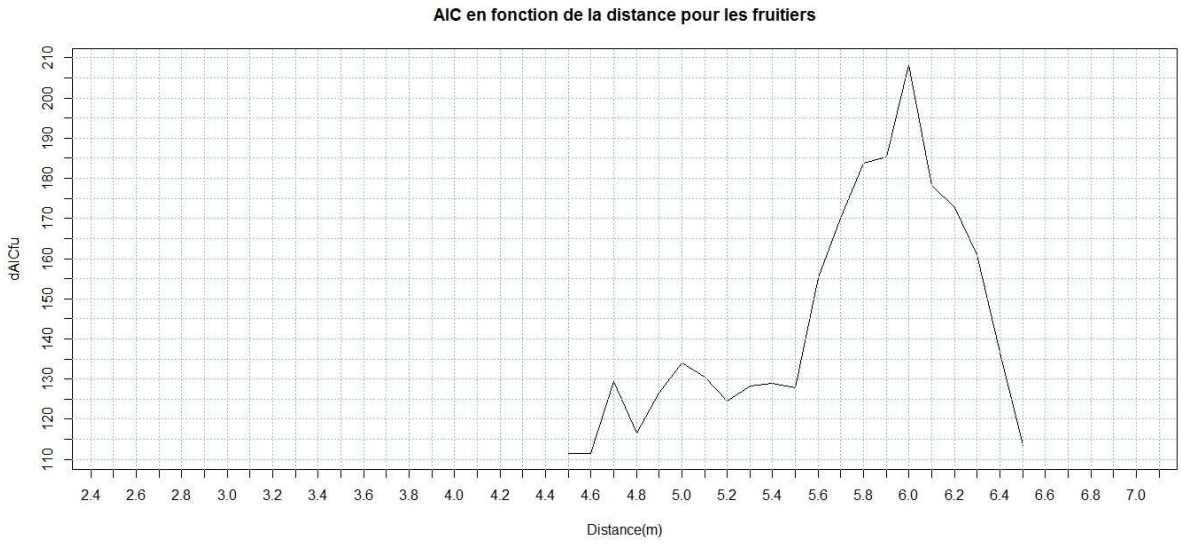
Graphique 5 : Variation de l'AIC pour le peuplement cacaoyer

On constate qu'il y une variation de ΔAIC en fonction de la distance. Pour chaque variable, on sélectionne la distance pour laquelle ΔAIC est le plus fort. Pour les cacaoyers, la variation d'AIC est la plus forte à 3,9m (ΔAIC=166.69).



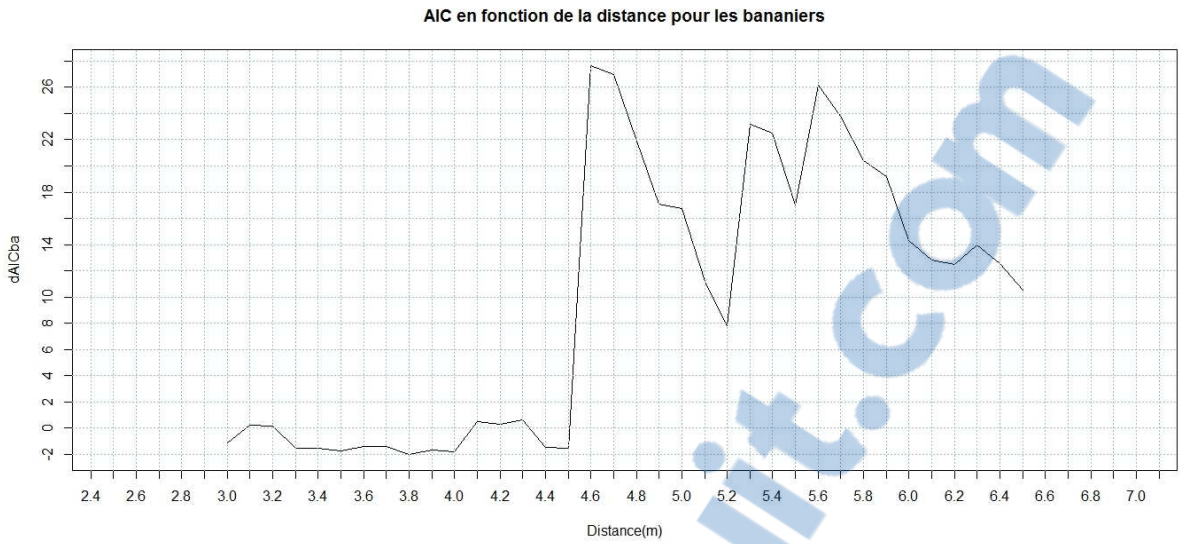
Graphique 6 : Variation de l'AIC pour le peuplement forestier

Dans le cas du peuplement forestier, on observe une forte variation de l'AIC à plusieurs distances. Nous retiendrons simplement la distance considérée comme la plus intéressante, celle présentant la plus forte variation : 5,3m (ΔAIC=76.47).



Graphique 7 : Variation de l'AIC pour le peuplement fruitier

Pour les fruitiers, la variation d'AIC la plus forte est de 6m (ΔAIC= 208.37).



Graphique 8 : Variation de l'AIC pour le peuplement bananier

Enfin, même si la variation de l'AIC est forte a plusieurs distances, on sélectionnera la distance de 4,6m pour les bananiers (ΔAIC=27.66).

Les distances que nous avons sélectionnées pour chaque peuplement seront les variables spatiales que nous testerons dans le modèle lors de l'étape suivante et que nous définiront de la façon suivante :

- nca= cacaoyer à 3,9m
- nfo= forestier à 5,3m
- nfu= fruitier à 6m
- nba= bananier à 4,6m.

Etape 2 : Construction d'un modèle intermédiaire avec les variables spatiales expliquant la variabilité de l'indice d'attaque

Nous avons construit un modèle uniquement avec les variables spatiales sélectionnées à l'étape précédente. Voici les résultats obtenus pour m_{inter}:

$$m_{inter} = glmer(mon \sim nca + nfo + nfu + nba + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

```
Model:
mon ~ nca + nfo + nfu + nba + (1 | parc)
       Df    AIC     LRT   Pr(Chi)
<none>    3168.1
nca     1 3316.0 149.894 < 2.2e-16 ***
nfo     1 3218.4  52.333 4.685e-13 ***
nfu     1 3367.5 201.359 < 2.2e-16 ***
nba     1 3182.5  16.440 5.022e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure 22 : Résultats du modèle intermédiaire

D'après les résultats, on constate que les variables spatiales sont toutes significatives (indiqué par les étoiles). La colonne « AIC » nous indique que le modèle avec l'AIC le plus faible (AIC=3168,1, soit le modèle le plus vraisemblable) est celui avec les quatre variables :

nca, nfo, nfu et nba. Cela signifie que ces variables impactent toutes la moniliose de façon significative.

```
Fixed effects:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  1.54731    0.32989   4.690 2.73e-06 ***
nca         -0.23852    0.01939 -12.298  < 2e-16 ***
nfo         -0.15994    0.02376  -6.732 1.67e-11 ***
nfu         -0.70869    0.05557 -12.753  < 2e-16 ***
nba          0.21784    0.05168   4.215 2.50e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure 23 : Résultats complémentaires du modèle intermédiaire

L'estimation (« Estimate ») nous donne des informations sur le comportement des quatre variables spatiales. On constate que nca, nfo et nfu ont des valeurs négatives (-0,23852 pour nca, -0,15994 pour nfo etc.) ; ces variables ont une corrélation négative avec l'incidence de la moniliose. On interprète ce résultat de la façon suivante : Plus il y a d'individus « cacaoyer » à 3,9m, moins le « cacaoyer suivi » est malade. Il en est de même pour les individus « forestier » à 5,3m et les « fruitier » à 6m. En revanche, la variable « nba » a une valeur positive (estimate nba= 0,21784). Cette variable est donc corrélée positivement à l'incidence de la moniliose. On peut faire la même interprétation que précédemment : plus il y a d'individus « bananier » à 4,6m, plus le « cacaoyer suivi » est malade.

Etape 3 : Construction d'un modèle final avec les variables expliquant la variabilité de l'indice d'attaque

Un précédent travail nous a permis de déterminer les variables qui avaient un impact sur la moniliose à l'échelle de la parcelle : la densité de cacaoyers du dispositif, la fréquence de la coupe sanitaire et le nombre de cabosses. Nous écartons les variables « densité de cacaoyer » et « coupe sanitaire » car bien qu'elles aient un impact significatif sur la moniliose, ces variables ne sont pas appréhendables à l'échelle de l'individu. Nous allons inclure uniquement la variable « cabosses totales » dans notre modèle. Cette variable représente le comptage de cabosse par « cacaoyer suivi » (elle varie pour chaque individu).

Nous avons construit un modèle avec les variables spatiales sélectionnées à l'étape précédente. Voici les résultats obtenus pour le modèle final : m_{final}.

$$m_{final} = glmer(mon \sim nca + nfo + nfu + nba + cabtot + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

```
Model:
mon ~ nca + nfo + nfu + nba + cabtot + (1 | parc)
       Df    AIC     LRT   Pr(Chi)
<none>    2159.7
nca     1 2166.1    8.43  0.003684 **
nfo     1 2175.3   17.69 2.606e-05 ***
nfu     1 2204.0   46.32 1.005e-11 ***
nba     1 2192.4   34.75 3.751e-09 ***
cabtot  1 3168.1 1010.44 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure 24 : Résultats du modèle final

D'après ces résultats, on constate que la totalité des variables sont significatives (indiqué par les étoiles). Le modèle avec l'AIC le plus faible est celui avec les cinq variables (AIC=2159,7, soit le modèle le plus vraisemblable). Ces variables impactent la moniliose de façon significative. On constate aussi qu'avec l'ajout de la variable « cabosses totales », l'AIC est plus faible qu'à l'étape 2 (AIC=2159,6 contre 3168,1 précédemment). Ceci nous indique que la variable « cabosses totales » impacte fortement l'indice d'attaque. C'est donc ce modèle que nous retiendrons.

```
Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  0.4989436  0.2821623    1.77  0.07701 .
nca         -0.0616363  0.0211546   -2.91  0.00357 **
nfo         -0.0973592  0.0240776   -4.04 5.26e-05 ***
nfu         -0.3634148  0.0563225   -6.45 1.10e-10 ***
nba         -0.3633408  0.0631743   -5.75 8.85e-09 ***
cabtot       0.0250809  0.0007691   32.61  < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

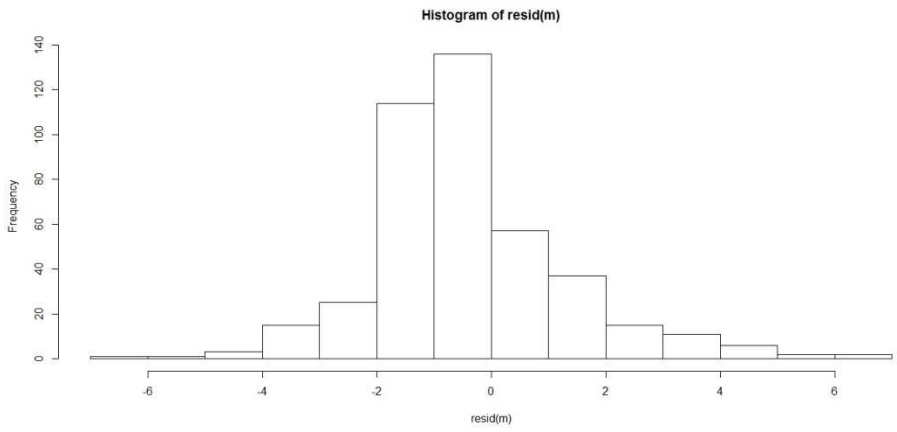
Figure 25 : Résultats complémentaires au modèle final

L'estimation (« estimate ») nous donne des informations sur le comportement des cinq variables retenues. On constate que nca, nfo, nfu et nba ont des valeurs négatives (-0,0616 pour nca, -0,0973 pour nfo etc.). Ceci signifie que ces variables ont une corrélation négative avec l'incidence de la moniliose. On interprète ce résultat de la façon suivante : Plus il y a d'individus « cacaoyer » à 3,9m, moins le « cacaoyer suivi » est malade. Il en est de même pour les individus « forestier » à 5,3m, les « fruitier » à 6m et les « bananier » à 4,6m. En revanche, la variable « cabosses totales » a une valeur positive (Estimate de cabtot= 0,0250). Cette variable est donc corrélée positivement à l'incidence de moniliose. On dira alors que plus il y a de cabosses, plus le « cacaoyer suivi » est malade.

Etape 4 : Vérification de la fiabilité du modèle

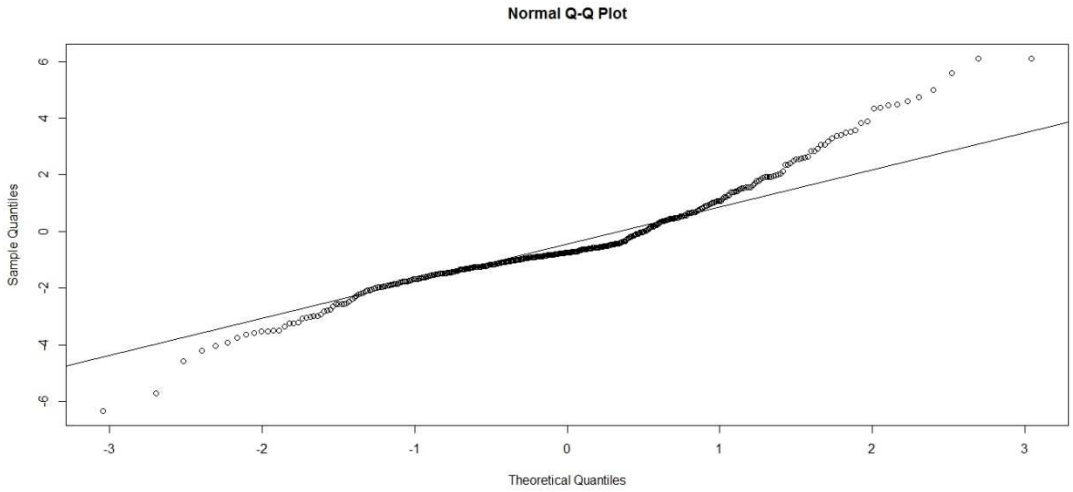
Examen des résidus du modèle *m final* :

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



Graphique 9 : Histogramme des résidus du modèle final

Les résidus de *m final* ont une allure proche d'une courbe de Gauss ce qui indique que la normalité est vérifiée.



Graphique 10 : Diagramme Quantile-Quantile des résidus du modèle final

Ce graphique confirme les résultats de l'histogramme. Les résidus (représentés par des points) sont proches de la courbe (représentant la loi normale). La normalité est ainsi vérifiée.

En revanche, le coefficient de détermination R^2= 0,52. Ceci signifie les variables de *m final* n'expliquent que partiellement (à 52%) l'indice d'attaque de la moniliose. Nous y reviendrons dans la partie suivante.

3.4.2 Résultats obtenus pour la pourriture brune

Nous avons effectué les mêmes analyses que pour la moniliose. Nous présenterons plus succinctement les résultats que précédemment, le détail de chaque étape figurant en annexe 8.

Etape 1 : Sélection de variables par construction de différents GLMM

Les distances que nous avons sélectionné pour chaque peuplement seront les variables spatiales que nous allons tester dans le modèle lors de l'étape suivante. Pour la suite de l'analyse, nous les définirons de la façon suivante :

- nca= cacaoyer à 5,4m

- nfo= forestier à 3,4m
- nfu= fruitier à 6,1m
- nba= bananier à 5,5m.

Etape 2 : Construction d'un modèle intermédiaire avec les variables spatiales expliquant la variabilité de l'indice d'attaque

$$m_{inter} = glmer(phy{\sim}nca + nfo + nfu + nba + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

D'après les résultats obtenus pour le modèle intermédiaire, l'intégralité des variables sélectionnées précédemment ont un impact significatif sur la pourriture brune. Nous les inclurons dans le modèle final et les testerons à l'étape suivante.

Etape 3 : Construction d'un modèle final avec les variables expliquant la variabilité de l'indice d'attaque

$$m_{final} = glmer(phy{\sim}nca + nfo + nfu + cabtot + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

D'après les résultats de *m final*, les variables spatiales nfo, nca et nfu ont été retenues. Ceci signifie qu'elles ont un impact significatif sur la pourriture brune. On constate que nca et nfo ont des valeurs négatives (-0,0835 pour nca, -0,1564 pour nfo). Ces variables ont une corrélation négative avec l'incidence de la pourriture brune. On dira que plus il y a d'individus « cacaoyer » à 5,4m, moins le « cacaoyer suivi » est malade. Il en est de même pour les individus « forestier » à 3,4m. En revanche, les variables « nfu » et « cabosses totales »ont des valeurs positives (0,5718 pour « nfu » et 0,0261 pour « cabtot »). Ces variables sont donc corrélées positivement à l'incidence de la pourriture brune. On peut faire la même interprétation que précédemment c'est-à-dire que plus il y a de cabosses, plus le « cacaoyer suivi » est malade. Pour les fruitiers, plus il y a d'individus fruitiers à 6,1m, plus le « cacaoyer suivi » est malade.

La variable nba, n'a pas d'impact significatif sur la pourriture brune c'est pourquoi elle n'est plus dans *m final*. Ceci signifie que le nombre de bananiers à 5,5m d'un cacaoyer n'ont pas d'influence sur l'indice d'attaque.

Etape 4 : Vérification de la fiabilité du modèle

L'histogramme des résidus et le diagramme Quantile-Quantile vérifient la normalité. Le modèle *m final* est correct.

En revanche, le coefficient de détermination R^2= 0,39. Ceci signifie que les variables de *m final* n'expliquent que partiellement (à 39%) l'indice d'attaque de la pourriture brune.

4 Discussion liée à l'étude

4.1 Avantages et limites de l'étude

4.1.1 L'analyse statistique

Lors de l'étude, nous avons mené des analyses statistiques à deux niveaux. A l'échelle de la parcelle, nous avions un échantillon de seulement 20 dispositifs. C'est peu pour conduire une étude statistique approfondie. En revanche, l'analyse à l'échelle individuelle nous a permis de passer d'un échantillon de 20 dispositifs à plus de 800 individus (cacaoyers suivis). Nous avons pu apporter des informations à l'échelle du cacaoyer, ce qui n'avait pas été fait dans la thèse de Cynthia Gidoin. Enfin grâce à la méthode des modèles linéaires mixtes généralisés, nous avons pu construire des modèles mettant en avant les distances pour lesquelles les peuplements influencent l'indice d'attaque.

4.1.2 Le comptage et la coupe sanitaire

La limite principale de cette étude fût le comptage des cabosses. Lors de la phase terrain, nous n'avons pu réaliser cette étape qu'une seule fois. Les données ne représentent donc qu'un instant t et non l'intégralité d'un cycle de production. N'ayant pas d'autres données, les indices d'attaques des dispositifs ont été calculés sur un seul relevé.

Cette phase a eu lieu au mois de juillet, à la période du premier pic de production. Cette étape est réalisée par plusieurs personnes : deux étudiantes agronomes et un technicien producteur de cacao. Ceci nous laisse penser que les maladies ne furent pas identifiées de la même façon par ces trois personnes, le producteur ayant un œil plus aguerri pour repérer les cabosses et distinguer les maladies. Il est, par exemple, parfois possible de confondre une chérelle (petit fruit) malade avec une chérelle simplement desséchée (processus naturel).

Le relevé n'a également pas toujours été réalisé au bon moment. Nous avions prévu de faire chaque comptage la veille du jour où le producteur devait réaliser la coupe sanitaire sur sa parcelle. Nous pouvions ainsi respecter les différentes fréquences de coupe, (cf. annexe 9) éléments utiles pour l'analyse de données. Cela n'a cependant pas toujours été possible pour des raisons de temps, de logistique et de disponibilité des producteurs.

Ainsi pour calculer les indices d'attaques de la moniliose et de la pourriture brune, nous nous sommes basés sur un seul relevé, réalisé par différentes personnes et à des instants pas toujours adaptés. Pour l'analyse des données, nous avons émis l'hypothèse que le comptage n'était pas influencé par ces éléments. C'est pourquoi les indices d'attaques calculés ne peuvent pas être complètement exacts.

Néanmoins, ces données de comptage nous ont permis de valider certaines hypothèses sur les variables influençant l'indice d'attaque des deux maladies : la pratique de la coupe sanitaire impacte l'incidence des maladies tout comme la densité des cacaoyers et la quantité de cabosses. Cela permet d'affirmer que nos données sont malgré cela représentatives.

4.2 Discussion générale

4.2.1 A l'échelle de l'individu

Nous allons discuter de la pertinence des variables mises en évidence par les modèles construits.

Pour les fruitiers

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Pour la moniliose et la pourriture brune, la présence d'arbres fruitiers à 6m fait baisser l'indice d'attaque des maladies. Cependant le nombre d'arbre fruitiers recensé sur les dispositifs est relativement faible puisqu'on ne compte que 90 fruitiers sur l'ensemble des dispositifs. Nos résultats sont donc à nuancer et à vérifier lors de prochaines études. Lors de sa thèse Cynthia Gidoin avait rencontré le même problème lors de ses analyses. La faible quantité des arbres fruitiers dans les agroforêts à cacaoyers du Costa Rica pose des difficultés d'analyse.

Pour les bananiers

Dans le cas de la moniliose, les bananiers situés à 4,6m d'un individu font baisser l'indice d'attaque. Cependant, comme dans le cas précédent, nous nuançons ces résultats car ils étaient assez peu représentés (184) sur les dispositifs cartographiés (d'autant plus que dans les travaux de Cynthia Gidoin, la densité de bananier ne semblait pas affecter significativement la moniliose). En revanche, nous soulignons que dans la majorité des cas, nous avions des groupes de bananiers et non une seule plante. Nous avons alors soulevé l'hypothèse suivante : les groupements de bananiers génèrent des conditions climatiques défavorables au développement de la moniliose.

Dans le cas de la pourriture brune, le bananier n'a pas d'influence significative sur l'indice d'attaque (d'après nos données). Cette maladie n'est pas influencée par les mêmes facteurs que la moniliose.

Pour les forestiers

D'après les travaux de Gidoin (2013), les forestiers impactent indirectement l'incidence de la moniliose, via la production. En d'autres termes, plus il y a de forestiers, moins il y a de cabosses, donc moins de tissus susceptibles d'être contaminés. Le nombre de forestier affectent la ressource : leurs présences permettent une régulation de l'attaque via la diminution de la production. D'après nos résultats nous consolidons une partie de son travail: nous confirmons que les forestiers diminuent l'indice d'attaque et nous amenons la notion de distance. Ce sont les forestiers situés à 5,3m qui font diminuer l'indice d'attaque. Quant à la pourriture brune, le nombre de forestiers présents à 3,4m diminuent l'intensité de la maladie. Nous avons comptabilisé 500 forestiers sur les dispositifs étudiés, cela nous laisse penser que c'est un nombre suffisant pour avoir des résultats statistiques relativement fiables.

Pour les cacaoyers

Le nombre de cacaoyers à 3,9m fait varier l'indice d'attaque de la moniliose. Pour la pourriture brune, c'est le nombre de voisins à 5,4m qui influence l'incidence de la maladie. Les cacaoyers étant le peuplement le plus représenté sur nos parcelles (plus de 2500 individus), nous considérons que l'échantillon est assez grand pour fournir des analyses fiables.

Contrairement aux forestiers, le nombre cacaoyers n'impacte pas la production.

Autre variable : « cabosses totales »

Enfin, pour les deux maladies nous avons montré que l'incidence variait selon la quantité de fruit. Cette hypothèse a été à la fois vérifiée dans les travaux de C.Gidoin ainsi que dans les nôtres, aussi bien à l'échelle individuelle qu'à l'échelle de la parcelle.

Nous avançons ainsi deux hypothèses sur la disposition des différents peuplements :

- La disposition des individus aux différentes distances évoquées fournissent des conditions microclimatiques défavorables au développement de ces deux maladies. Créer des conditions défavorables à *M.roreri* fait partie des moyens de lutte évoqués par Thévenin (1996).

- La disposition spatiale des individus entraîne un « effet barrière » et ainsi diminue la dispersion des spores. La vitesse des vents (principal facteur de propagation de la moniliose) alors moins importante freine la dissémination de la maladie.

Dans le cas où ces hypothèses seraient vérifiées, nous pourrions proposer aux producteurs des dispositions de peuplements efficaces comme moyen de lutte. Par exemple, pour le peuplement cacaoyers, nous proposerions un type de semis permettant d'augmenter le nombre de cacaoyer autour d'un individu.

Figure 26 : Différents types de semis de cacaoyers : classique (à gauche) et en « pied de poule » (à droite)

Lors d'un semis classique, les cacaoyers autour d'un individu sont limités à quatre. Or pour un semis en pied de poule, nous pouvons aller jusqu'à six cacaoyers. Voilà le type de solutions envisagées pouvant participer aux méthodes de luttes employées actuellement.

Plus généralement, il serait possible de proposer des lignes de conduites aux producteurs comme par exemple : augmenter la densité des cacaoyers, puisqu'elle permet de diminuer l'intensité des maladies sans impacter la production.

Retour sur les modèles

D'après nos résultats, les modèles construits n'expliquent que partiellement l'incidence des maladies : 52% pour la moniliose et 39% pour la pourriture brune. Cela signifie que les variables des modèles ne sont pas les seuls facteurs d'explication des indices d'attaque. Au vu de la différence de pourcentage entre les maladies, on peut dire que la pourriture brune n'est pas influencée par les mêmes facteurs explicatifs que la moniliose.

Dans la partie suivante nous évoquerons les autres variables ayant un effet sur l'incidence de la moniliose et de la pourriture brune.

4.3 Discussion à l'échelle de la parcelle

Non appréhendable à l'échelle individuelle, la fréquence de coupe sanitaire et la densité de cacaoyer jouent un rôle non négligeable sur l'incidence des maladies. A travers sa thèse, Cynthia Gidoin a montré que l'augmentation de la densité de cacaoyer entrainait une baisse de l'indice d'attaque de la moniliose. Ceci a également été démontré lors de notre étude[10]. Cependant elle n'apparait pas dans notre modèle statistique car cette donnée est

identique pour tous les cacaoyers d'un même dispositif. Elle ne donne pas d'information à l'échelle de l'individu, de même pour la coupe sanitaire.

5 Perspectives de l'étude

Nous pourrions vérifier les hypothèses évoquées dans la partie précédente par différents moyens :

Le relevé de données microclimatiques (température et humidité relative essentiellement) sur nos dispositifs nous permettrait de vérifier si la disposition de certains individus fournit des conditions microclimatiques défavorables au développement des maladies. Nous pourrions ainsi faire un lien avec les conditions de développement des deux champignons.

L'ombrage est également un élément important à analyser. Nous pourrions connaitre les différents types d'ombrage et les comparer avec les indices d'attaques, en mesurant l'ombrage sur les dispositifs à l'aide d'un densimètre. Cet appareil est un ensemble de miroirs servant à mesurer la quantité d'ombre fournie par le couvert des fruitiers et forestiers.

Pour la pourriture brune, nous savons que les insectes sont un facteur de propagation de la maladie. Nous pourrions alors nous intéresser à cet aspect en réalisant sur nos parcelles agroforestières, un inventaire des insectes susceptibles de transmettre cette maladie.

Conclusion générale

L'objectif de notre étude était de déterminer l'influence de la variation du voisinage (par la qualité et la quantité d'individus) sur l'indice d'attaque des bioagresseurs du cacaoyer en systèmes agroforestiers. Nous avons étudié le cas de la moniliose et de la pourriture brune, deux maladies fongiques responsables de la baisse de la production cacaoyère dans la zone d'Upala.

La cartographie nous a permis de déterminer la structure spatiale des dispositifs et de caractériser les différents peuplements présents dans ces agroforêts à cacaoyers : forestiers, fruitiers et bananiers. A partir de ces éléments, nous avons pu déterminer l'environnement local des cacaoyers.

A l'échelle de l'individu, nous avons établi l'influence de chaque peuplement sur l'incidence des maladies. La présence d'arbres forestiers et fruitiers à une distance donnée fait diminuer l'indice d'attaque d'un cacaoyer. La présence d'autres cacaoyers ont le même effet. Quant aux bananiers, ils influencent seulement l'indice d'attaque de la moniliose. Ces résultats nous permettent lors des analyses faites, de valider notre hypothèse de départ : la variation du voisinage influence l'incidence de la moniliose et de la pourriture brune.

La disposition des individus dans les agroforêts peut donc participer à la lutte contre ces maladies fongiques. Elle s'inscrit dans le cadre de régulation agroécologique des bioagresseurs. Cette solution pourrait être proposée aux producteurs lors de la mise en place de leurs plantations. Néanmoins, d'autres éléments que le voisinage des cacaoyers entrent en jeu : la coupe sanitaire, l'emploie de clones résistants, etc. On peut imaginer que la solution la plus efficace serait de combiner l'ensemble de ces méthodes pour lutter au mieux contre ces bioagresseurs, nécessitant des connaissances plus approfondies de la part des producteurs.

Finalement, cela reste une thématique assez complexe, un peu comme à l'image des systèmes agroforestiers.

Rapport-Gratuit.com

Bibliographie

AFAF. 2014. L'agroforesterie en 10 questions. *Association Française d'Agroforesterie.* [En ligne] 2014. http://www.agroforesterie.fr/agroforesterie-contributions.php.

Aime, M.C. et Phillips-Mora, W. 2005. The causal agents of witches' broom and frosty pod rot of cacao (chocolate, Theobroma cacao) form a new lineage of Marasmiaceae. *The Mycological Society of America.* 2005, pp. 1012–1022.

Alcamo, J., et al. 2003. *Les écosystèmes et le bien être de l'Homme: un cadre d'évaluation* . 2003. p. 28, Résumé du rapport du Groupe de travail sur le cadre conceptuel de l'Evaluation des écosystèmes pour le Millénaire.

Bailly-Bechet. ND. Notes de cours de biostatistiques-Vraisemblance. Université Claude Bernard Lyon 1 Lyon : s.n., ND. p. 14.

Barrel, M, et al. 2009. Le cacaoyer. [auteur du livre] Collectif. *Le memento de l'agronome.* s.l. : Quae, 2009.

Baudot, J.Y. 2008. Le coefficient de corrélation de Pearson. *Concepts et techniques utilisés en entreprises, enfinances et en économie.*

Bayala, J. ND. La pratique de la gestion durable des terres. ND. pp. 132-147.

Brasier, C.M. 1969. The effect of the light and temperature on reproduction in vitro in two tropical species of phytophthora. 1969, 52, pp. 105-113.

Brooks, F. 2005. Phytophthora palmivora. *Pests and Diseases of American Samoa No. 12.* [En ligne] 2005. [Citation : 12 Mai 2015.] http://www2.ctahr.hawaii.edu/adap/ASCC_LandGrant/Dr_Brooks/BrochureNo12.pdf.

Carion, J.F. 2014. Mieux connaitre le pouvoir pathogène des champignons. *ACCES.* [En ligne] 2014. http://acces.ens-lyon.fr/evolution/biodiversite/accompagnement-pedagogique/accompagnement-au-lycee/pomme-pomme-pomme/une-bonne-pomme-aujourdhui/mieux-connaitre-le-pouvoir-pathogene-des-champignons/.

Chevalier, F. et Le Bellac, J. 2013. La Classification. [éd.] Faculté des sciences économiques. [Document Power Point]. Rennes : s.n., 2013.

Cilas, C. 2004. *Improvement of cocoa tree resistance to phytophthora diseases.* s.l. : Quae, 2004. 9782876145627.

Climate-data. ND. Climat: Upala. *Climate-data.org.* [En ligne] ND. http://fr.climate-data.org/location/52101/.

CNUCED;OMC. 2001. *Cacao: Guide des pratiques commerciales.* Genève : s.n., 2001. p. 190. ISBN 92-9137-181-5.

Cooke, D.E.L., et al. 2000. A Molecular Phylogeny of Phytophthora and related Oomycetes. 2000, 30, pp. 17-32.

Deheuvels, O. 2011. *Compromis entre productivité et biodiversité sur un gradient d'intensité de gestion de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers de Talamanca, Costa Rica.* Montpellier : s.n., 2011. p. 185, Thèse de doctorat.

End, M.J., Daymond, A.J. et Hadley, P. 2014. *Guide technique pour les transferts sécurisés de matériel génétique de cacoyer. Révision des directives techniques FAO/IPGRI.* Bioversity International; CacaoNet. 2014. p. 90. 978-92-9043-989-9.

Erwin, D. C et Ribeiro, O.K. 1996. *Phytophtora diseases worlwide.* St Paul : The American Phytopathological Society, 1996. 0-89054-212-0.

Erwin, DC, Bartnicki-Garcia, S et Tsao, PH. 1983. *Phytophtora, its biology, taxonomy, ecology and pathology.* St Paul : The american Phytopathological Society, 1983. 0-89054-084-5.

Evans, H. C. 2007. Cacao Diseases—The Trilogy Revisited. *Phytopathology.* 2007, 97, pp. 1640-1643.

Ezzine de Blas,D. 2013. Les services écosystémiques. 2013. p. 2.

Gidoin, C. 2013. *Relations entre structure du peuplement végétal et bioagresseurs dans les argoforêts à cacaoyer. Application à trois bioagresseurs du cacaoyer: la moniliose au Costa Rica, la pourriture brune et les mirides au Cameroun.* 2013. Thèse de doctorat.

González, R. et Isabel, S. 2008. La moniliasis un desafio para lograrla sostenibilidad del sistema cacao en México. 2008, Vol. 21-1, pp. 97-110.

Goreaud, F. 2000. *Apport de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et la modélisation des peuplements complexes.* Nancy : s.n., 2000. p. 524, Thèse de doctorat.

Guest, D. 2007. Black Pod: Diverse Pathogens with a Global Impact on Cocoa Yield. *The American Phytopathological Society.* University of Sydney, 2007, Vol. 97, 12, pp. 1650-1653.

INEC. 2014. *Censo Nacional Agropecuario.* 2014. Rapport annuel.

Jagoret, P. 2011. *Analyse et évaluation de systèmes agroforestiers complexes sur le long terme: Application aux systèmes de culture à base de cacaoyer au Cenre Cameroun.* 2011. p. 236, Thèse de doctorat.

Jagoret, P. 2012. Comment évaluer les services écosystémiques des systèmes agroforestiers? [Document Power Point]. 2012.

Jagoret, P., Deheuvels, O. et Bastide, P. 2014. S'inspirer de l'agroforesterie. *Perspective.* mai 2014, 27, p. 4.

Jagoret, P., Deheuvels, O. et S., Saj. 2015. L'agroforesterie en zone humide: une opportunité pour la cacaoculture. [Document Power Point]. Paris : s.n., 2015.

Krauss, U et Soberanis, W. 2002. Effect of fertilization and biocontrol application frequency on cocoa pod diseases. *Biological Control.* 2002.

Lancelot, R. et Lesnoff, M. 2005. Sélection de modèles avec l'AIC et critères d'information dérivés. 2005. p. 7.

Mariau, D. 1999. *Les maladies des cultures perennes tropicales.* [éd.] Editions Quae. 1999. p. 308. 978-2-7592-0649-0.

Mathieu-Dupas, E. 2010. *Algorithme des k plus proches voisins pondérés et application en diagnostic.* Montpellier : s.n., 2010. HAL Id: inria-00494814.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Modgen. 2007. Modèles Linéaires Généralisés. [Document Power Point]. 2007.

Mossu, G. 1990. *Le cacaoyer.* Paris : Maisonneuve & Larose, 1990. p. 304.

Muller, R.A. 1973. Bilan des connaissances pratiques concernant le Phytophthora palmivora sur cabosses. 1973, 20, pp. 9-14.

Ngo Bieng, M.A. 2007. *Construction de modèles de structure spatiale permettant de simuler des peuplements virtuels réalistes. application aux peuplements mélanges chêne sessile - pin sylvestre de la région Centre.* 2007. Thèse de doctorat. HAL Id: pastel-00003350.

Noël Walter, Jean-Michel. 2001. *La méthode de Ripley pour l'analyse des structures patiales ponctuelles en écologie.* Strasbourg : Université Louis Pasteur, 2001.

Pedrono, M., et al.. ND. *Les services écosystémiques face au changement climatique.* ND. pp. 236-245.

Philips-Mora, W. et Cerda, R. 2009. *Catalogo: Enfermedades del cacao en Centroamérica.* CATIE. Turrialba : s.n., 2009. p. 24, Manuel technique. ISBN 978-9977-57-501-8.

Phillips-Mora, W, Arciniegas-Leal, A et Mata-Quirós, A. 2012. *Catálogo de clones de cacao.* s.l. : CATIE, 2012.

Phillips-Mora, W. et Wilkinson, M.J. 2007. Frosty Pod of Cacao: A Disease with a Limited Geographic Range but Unlimited Potential for Damage. *The American Phytopathological Society.* 2007, Vol. 97, 12, pp. 1644-1647.

Phillips-Mora, W. 2003. *Origin, biogeography, genetic diversity and taxonomic affinities of the cacao (Theobroma cacao L.) fungus Moniliophthora roreri (Cif.) Evans et al. as determined using molecular, phytopathological and morpho-physiological evidence.* De. s.l. : Department of Agricultural Botany, School of Plant Sciences, The University of Reading, 2003. p. 349, Thèse de doctorat.

Phillips-Mora, W., Arciniegas-Leal, A. et Mata-Quiros, A. 2012. *Catalogo de clones de cacao seleccionados por el CATIE para siembras comerciales.* [éd.] CATIE. Turrialba : s.n., 2012. p. 66. 978-9977-.

Phillips-Mora, W., Mata Quiros, A. et MArcela Arciniegas, A. 2014. *Diagnostico Agronomico de las plantaciones de cacao (Theoboma cacao L) de los y las asociados de Coopecacao Norte Norte R.L.* Turrialba : Catie, 2014. p. 93.

Ploetz, R. 2007. Cacao diseases: Important Treats to Chocolate Production Worldwide. *The American Phytopathological Society.* 2007, pp. 1634-1638.

Ploetz, RC. 2006. *Cacao diseases : Important Threats to Chocolate Production Worldwide.* Québec city : The American Phytopathological Society, 2006. 10.1094/PHYTO-97-12-1634.

R Documentation. ND. Length of an Object. *stat.ethz.ch.* [En ligne] ND. https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/base/html/length.html.

Roch, G. ND. Modèles Linéaires à Effets Mixtes. [Document Power Point]. Marseille : s.n., ND.

Sabourin, A. et Salmon, J. ND. *Méthodes des k-plus proches voisins.* p. 3.

Sánchez Mora, F.D. et F.R., Garcés Fiallos. 2012. Moniliophthora roreri (Cif y Par) Evans et al. en el cultivo de cacao. *Scienta Agropecuaria.* 2012, 3, pp. 249-258.

Thévenin, J.M. et Trocamé, O. 1996. La moniliose du cacaoyer. *Plantations, recherche, développement.* 1996, pp. 397-401.

Torquebiau, E. 2000. A renewed perspective on agroforetry concept and classification. 2000, 323.

Torquebiau, E. 2007. *L'Agroforesterie des arbres et des champs.* Paris : L'Harmattan, 2007. p. 151. 978-2-296-03434-1.

Widmer, T.L. 2014. Phytophthora palmivora. *Forest Phytophthoras.* 2014, 4.

Table des annexes

Annexe 1 : Photographie du dispositif mis en place lors de la cartographie (Curtet, 2015).... 66
Annexe 2 : Script permettant de réaliser la carte du dispositif et son analyse spatiale 66
Annexe 3 : Script de la CAH 68
Annexe 4 : Script de la caractérisation du voisinage et GLMM 68
Annexe 5 Dendrogramme de la pourriture brune 75
Annexe 6 : Extrait de la matrice des cacaoyers suivis 75
Annexe 7 Histogrammes de la distribution des cacaoyers suivis en fonction de l'incidence de la moniliose (en premier) et de la pourriture brune (en second) 75
Annexe 8:Résultats détaillés pour la pourriture brune 76
Annexe 9 : Tableau des différentes fréquences de coupe sanitaire exercées sur les dispositifs cartographiés 82

Annexe 1 : Photographie du dispositif mis en place lors de la cartographie (Curtet, 2015)

Annexe 2 : Script permettant de réaliser la carte du dispositif et son analyse spatiale

```
####################Parcelle P38_AGAPITO###################
#Package
library(ads)
#swin
#swin(window=c(xmin,ymin,xmax,ymax))
P38<-swin(c(-20,0,20,40))
summary(P38)
plot(P38)
D38<-read.table(file="P38_AGAPITO.csv",h=T,sep=";",dec=",")
str(D38)
summary(D38)
#carte
D38mark<-D38[,5]
D38pos<-D38[,2:3]
D38.pp = spp(D38pos,y=NULL, P38, marks= D38mark,int2fac=TRUE)
plot(D38.pp,main="Parcela Agapito")
#ANALYSE UNIVARIEE:RIPLEY#

D38ca<-subset(D38,Code=="ca")
```

```
D38ca$Point.ID<-NULL
D38ca$Height<-NULL
D38ca$Code<-NULL
summary(D38ca)
D38ca.pp = spp(D38ca,win=P38)
plot(D38ca.pp,main="D38 cacaoyers")
resD38ca=kfun(D38ca.pp,20,1,500,0.01,0.01)
plot(resD38ca)
plot.fads(resD38ca,opt = "L",main = NULL)
resD38ca$l
write.table(resD38ca$l, file='Res_ca_P38.csv',sep =';')
D38ba<-subset(D38,Code=="ba")
D38ba
str(D38ba)
#ba<10 => pas de carte pour le peuplement bananier
D38fo<-subset(D38,Code=="fo")
summary(D38fo)
D38fo$Point.ID<-NULL
D38fo$Height<-NULL
D38fo$Code<-NULL
D38fo
D38fo.pp = spp(D38fo,win=P38)
plot(D38fo.pp,main="D38 forestiers")
resD38fo=kfun(D38fo.pp,20,1,500,0.01,0.01)
plot(resD38fo)
plot.fads(resD38fo,opt = "L",main = NULL)
resD38fo$l
write.table(resD38fo$l, file='Res_fo_P38.csv',sep =';')
D38fu<-subset(D38,Code=="fu")
D38fu
summary(D38fu)
D38fu$Point.ID<-NULL
D38fu$Height<-NULL
```

```
D38fu$Code<-NULL
D38fu
D38fu.pp = spp(D38fu,win=P38)
plot(D38fu.pp,main="D38 fruitiers")
resD38fu=kfun(D38fu.pp,20,1,500,0.01,0.01)
plot(resD38fu)
plot.fads(resD38fu,opt = "L",main = NULL)
resD38fu$l
write.table(resD38fu$l, file='Res_fu_P38.csv',sep =';')
```

Annexe 3 : Script de la CAH

```
taille=20
Mfinale <- matrix(data=0, nr=16, nc=3*taille)
Mfinale
#DISPOSITIF 10
L<-read.table(file="RES_G_P10.csv",h=T,sep=";")
ligne=1
for (r in 1:taille)
{ Mfinale [ligne,r] <- L[r,1]
  Mfinale [ligne,taille + r] <- L[r,2]
  Mfinale [ligne,2*taille + r] <- L[r,3]
}
Mfinale
#même manip’ pour l’ensemble des dispositifs
#Construction du dendrogramme
sum((Mfinale[1, ] - Mfinale[2, ])^2)
dMfinale <- dist(Mfinale)
as.matrix(dMfinale)[1,2]^2
Dfinal <- hclust(d = dMfinale, method = "ward.D2")
plot(Dfinal, main= "Dendrogramme des dispositifs Upala",
xlab = "dispositifs", sub = "")
```

Annexe 4 : Script de la caractérisation du voisinage et GLMM

```
library(lme4)
```

```
t<-read.table("upalaind.csv",h=T,sep=";",dec=",")
t$parc=paste("P", t$num, sep="")
parc=unique(t$parc)
tc=subset(t, Code=="ca" & mon>=0)
t1<-na.omit(t)
par(mfcol=c(2,3))
for(i in c(1:length(parc)))
  {
    tt=t[t$parc==parc[i],]
    plot(North~East, data=tt)
  }
sensi=data.frame(dist=seq(0,6.5, by=0.1))
sensi$dAICca=sensi$dAICfo=sensi$dAICfu=sensi$dAICba=NA
t$nfo=t$nfu=t$nba=t$nca=NA
for(di in c(1:nrow(sensi)))
{
dt=subset(t, Code=="SSSSS")
for(i in c(1:length(parc)))
  {
    ttc=t[t$parc==parc[i] & t$Code=="ca",]
    ttm=subset(ttc, mon>=0)
    xmin=min(ttm$East)
    xmax=max(ttm$East)
    ymin=min(ttm$North)
    ymax=max(ttm$North)


    ttm$border=NA
    for(l in 1:nrow(ttm))
      {
        ttm$border[l]=min(abs(ttm$East[l]-xmin), abs(ttm$East[l]-xmax), abs(ttm$North[l]-ymin),
abs(ttm$North[l]-ymax))
      }
    ttm=subset(ttm, border>5.5)
    ttfo=t[t$parc==parc[i] & t$Code=="fo",]
```

```
    if(nrow(ttfo)>0){ttfo$dist=NA}
    ttba=t[t$parc==parc[i] & t$Code=="ba",]
    if(nrow(ttba)>0){ttba$dist=NA}
    ttfu=t[t$parc==parc[i] & t$Code=="fu",]
    if(nrow(ttfu)>0){ttfu$dist=NA}
    for(j in 1:nrow(ttm))
    {
     x=ttm$East[j]
     y=ttm$North[j]
     ttc$dist=sqrt( (ttc$East-x)^2 +  (ttc$North-y)^2   )
     ttm$nca[j]=nrow(ttc[ttc$dist<sensi$dist[di] & ttc$dist>0, ])
     ttfo$dist=sqrt( (ttfo$East-x)^2 +  (ttfo$North-y)^2   )
     ttm$nfo[j]=nrow(ttfo[ttfo$dist<sensi$dist[di] , ])
         ttba$dist=sqrt( (ttba$East-x)^2 +  (ttba$North-y)^2   )
     ttm$nba[j]=nrow(ttba[ttba$dist<sensi$dist[di] , ])
         ttfu$dist=sqrt( (ttfu$East-x)^2 +  (ttfu$North-y)^2   )
     ttm$nfu[j]=nrow(ttfu[ttfu$dist<sensi$dist[di] , ])
     }
 dt=rbind(dt,ttm)
  }
m0=glmer(mon~(1|parc), data=dt, family=poisson)
    if(sum(dt$nca)>400)
    {
    m=glmer(mon~nca+(1|parc), data=dt, family=poisson)
    sensi$dAICca[di]=AIC(m0)-AIC(m)
    }
    if(sum(dt$nfo)>100)
    {
    m=glmer(mon~nfo+(1|parc), data=dt, family=poisson)
    sensi$dAICfo[di]=AIC(m0)-AIC(m)
    }
    if(sum(dt$nfu)>80)
    {
```

```
    m=glmer(mon~nfu+(1|parc), data=dt, family=poisson)

    sensi$dAICfu[di]=AIC(m0)-AIC(m)

    }

    if(sum(dt$nba)>50)

    {

    m=glmer(mon~nba+(1|parc), data=dt, family=poisson)

    sensi$dAICba[di]=AIC(m0)-AIC(m)

    }

 print(di)

}

par(mfcol=c(2,2))

plot(ttm$mon~parc)

plot(dAICca~dist, sensi, type="l", main="AIC en fonction de la distance pour les
cacaoyers",xlab="Distance(m)",lab=c(40,20,0),xlim=c(2.5,7))

grid(col = "lightblue3", lty = "dotted", lwd = 1)

plot(dAICfo~dist, sensi, type="l", main="AIC en fonction de la distance pour les
forestiers",xlab="Distance(m)",lab=c(40,20,0),xlim=c(2.5,7))

grid(col = "lightblue3", lty = "dotted", lwd = 1)

plot(dAICfu~dist, sensi, type="l", main="AIC en fonction de la distance pour les
fruitiers",xlab="Distance(m)",lab=c(40,20,0),xlim=c(2.5,7))

grid(col = "lightblue3", lty = "dotted", lwd = 1)

plot(dAICba~dist, sensi, type="l", main="AIC en fonction de la distance pour les
bananiers",xlab="Distance(m)",lab=c(40,20,0),xlim=c(2.5,7))

grid(col = "lightblue3", lty = "dotted", lwd = 1)

####Modèle

dt=subset(t, Code=="SSSSS")

for(i in c(1:length(parc)))

  {

    ttc=t[t$parc==parc[i] & t$Code=="ca",]

    ttm=subset(ttc, mon>0)


 ttc=t[t$parc==parc[i] & t$Code=="ca",]

    ttm=subset(ttc, mon>=0)

    xmin=min(ttm$East)

    xmax=max(ttm$East)
```

```
ymin=min(ttm$North)

ymax=max(ttm$North)


ttm$border=NA

for(l in 1:nrow(ttm))

  {

    ttm$border[l]=min(abs(ttm$East[l]-xmin), abs(ttm$East[l]-xmax), abs(ttm$North[l]-ymin),
abs(ttm$North[l]-ymax))

   }

ttm=subset(ttm, border>5.5)

ttfo=t[t$parc==parc[i] & t$Code=="fo",]

if(nrow(ttfo)>0){ttfo$dist=NA}

ttba=t[t$parc==parc[i] & t$Code=="ba",]

if(nrow(ttba)>0){ttba$dist=NA}

ttfu=t[t$parc==parc[i] & t$Code=="fu",]

if(nrow(ttfu)>0){ttfu$dist=NA}



for(j in 1:nrow(ttm))

{

 x=ttm$East[j]

 y=ttm$North[j]

 ttc$dist=sqrt( (ttc$East-x)^2 +  (ttc$North-y)^2   )

 ttm$nca[j]=nrow(ttc[ttc$dist<3.9 & ttc$dist>0, ])

 ttfo$dist=sqrt( (ttfo$East-x)^2 +  (ttfo$North-y)^2   )

 ttm$nfo[j]=nrow(ttfo[ttfo$dist<5.3 , ])


 ttba$dist=sqrt( (ttba$East-x)^2 +  (ttba$North-y)^2   )

 ttm$nba[j]=nrow(ttba[ttba$dist<4.6 , ])


 ttfu$dist=sqrt( (ttfu$East-x)^2 +  (ttfu$North-y)^2   )

 ttm$nfu[j]=nrow(ttfu[ttfu$dist<6.0 , ])

 }

dt=rbind(dt,ttm)
```

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

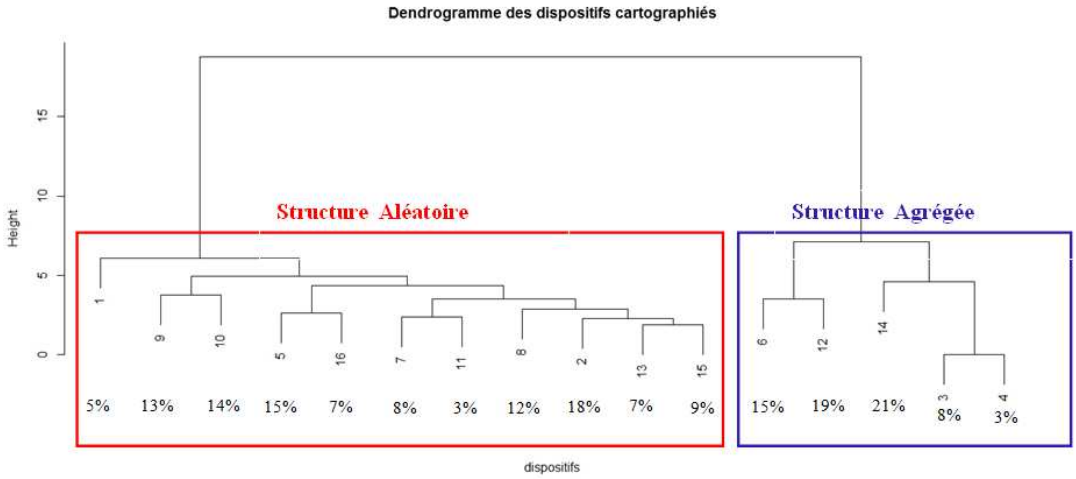
```
  }
m0=glmer(mon~(1|parc), data=dt, family=poisson)
m=glmer(mon~nca+(1|parc), data=dt, family=poisson)
dAICca=AIC(m0)-AIC(m)
m=glmer(mon~nfo+(1|parc), data=dt, family=poisson)
dAICfo=AIC(m0)-AIC(m)
m=glmer(mon~nfu+(1|parc), data=dt, family=poisson)
dAICfu=AIC(m0)-AIC(m)
m=glmer(mon~nba+(1|parc), data=dt, family=poisson)
dAICba=AIC(m0)-AIC(m)
dAICca
dAICfo
dAICfu
dAICba

#########Modèles
##Avec les variables spatiales
m=glmer(mon~nca+nfo+nfu+nba+(1|parc), data=dt, family=poisson)
drop1(m, test="Chisq")
##avec ajout des autres variables
m=glmer(mon~nca+nfo+nfu+nba+cabtot+(1|parc), data=dt, family=poisson)
drop1(m, test="Chisq")
summary(m)
 ranef(m, condVar = FALSE,
    drop = FALSE, postVar=FALSE)
plot(ranef(m))
plot(m)
###############Visualisation de données
#Identification de la distribution
hist(t$mon,main="Histogramme : Taux de moniliose", xlab="Taux de moniliose (%)", ylab="Fréquence")
x11()
hist(t$phy, main="Histogramme : Taux de pourriture brune", xlab="Taux de pourriture brune (%)",
ylab="Fréquence")
#Appréciation du modèle : étude des résidus
```

```
hist(resid(m))
AIC(m)
par(mfrow=c(2,2))
plot(m)
#examen des résidus
plot(resid(m),main="Graphique des résidus")
qqnorm(resid(m))
qqline(resid(m))
#calcul R²
FR2(m, dt) renvoie le R2

install.packages("AICcmodavg",dependencies=TRUE)
library(AICcmodavg)
FR2=function(m,dt)
  {
  p=predictSE.merMod(m, dt, type="response", se.fit=F)
  d=as.data.frame(cbind(dt$mon, p))
  colnames(d)=c("obs","pred")
  d=na.omit(d)
  R2=cor(d$obs,d$pred)^2
  return(R2)
  }
FR2(m,dt)
```

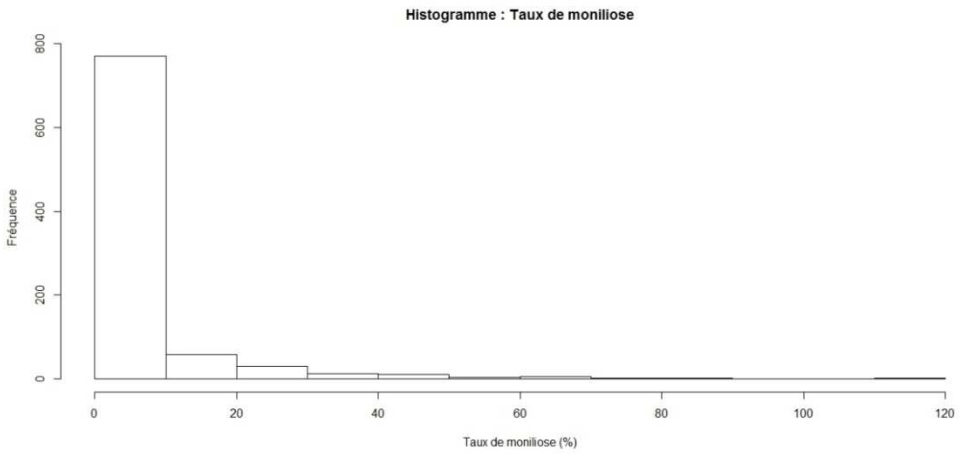
Annexe 5 : Dendrogramme de la pourriture brune

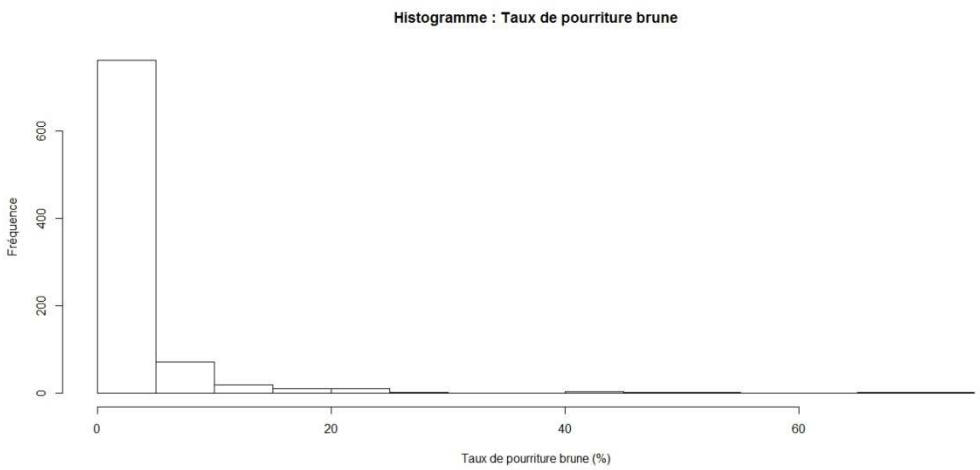


Annexe 6 : Extrait de la matrice des cacaoyers suivis

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	num	point	East	North	mon	phy	cabtot	car1	car2	car3	car4	car5	car6	car7	car8	car9	car10
2	4	CA034	7.349	11.784	46	10	56	0	0	0	1	5	6	9	11	15	
3	4	CA038	-9.942	12.282	0	0	0	0	0	2	3	5	8	12	16	20	
4	4	CA046	-7.206	15.811	26	0	26	0	0	1	4	7	9	12	17	21	
5	4	CA057	6.337	18.555	46	18	64	0	0	0	1	1	4	8	10	15	
6	4	CA060	-5.736	19.24	0	0	0	0	0	1	6	6	11	13	17	22	
7	4	CA071	-6.461	22.857	7	0	13	0	1	2	3	6	9	11	16	21	
8	4	CA073	-2.354	23.093	11	0	11	0	0	1	4	6	8	10	14	19	
9	4	CA085	6.892	26.903	6	3	11	0	0	0	2	6	6	8	11	15	
10	4	CA088	-3.744	26.723	23	0	23	0	0	0	2	6	7	10	14	20	
11	4	CA089	-9.906	27.167	53	0	55	0	0	0	1	6	8	11	16	20	
12	10	CA071	-5.977	29.112	0	0	5	0	0	1	4	5	8	11	17	23	
13	10	CA072	-0.552	29.255	0	0	0	0	0	0	2	4	7	9	15	21	
14	10	CA073	6.487	28.577	0	0	4	0	0	0	3	6	7	11	17	21	
15	10	CA096	-8.4	21.892	0	0	1	0	0	1	3	5	9	11	16	19	
16	10	CA101	3.233	21.929	0	2	10	0	0	0	4	6	7	10	14	20	
17	10	CA108	9.483	18.418	0	0	14	0	0	1	3	5	8	9	16	19	
18	10	CA109	6.68	18.311	4	1	31	0	0	2	5	7	9	11	14	19	
19	10	CA119	-6.41	15.068	0	0	6	0	0	2	5	5	7	9	16	20	
20	10	CA121	-0.892	15.015	0	0	8	0	0	2	4	5	10	12	17	22	
21	10	CA125	4.744	15.112	0	0	12	0	0	1	6	6	9	12	16	20	
22	10	CA131	0.865	11.711	0	3	96	0	0	2	6	6	11	12	17	22	
23	15	CA047	-8.833	29.548	3	0	17	0	0	1	4	5	8	14	19	22	
24	15	CA048	-8.891	26.191	1	0	12	0	0	2	4	6	7	14	21	23	
25	15	CA053	-9.227	11.625	2	0	5	0	0	2	4	6	8	10	14	15	

Annexe 7 Histogrammes de la distribution des cacaoyers suivis en fonction de l'incidence de la moniliose (en premier) et de la pourriture brune (en second)





Annexe 8: Résultats détaillés pour la pourriture brune

Etape 1 : Sélection de variables par construction de différents GL2M

Le modèle nul :

$$M0 = glmer(phy^{11} \sim (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

Le modèle pour chaque peuplement :

$$m_{cacaoyer} = glmer(phy \sim nca + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

$$m_{forestier} = glmer(phy \sim nfo + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

$$m_{fruitier} = glmer(phy \sim nfu + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

$$m_{bananier} = glmer(phy \sim nba + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

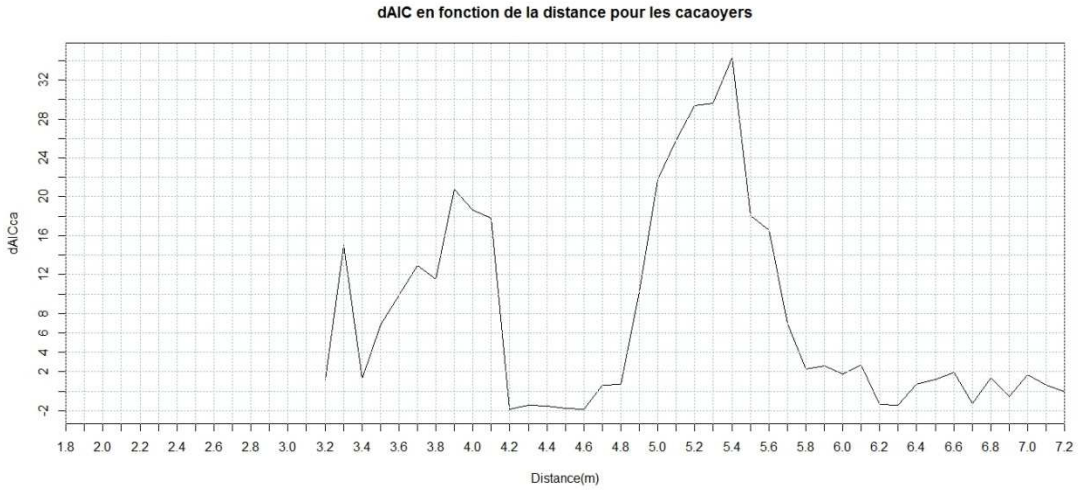
La variation de l'AIC :

$$\Delta AIC = AIC(M0) - AIC(M)$$

L'ensemble des graphiques ci-dessous représentent la variation d'AIC (ΔAIC) en fonction de la distance.

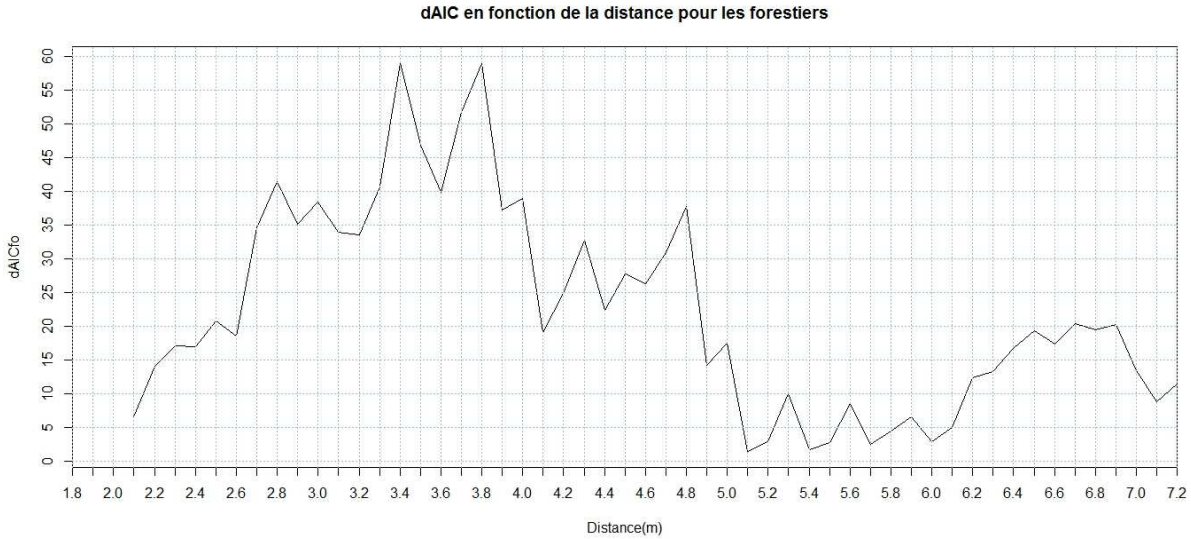
[11] phy=pourriture brune (phytophtora)

Variation de l'AIC pour le peuplement cacaoyer



Pour chaque variable, on va sélectionner la distance pour laquelle ΔAIC est le plus fort. Pour les cacaoyers, la variation d'AIC est la plus forte à 5,4m (ΔAIC= 34,35).

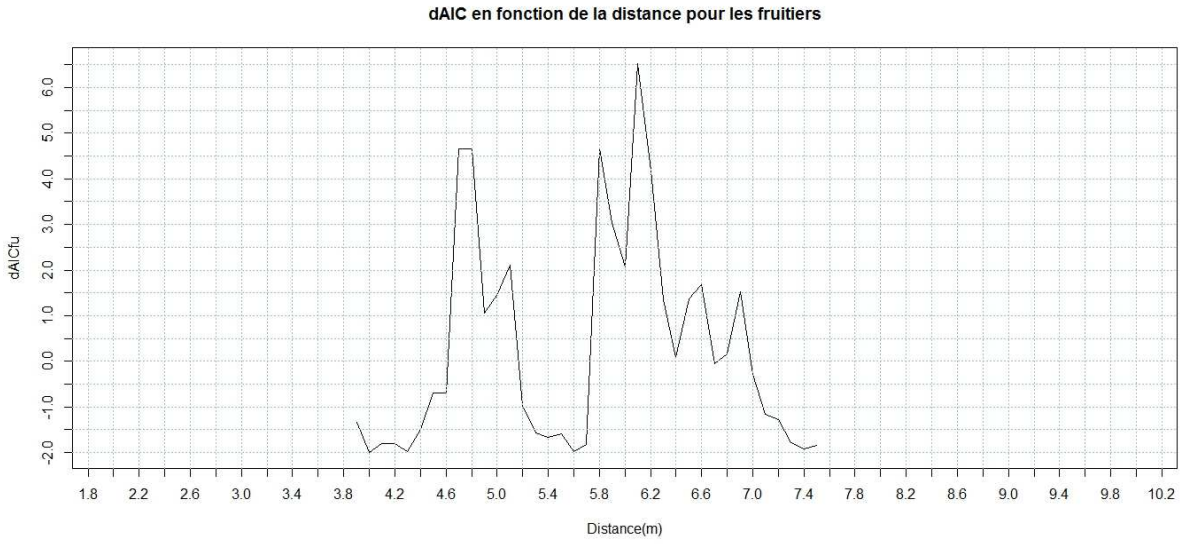
Variation de l'AIC pour le peuplement forestier



Dans le cas du peuplement forestier, on observe une forte variation de l'AIC à plusieurs distances. Nous retiendrons simplement la distance considérée comme la plus intéressante qui est 3,4m (ΔAIC=59,13).

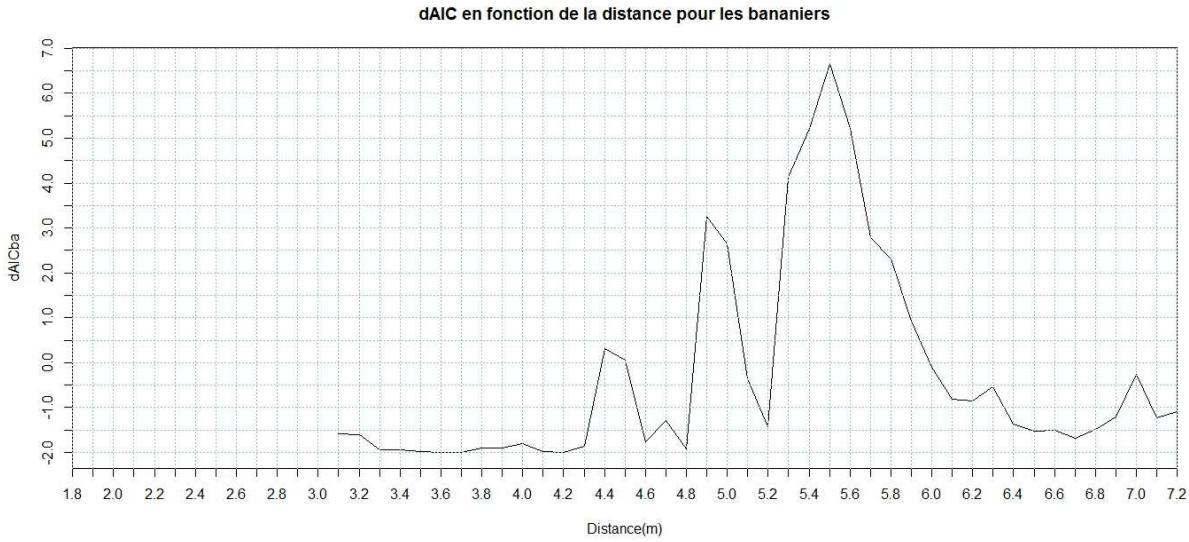
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Variation de l'AIC pour le peuplement fruitier



Pour les fruitiers, la variation d'AIC la plus forte est bien distincte. On retiendra la distance de 6,1m (ΔAIC= 6.53).

Variation de l'AIC pour le peuplement fruitier



Enfin, on sélectionnera la distance de 5,5m pour les bananiers (ΔAIC= 6.67).

Les distances que nous avons sélectionné pour chaque peuplement seront les variables spatiales que nous allons tester dans le modèle lors de l'étape suivante. Pour la suite on les définira de la façon suivante :

- nca= cacaoyer à 5,4m
- nfo= forestier à 3,4m
- nfu= fruitier à 6,1m
- nba= bananier à 5,5m.

Etape 2 : Construction d'un modèle avec les variables spatiales expliquant le mieux la variabilité de l'indice d'attaque

Nous avons construit un modèle uniquement avec les variables spatiales sélectionnées à l'étape précédente. Voici les résultats obtenus pour $m_{spatial}$:

$$m_{intermédiaire} = glmer(phy \sim nca + nfo + nfu + nba + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

Résultats du modèle spatial

```
Single term deletions

Model:
phy ~ nca + nfo + nfu + nba + (1 | parc)
       Df    AIC    LRT   Pr(Chi)
<none>    2424.9
nca     1 2453.5 30.646 3.097e-08 ***
nfo     1 2476.4 53.521 2.558e-13 ***
nfu     1 2426.8  3.874   0.04905 *
nba     1 2426.2  3.266   0.07072 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

D'après les résultats obtenus, on constate que les variables spatiales sont toutes significatives à différents niveaux (indiqué par les étoiles ou un point). La colonne « AIC » nous indique que le modèle avec l'AIC le plus faible (AIC=24249, soit le modèle le plus vraisemblable) est celui avec les quatre variables : nca, nfo, nfu et nba. Cela signifie que ces variables impactent toutes la pourriture brune de façon significative.

Résultats complémentaires au modèle spatial

```
Fixed effects:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  1.20233    0.27357   4.395 1.11e-05 ***
nca         -0.13584    0.02404  -5.649 1.61e-08 ***
nfo         -0.38520    0.05668  -6.796 1.07e-11 ***
nfu          0.13475    0.06747   1.997   0.0458 *
nba          0.09493    0.05094   1.864   0.0624 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

On constate que « nca »et« nfo » ont des valeurs négatives (-0,1358 pour « nca », -0,3852 pour « nfo »). Ceci signifie que ces variables ont une corrélation négative avec l'incidence de la pourriture brune. On interprète ce résultat de la façon suivante : Plus il y a d'individus « cacaoyer » à 5,4m moins le « cacaoyer suivi » est malade. Il en est de même pour les individus « forestier » à 3,4m.En revanche, les variables« nfu » et « nba » a une valeur positive (0,1346 pour « nfu » et 0,009 pour« nba »). Ces variables sont donc corrélées positivement à l'incidence de pourriture brune. On peut faire la même interprétation que précédemment c'est-à-dire que plus il y a d'individus « fruitier » à 6,1m et de « bananier » à 5,5m, plus le « cacaoyer suivi » est malade.

Etape 3 : Construction d'un modèle final avec les variables expliquant la variabilité de l'indice d'attaque

Nous avons construit un modèle avec les variables spatiales sélectionnées à l'étape précédente et nous avons ajouté la variable « cabosses totales ». Voici les résultats obtenus pour m_{final} :

$$m_{final\,1} = glmer(phy{\sim}nca + nfo + nfu + nba + cabtot + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

Résultats du modèle final 1

```
Model:
phy ~ nca + nfo + nfu + nba + cabtot + (1 | parc)
       Df    AIC    LRT   Pr(Chi)
<none>    2022.4
nca     1 2032.8  12.35 0.0004422 ***
nfo     1 2028.1   7.65 0.0056925 **
nfu     1 2078.8  58.38 2.163e-14 ***
nba     1 2020.4   0.00 0.9515547
cabtot  1 2424.9 404.46 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

D'après les résultats obtenus, on constate que la totalité des variables sont significatives excepté « nba ». On va donc supprimer cette variable dans le modèle final.

Modèle final 2 :

$$m_{final\,2} = glmer(phy{\sim}nca + nfo + nfu + cabtot + (1|parc), data = dt, family = poisson)$$

Résultats du modèle final 2

```
Model:
phy ~ nca + nfo + nfu + cabtot + (1 | parc)
       Df    AIC    LRT   Pr(Chi)
<none>    2020.4
nca     1 2031.1  12.69 0.0003678 ***
nfo     1 2026.1   7.67 0.0056231 **
nfu     1 2076.8  58.39 2.153e-14 ***
cabtot  1 2426.2 407.72 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Ici la totalité des variables sont significatives. La colonne « AIC » nous indique que le modèle avec l'AIC le plus faible (AIC=2020,4, soit le modèle le plus vraisemblable) est celui avec les trois variables spatiales et « cabosses totales ». Cela signifie que ces variables impactent toutes la pourriture brune de façon significative.

Rapport-Gratuit.com

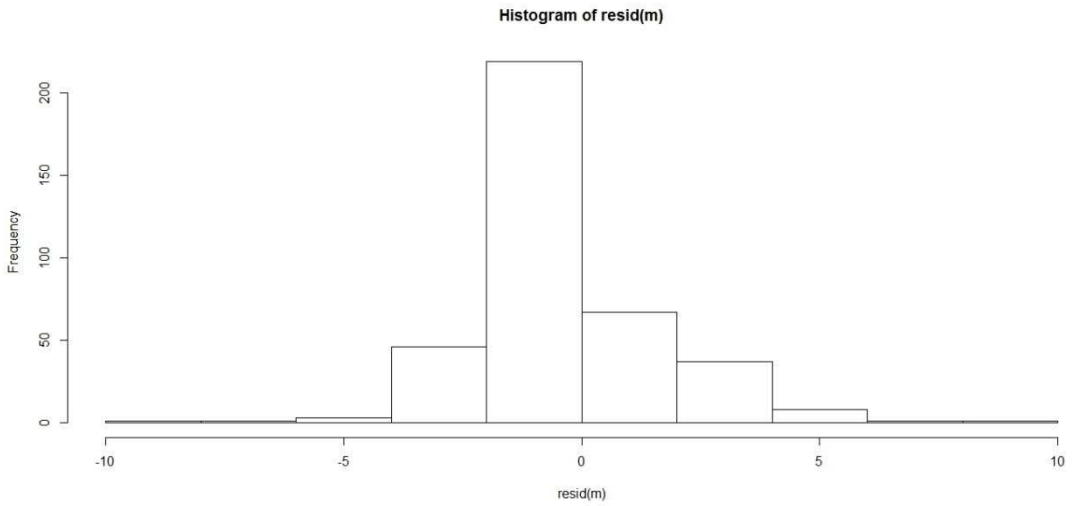
Résultats complémentaire au modèle final 2

```
Fixed effects:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  0.118693   0.243722   0.487 0.626259
nca         -0.083545   0.023062  -3.623 0.000292 ***
nfo         -0.156402   0.057797  -2.706 0.006809 **
nfu          0.571852   0.072228   7.917 2.43e-15 ***
cabtot       0.026169   0.001202  21.772  < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

On constate que nca et nfo ont des valeurs négatives (-0,0835 pour nca, -0,1564 pour nfo). Ceci signifie que ces variables ont une corrélation négative avec l'incidence de la pourriture brune.On interprète ce résultat de la façon suivante : Plus il y a d'individus « cacaoyer » à 5,4m, moins le « cacaoyer suivi » est malade. Il en est de même pour les individus « forestier » à 3,4m. En revanche, la variable « nfu » et « cabosses totales » a une valeur positive (0,5718 pour « nfu » et 0,0261 pour « cabtot »). Ces variables sont donc corrélées positivement à l'incidence de pourriture brune. On peut faire la même interprétation que précédemment c'est-à-dire que plus il y a de cabosses, plus le « cacaoyer suivi » est malade. Pour les fruitiers, plus il y a d'individus fruitiers à 6,1m, plus le « cacaoyer suivi » est malade.

Etape 4 : Vérification de la fiabilité du modèle

Examen des résidus du modèle *m final* :



Histogramme des résidus du modèle final

Les résidus du modèle ont une allure proche d'une courbe de Gauss ce qui indique que la normalité est vérifiée.

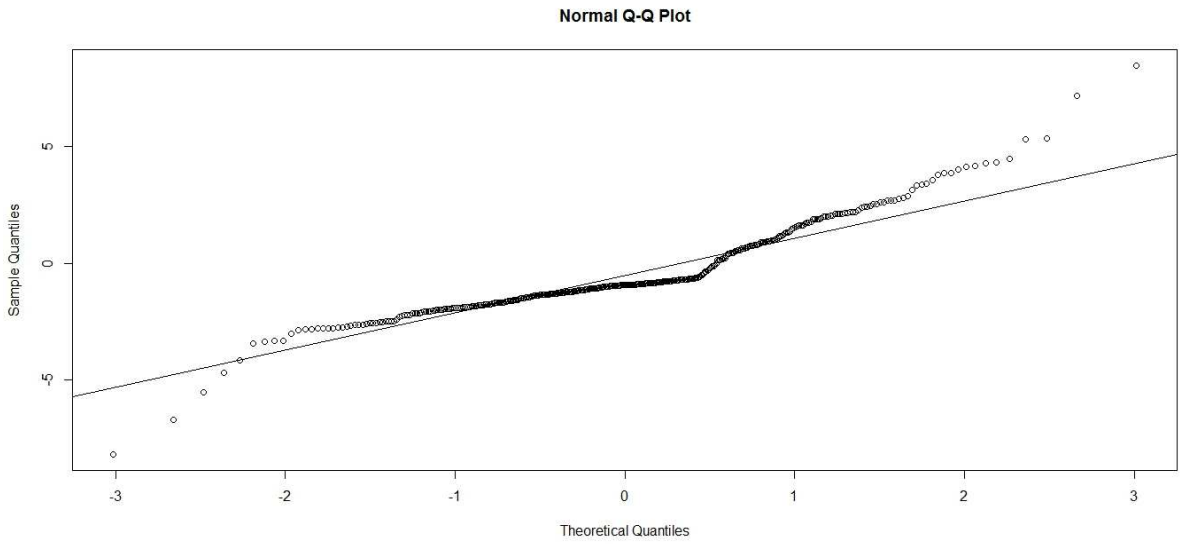


Diagramme Quantile-Quantile des résidus du modèle final

Ce graphique confirme les résultats de l'histogramme. Les résidus (points) s'approchent de la courbe (représentant la loi normale). La normalité est ainsi vérifiée.

En revanche, le coefficient de détermination R^2= 0,39. Ceci signifie que le modèle *m final* n'est pas vraiment adapté et n'explique que très partiellement l'indice d'attaque.

Annexe 9 : Tableau des différentes fréquences de coupe sanitaire exercées sur les dispositifs cartographiés

Fréquence de la coupe sanitaire	Nombre de parcelles
2-3 jours	1
3-6 jours	3
8 jours	6
15 jours	9
22 jours	1
TOTAL	20

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES