Étude du développement spatio-temporel du scolyte des baies, de la cercosporiose et de la rouille orangée dans des systèmes agroforestiers hétérogènes à base de café

Cyrielle Deswarte

▶ **To cite this version:**

Cyrielle Deswarte. Étude du développement spatio-temporel du scolyte des baies, de la cercosporiose et de la rouille orangée dans des systèmes agroforestiers hétérogènes à base de café. Sciences du Vivant [q-bio]. 2015. dumas-01251969

HAL Id: dumas-01251969

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01251969

Submitted on 7 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AGROCAMPUS OUEST

☑ **CFR Angers**

☐ **CFR Rennes**

CATIE – Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza Cartago, Turrialba 30501, Costa Rica

UPR Bioagresseurs : Analyse et maîtrise des risques. Campus international de Baillarguet 34398 Montpellier Cedex 5, France

Année universitaire : 2014-2015

Spécialité : Sciences & Productions Végétales

Option : Ingénierie des agrosystèmes

Mémoire de Fin d'Études

☑ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Etude du développement spatio-temporel du scolyte des baies, de la cercosporiose et de la rouille orangée dans des systèmes agroforestiers hétérogènes à base de café

Par : Cyrielle DESWARTE

Culture de café *Coffea Arabica* en système agroforestier- arbre d'ombrage *Chloroleucon eurycyclum*

Soutenu à Rennes, le 15/09/2015

Devant le jury composé de :

Président : C. Bissuel

Rapporteur : C. Le May

Maître de stage : J. Avelino

Enseignant référent : P. Leterme

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité :

☒ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible[1].
A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant).
Date et signature du maître de stage[2] : Le 27/08/2015

La confidentialité est levée pour le rapport uniquement, il est recommandé de le diffuser sur internet.

Droits d'auteur :

L'auteur[3] autorise la diffusion de son travail

☐ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

Date et signature de l'auteur :
23.08.15

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant :

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé

☐ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.
Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.
(2) Signature et cachet de l'organisme
(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études
(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

REMERCIEMENTS

Ce stage clôt mon cursus à Agrocampus Ouest et complète ma formation bien au-delà de mes attentes. Ce stage a été financé par le projet ANR MACACC[1].

Je remercie mon maître de stage Jacques Avelino, phytopathologiste de l'unité de recherche du CIRAD « Maîtrise des bioagresseurs des cultures pérennes » pour m'avoir accordé sa confiance, pour m'avoir suivi, conseillé et transmis ses connaissances sur les bioagresseurs du café. Sergio Vilchez pour ses précieux conseils en statistiques spatiales, domaine qui m'était inconnu avant ce stage de fin d'études.

Un grand merci aux différentes unités de recherche du CIRAD et du CATIE, notamment Olivier Roupsard, écophysiologiste de l'unité mixte de recherche Eco&Sols, coordinateur du projet MACACC et Maxime Soma, étudiant à l'école des ingénieurs forestiers (FIF) en stage de fin d'études pour les données concernant le degré d'ouverture de la canopée.

! Me gustaría también agradecer a Steven Cerdas Fernández por su ayuda en el campo para seguir las enfermedades del café, siempre con buena onda y la sonrisa!

Aux étudiants en stage de fin d'études du bureau de "los estudiantes de pasantías" et à tous les étudiants de la résidence el Andino pour la bonne humeur quotidienne. **PURA VIDA**

[1] ANR MACAAC (Modélisation pour l'accompagnement des acteurs, vers l'Adaptation des Couverts pérennes ou agroforestiers aux Changements globaux) http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-13-AGRO-0005

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION 1

1. Préambule 1

2.Contexte d'étude 1

3.Trois bioagresseurs aux traits de vie différents comme modèles d'étude 2

4.Objectifs & hypothèses de recherche 5

II. MATERIELS ET METHODES 6

1.Site, essai et parcelles 6

2.Cartographie de l'essai et mise en place d'un plan d'échantillonnage 6

3.Méthodes utilisées pour le suivi des bioagresseurs du café 7

4.Variables mesurées pour caractériser l'ombrage dans les parcelles agroforestières à travers la détermination du degré d'ouverture de la canopée 8

5. Analyses statistiques 9

III. RESULTATS 12

1.Evolution des bioagresseurs au cours du temps 12

2.Mise en évidence d'une dépendance spatiale des bioagresseurs (étape a) 12

3.Mise en évidence de variables environnementales expliquant la dépendance spatiale des bioagresseurs (étape b) 13

4.Analyse spatiale des résidus : une partie de la variance non expliquée par l'environnement (étape c) 15

5.Explication de la spatialisation des résidus en utilisant un modèle intégrant les variables environnementales et la position géographique des caféiers (étape d) 15

6.Vérification de la distribution spatiale des résidus du modèle complet intégrant les variables environnementales et la position géographique (étape e) 17

7.Construction d'une carte prédictive de la distribution des bioagresseurs grâce au modèle complet intégrant les variables environnementales et la position géographique (étape f) 17

IV. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES 18

1.Retour sur la méthodologie utilisée 18

2.Une dépendance spatiale observée différentes selon les bioagresseurs 18

3.Des perspectives dans les méthodes de lutte 20

4.Des perspectives méthodologiques 21

V. CONCLUSION 22

VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 23

VII.ANNEXES ..... I à XX

LISTE DES ABREVIATIONS

AIC : critère d'information d'Akaike

CATIE : Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (centre agronomique tropical de recherche et d'enseignement)

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le dévelopement

GAM : Generalized aditive model (modèle linéaire généralisé)

MACACC : Modélisation pour l'accompagnement des acteurs, vers l'Adaptation des Couverts pérennes ou agroforestiers aux Changements globaux

TABLE DES FIGURES & TABLEAUX

Table des figures

Figure 1: Symptômes de rouille (H. vastatrix) observables sur la face inférieure de la feuille (mallbatchcoffee.co.uk)

Figure 2 : Symptômes de cercosporiose (C. coffeicola) sur la face supérieure de la feuille (plantvillage.com)

Figure 3: Baie de café infestée par le scolyte et la larve de scolyte. La flèche montre le trou formé par la larve (source personnelle)

Figure 4 : Schéma simplifié des étapes du cycle de développement d'un bioagresseur (d'après aspnet.org)

Figure 5 : Illustration du pan d'échantillonnage au niveau d'une unité expérimentale

Figure 6 : Méthode pour évaluer la croissance de la rouille et de la cercosporiose en lien avec la croissance du rameau

Figure 7 : Echelle utilisée pour caractériser la taille des fruits (Sánchez González, 2011)

Figure 8 : Carte krigée du degré d'ouverture de la canopée au sein des blocs 1 et 2 de l'essai ; les contours noirs représentent les facteurs principaux « type d'ombrage » (Ab = Chloroleucon, T= Terminalia, E= Erythrina, PS= Plein Soleil- le vert signifie que le degré d'ouverture de la canopée est faible, le rouge pâle signifie que le degré d'ouverture de la canopée est élevé (Maxime Soma, 2015) 24

Figure 9 : Exemple de semi-variogramme (Baillargeon, 2005)

Figure 10 : Semi variogramme de l'incidence cumulée de la rouille. Les points représentent les données expérimentales, la ligne le modèle d'ajustement (a) avril 2015 (b) juin 2015 (N=418) : il y a une dépendance spatiale

Figure 11: Semi variogramme de l'incidence cumulée de la cercosporiose Les points représentent les données expérimentales, la ligne le modèle d'ajustement (a) avril 2015 (b) juin 2015 (N=418) : il y a une dépendance spatiale

Figure 12 : Semi variogramme du pourcentage de fruits scolytés sur le nombre de fruits aptes. Les points représentent les données expérimentales, la ligne le modèle d'ajustement (a) avril 2015 (b) juin 2015 (N=418) : il y a une dépendance spatiale

Figure 13 : Fonction de lissage du modèle retenu (avec erreur type) pour l'explication du nombre de fruits totaux en fonction du degré d'ouverture de la canopée (luz). Les lignes verticales sur l'axe horizontal représentent les valeurs observées du degré d'ouverture de la canopée

Figure 14: Semi variogramme des résidus du modèle GAM retenu pour la rouille orangée. Les points représentent les résidus du modèle retenu, la ligne le modèle d'ajustement (a) mai 2015 (b) juillet 2015 (N=418) : les résidus sont structurés spatialement

Figure 15: Semi variogramme des résidus du modèle GAM retenu pour la cercosporiose. Les points représentent les résidus du modèle retenu, la ligne le modèle d'ajustement (a) mai 2015 (b) juillet 2015 (N=418) : les résidus sont structurés spatialement

Figure 16 : Semi variogramme des résidus du modèle GAM retenu pour le scolyte. Les points représentent les résidus du modèle retenu, la ligne le modèle d'ajustement (a) mai 2015 (b) juillet 2015 (N=202) : les résidus sont structurés spatialement

Figure 17 : Fonction de lissage du modèle retenu (avec erreur type) pour l'explication des données d'incidence cumulée de la cercosporiose en fonction du degré d'ouverture de la canopée (luz) . Les lignes verticales sur l'axe horizontal représentent les valeurs observées pour le degré d'ouverture de la canopée

Figure 18 : Fonction de lissage du modèle retenu (avec erreur type) pour l'explication du % de fruits scolytés en fonction du du nombre de fruits totaux estimés (estim_ftotal). Les lignes verticales sur l'axe horizontal représentent les valeurs observées pour le nombre de fruits totaux

Figure 19 : Fonction de lissage du modèle retenu (avec erreur type) pour l'explication du % de fruits scolytés en fonction du degré d'ouverture de la canopée (luz). Les lignes verticales sur l'axe horizontal représentent les valeurs observées pour le degré d'ouverture de la lumière

Figure 20 : Semi-variogrammes des résidus des modèles GAM retenus intégrant variables environnementales et spatiales pour la rouille orangée (a), la cercosporiose (b), le scolyte des baies (c) pour la date de juin 2015. Les points représentent les résidus du modèle retenu, la ligne le modèle d'ajustement

Figure 21 : Carte prédictive de l'incidence cumulée de la rouille en avril 2015 (à gauche) et en juin 2015 (à droite). La latitude et la longitude y sont représentées. L'échelle représente l'incidence cumulée de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1

Figure 22 : Carte prédictive de l'incidence cumulée de la cercosporiose avril 2015 (à gauche) et en juin 2015 (à droite). La latitude et la longitude y sont représentées. L'échelle représente l'incidence cumulée de la cercosporiose de 0 (vert) à 0.3 (rosé) ; le maximum possible vaut 1

Figure 23 : Carte prédictive du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes en avril 2015 (à gauche), en juin 2015 (à droite). La latitude et la longitude y sont représentées. L'échelle représente l'incidence de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1.

Table des tableaux

Tableau 1 : Les différentes unités expérimentales correspondant à une combinaison "ombrage" et "itinéraire technique". AC correspond au mode de gestion conventionnelle, niveau d'intrants élevé – MC au mode de gestion conventionnelle, niveau d'intrants faible – MO au mode de gestion biologique, niveau d'intrants élevé- BO au monde de gestion biologique, niveau d'intrants faibles

Tableau 2: Tableau récapitulatif des variables utilisées ([1] détaillé dans la partie 2.1)

Tableau 3 : Evolution des bioagresseurs au cours des notations – moyenne des incidences cumulées et moyenne du % de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes

Tableau 4 : Comparaison de l'AIC des modèles contenant uniquement des variables environnementales, et des modèles contenant variables environnementales et variables spatiales (AIC =critère d'information d'Akaike)

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 0 (aide à la lecture des cartes prédictives) : Carte krigée du degré d'ouverture de la canopée au sein des blocs 1 et 2 de l'essai et localisation des différentes unités expérimentales

ANNEXE I : Photographie aérienne de l'essai d'agroforesterie (haut) et schéma du dispositif expérimental (bas)

ANNEXE I (bis) : Aperçu général du plan d'échantillonnage issu de QGIS. Les étoiles rouges représentent les caféiers échantillonnés, les points vers les arbres d'ombrages et les carrés violets représentent les différentes unités expérimentales

ANNEXE II : Détails des itinéraires techniques appliqués sur l'essai expérimental (Haggar,2011)

ANNEXE III : Caractéristiques des semi-variogrammes ajustés à partir des données expérimentales (étape a)

ANNEXE IV: Mise en évidence de variables environnementales expliquant de la dépendance spatiale de la rouille orangée – illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape b)

ANNEXE V: Mise en évidence de variables environnementales expliquant de la dépendance spatiale de la cercosporiose – illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape b)

ANNEXE VI: Mise en évidence de variables environnementales expliquant de la dépendance spatiale du scolyte des baies– illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape b)

ANNEXE VII : Caractéristiques des semi-variogrammes ajustés à partir des résidus des modèles GAM (étape c)

ANNEXE VIII: Mise en évidence de variables environnementales et spatiale expliquant de la dépendance spatiale de la rouille orangée – illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape d)

ANNEXE IX: Mise en évidence de variables environnementales et spatiale expliquant de la dépendance spatiale de la cercosporiose – illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape d)

ANNEXE X: Mise en évidence de variables environnementales et spatiale expliquant de la dépendance spatiale du scolyte des baies – illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape d)

ANNEXE XI : Cartes prédictives de l'incidence cumulée de la rouille orangée entre mars 2015 et juin 2015 La latitude et la longitude y sont représentées. L'échelle représente l'incidence cumulée de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1

ANNEXE XII : Cartes prédictives de l'incidence cumulée de la cercosporiose entre mars 2015 et juin 2015 La latitude et la longitude y sont représentées. L'échelle représente l'incidence cumulée de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1

ANNEXE XIII : Cartes prédictives du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes entre mars 2015 et avril 2015 (colonne de gauche), l'échelle représente l'incidence cumulée de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1, colonne de droite les cartes prédictives du nombre de fruits totaux entre mars 2015 et juin 2015, l'échelle représente le nombre de fruits totaux de 0 (orange) à 1400 (rose).

ANNEXE XIII (bis) : Cartes prédictives du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes entre mai 2015 et juin 2015 (colonne de gauche), l'échelle représente l'incidence cumulée de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1, colonne de droite les cartes prédictives du nombre de fruits totaux entre mars 2015 et juin 2015, l'échelle représente le nombre de fruits totaux de 0 (orange) à 1400 (rose).

I. INTRODUCTION

1. Préambule

Le café est la deuxième matière première la plus commercialisée sur le marché mondial, après le pétrole. La production du café est dominée par deux espèces, Arabica (*Coffea arabica*) et Robusta (*Coffea canephora*). Les températures annuelles optimales du caféier Arabica sont comprises entre 18°C et 22°C (Pohlan *et al.,* 2012) ; cependant l'augmentation de la température prévue par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) entre 1.8 °C et 4.0 °C d'ici la fin du XXI^{e} siècle (IPCC, 2007) pourrait avoir des conséquences importantes sur la croissance du caféier, la pression des bioagresseurs, et en définitive le développement de la culture. En effet, des travaux ont montré que l'augmentation de la température atmosphérique serait notamment à l'origine d'une modification du cycle et dynamique des populations des bioagresseurs (Anderson *et al.,* 2004).

C'est dans ce contexte que s'insère mon stage de fin d'études, dans le projet MACACC[1] (Modélisation pour l'accompagnement des Acteurs, vers l'Adaptation des Couverts pérennes ou agroforestiers aux Changements globaux). Ce projet financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) a débuté en 2014 pour une durée de trois ans. Il mobilise des climatologues, écophysiologistes, phytopathologistes, économistes, des organisations professionnelles. L'objectif d'une partie de ce projet (Work Package 2) est de fournir des scenarii d'adaptation au changement climatique. Trois études de cas y sont menées, l'un sur l'eucalyptus au Brésil, l'une sur le pin maritime en France et l'une au Costa Rica pour la culture de café en agroforesterie.

2. Contexte d'étude

Le café, couvre 97 614 hectares au Costa Rica, il est majoritairement produit dans des systèmes agroforestiers (Statistics FAO, 2012). Certains sont relativement simples, en association avec une seule espèce d'ombrage, souvent appartenant à la famille des Fabacées comme *Erythrina poeppigiana,* le Poró du Costa Rica, *ou Inga edulis.* D'autres sont plus complexes et se rapprochent des agroforêts, avec plusieurs espèces en association, notamment des arbres fruitiers mais aussi des arbres à bois d'œuvre (Toledo *et al.,* 2012).

Aujourd'hui les systèmes agroforestiers sont considérés comme des systèmes agricoles susceptibles d'accroître la résilience face au changement climatique (Verchot *et al.,* 2007). Ils offrent une large gamme de services écosystémiques, parce qu'ils contribuent à conserver la biodiversité (Schroth *et al.,* 2004, Cerdán *et al.,* 2012). Ils permettent aussi le recyclage des nutriments et maintiennent la qualité des sols (Young *et al.,* 1998). Ils séquestrent le carbone (Montagnini, 2004). Ils permettent de plus la production de produits variés, des fruits, du bois d'œuvre, du bois de chauffe, des plantes médicinales (Cerdán *et al.,* 2012).

Cependant la thématique de la régulation des bioagresseurs dans ces systèmes est encore discutée (Rao *et al.,* 2000 ; Avelino *et al.,* 2011), car les arbres d'ombrage peuvent avoir des effets variés. Le contrôle biologique des bioagresseurs peut être accru car ces systèmes sont susceptibles d'accueillir de plus grandes populations d'ennemis naturels. Ils peuvent améliorer les conditions du sol, et réduire l'incidence des parasites de faiblesse, ou encore transformer les conditions du microclimat, et défavoriser certains bioagresseurs qui préfèrent des conditions moins ombragées.

A l'inverse, la présence d'arbres peut accroître la présence de certains bioagresseurs en offrant un climat approprié pour leur développement (Schroth *et al.,* 2000) ou en servant d'hôtes

[1] http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-13-AGRO-0005

alternatifs pour des bioagresseurs non spécifiques de la culture de base (Avelino *et al.*, 2011 ; López-Bravo *et al.*, 2012)

Par ailleurs, les interactions entre la biologie de l'agent pathogène et les conditions environnementales dans les systèmes agroforestiers sont plus complexes que dans les systèmes homogènes. L'hétérogénéité inhérente aux systèmes agroforestiers (plusieurs strates et espèces, couverture d'ombrage variable) offre aux bioagresseurs une grande diversité de niches écologiques à la fois dans le temps mais aussi dans l'espace (Schroth, 2000).

L'épidémiologie s'est traditionnellement intéressée au développement temporel des maladies, en délaissant généralement la structure spatiale de leur développement en lien avec des variables environnementales (lumière, température, humidité). En effet, les suivis épidémiologiques réalisés par un échantillonnage sur l'ensemble d'une parcelle ne prenaient en compte ni la structure spatiale de l'environnement, ni les patrons de dispersion des bioagresseurs (Jongejans *et al.*, 2008)

Avec le développement des systèmes d'information géographique (SIG), de télédétection et d'outils d'analyse spatiale, l'épidémiologie spatiale a pris un essor considérable (Scherm *et al.*, 2006). Ces nouveaux outils permettent de prendre en compte la connaissance de la structure spatiale, et son évolution au cours du temps pour améliorer les méthodes de lutte : soit en ciblant spécifiquement le mécanisme de dispersion qui pourrait être à l'origine de la structure spatiale observée, soit en ciblant des foyers, zones spécifiques et précoces d'infestation ou d'infection (Ristaino *et al.*, 1994).

Même si l'effet de l'ombrage sur les populations de bioagresseurs a fait l'objet de plusieurs études - la synthèse de Bedimo *et al.* (2012) illustre notamment les effets directs ou indirects de l'ombrage sur le développement des principaux bioagresseurs du caféier - la connaissance du développement spatio-temporel des bioagresseurs du café en système agroforestier en lien avec l'environnement présente des lacunes. On peut toutefois citer Rémond *et al.* (1993) *et* Alves *et al.* (2011) qui ont étudié la répartition spatiale du scolyte au Salvador et au Brésil respectivement, mais avec une seule observation par an, ce qui ne permet pas d'en déduire les patrons de dispersion de ce ravageur, ni les effets de l'hétérogénéité du milieu sur cette dispersion. Alves *et al.* (2008) ont aussi étudié la distribution spatiale de la rouille orangée du café et de la cercosporiose au Brésil avec également une seule observation par an, avec les mêmes conséquences que celles citées précédemment.

3. Trois bioagresseurs aux traits de vie différents comme modèles d'étude

3.1 Des bioagresseurs causant des dommages importants

Ce projet propose d'étudier le développement spatio-temporel au sein d'une parcelle agroforestière de trois importants bioagresseurs : la rouille orangée du café (*Hemileia vastatrix*), la cercosporiose (*Cercospora coffeicola*) et le scolyte des baies (*Hypothenemus Hampei).* Une forte épidémie de rouille orangée à l'échelle de l'Amérique Centrale et du Nord a ainsi été rapportée, en lien avec le changement climatique (Avelino *et al.*, 2012). Des pertes de rendement jusqu'à 30 % peuvent être observés en Amérique Latine. Elles sont dues à la chute des fruits qui tombent ou qui ne parviennent pas à maturité à cause de la défoliation du caféier.

Concernant la cercosporiose, des pertes de rendement de l'ordre de 30 % en cas d'épidémies sévères peuvent être observées (Martins *et al.*, 2008).

Figure 1: Symptômes de rouille orangée observables sur la face inférieure de la feuille (apsnet.org)

Figure 2 : Symtômes de cercosporiose sur la face supérieure de la feuille (plantvillage.com)

Figure 3: Baie de café infestée par le scolyte et la larve de scolyte. La flèche montre le trou formé par la larve (source personnelle)

Les feuilles et les fruits peuvent être attaqués par ce champignon qui provoque la chute des feuilles, en particulier durant la sécheresse. Les lésions sur les fruits peuvent être à l'origine d'une diminution de la qualité du café (Souza *et al.*, 2011). Tous les stades de développement du caféier sont sensibles à la cercosporiose, avec une sensibilité accrue dans des situations de carence nutritive (Muller, 1940).

Le scolyte, lui est considéré comme le ravageur le plus important économiquement rencontré en caféiculture dans le monde. Ce coléoptère d'origine africaine se développe dans les fruits et entraîne des pertes directes telles que la réduction des rendements et indirectes comme la diminution de la qualité du grain de café. Les perforations qu'il effectue sur les jeunes fruits provoquent leur chute prématurée (Klein-Koche *et al.*, 1990). Lors du traitement après la récolte, la fragmentation des grains de café perforés est aussi souvent invoquée comme l'un des dommages entraîné par cet insecte. Il peut causer jusqu'à 30-35 % de pertes en poids à la récolte, voire plus si la récolte s'effectue tardivement car le scolyte continue à s'étendre (Damon *et al.*, 2000).

3.2 Symptômes des bioagresseurs étudiés

Les premiers symptômes de rouille orangée sont de petites taches jaune-pâle à la surface inférieure des feuilles. Ces tâches augmentent progressivement de diamètre ; des masses de spores orange (les urédospores) recouvrent les lésions. Les urédospores peuvent varier du jaune orangé au rouge orangé (figure 1). Les lésions se concentrent souvent sur les bords des feuilles.

Les premiers symptômes de la cercosporiose sont des lésions circulaires de couleur brun foncé à la surface supérieure des feuilles. Avec l'extension de la lésion, une tache gris-clair au centre devient observable par transparence. On peut y voir à l'œil nu les conidiospores de l'agent pathogène. Les lésions sont aussi être entourées d'un « halo » jaune visible sur la face supérieure de la feuille (Souza *et al.*, 2011). Les lésions peuvent avoir un aspect brûlé si elles sont très nombreuses (figure 2).

Les femelles adultes des scolytes attaquent les baies du caféier, en réalisant un trou puis en creusant des galeries où les œufs y sont déposés – la femelle et les larves s'alimentent dans les baies détruisant généralement un grain sur les deux disponibles. Il est facile de reconnaître l'infestation par la présence de trous ronds au niveau de l'apex des fruits (figure 3). Le fruit charnu du caféier, ou se développe le scolyte, est une drupe d'environ 2,0 cm de long à maturité, de forme ovale elliptique, fixée à sa branche par un court pédoncule ; elle demande 6 à 9 mois après la floraison pour atteindre sa maturité : de couleur verte elle grossit et passe par la couleur jaune puis orange avant de devenir rouge. Les baies de taille supérieure à 1,5 cm, c'est-à-dire un peu plus de 100 jours après la floraison, sont considérées comme « aptes » à être parasitées. Les baies de plus petite taille sont trop aqueuses, pour que le scolyte les perfore sans se noyer (Damon, 2000).

3.3 Cycles de vie des bioagresseurs étudiés

Les différentes étapes du cycle de développement d'un bioagresseur sont représentées dans la figure 4, de façon synthétique pour être applicables aussi bien aux maladies et aux ravageurs.

La rouille orangée est un champignon biotrophe, spécifique de la feuille de café, et qui ne peut survivre qu'en présence de cet organe. Le cycle de vie commence par la libération des urédospores de la rouille orangée qui, après dispersion, se déposent sur les feuilles de café (Avelino *et al.*, 1999) La deuxième étape est la germination, suivie par la pénétration du champignon dans les feuilles à travers ses stomates. Les hyphes colonisent ensuite la feuille de façon intercellulaire.

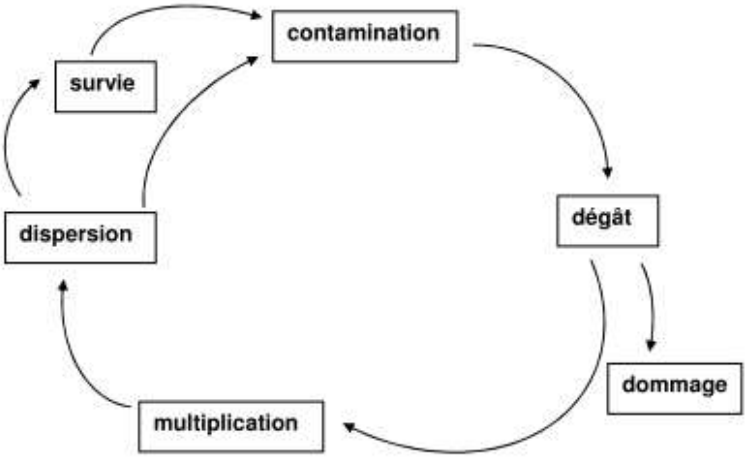


Figure 4 : Schéma simplifié des étapes du cycle de développement d'un bioagresseur (d'après aspnet.org)

L'étape suivante est la sporulation au cours de laquelle des sporophores émergent par des stomates produisant les urédospores. En Amérique centrale, on distingue plusieurs phases du développement de la rouille en relation avec phénologie du caféier et la distribution des pluies : une première phase de développement lent observée entre mai et juillet, au début des pluies, suivi d'une phase de croissance accélérée entre août et décembre, jusqu'au pic de récolte, autour duquel on observe aussi un pic de rouille, puis une phase de décroissance après la récolte et pendant la saison sèche (Avelino et Rivas, 2013)

La cercosporiose est réputée être un champignon nécrotrophe. Les conidies se déposent sur une feuille de caféier et le tube germinatif croît sur l'épiderme pendant environ deux jours avant de pénétrer dans la feuille par un stomate (Quesada *et al.,* 1950) ou par de petites blessures, à la face inférieure des feuilles. Une fois à l'intérieur de la feuille, les hyphes envahissent le mésophile inter-cellulairement et intra-cellulairement. D'autres hyphes vont se développer dans le parenchyme palissadique et finalement ré-émerger à travers ou proche des stomates de la feuille, donc à la face inférieure de celle-ci. On peut aussi trouver des conidiospores sur la face supérieure des feuilles. La fructification survient souvent à un stade avancé de la lésion (Souza *et al.,* 2011 ; Echandi *et al.,* 1959).

Bien que le scolyte préfère les baies du café, il est capable d'infester d'autres fruits, de s'y réfugier en l'absence de cerises de café, voire de s'y reproduire (Damon, 2000). Les fruits des légumineuses associées au caféier sont ainsi parfois infestés par le scolyte (Damon, 2000). Le cycle biologique du scolyte des baies, se compose de quatre stades : œuf, larve, nymphe et adulte (Bergamin *et al.,* 1943). Tous les stades se déroulent à l'intérieur des fruits du caféier, à l'exception d'une période de vol de la femelle à la recherche d'une nouvelle baie. La durée du cycle varie en fonction de la température: 21 jours à 27 °C, 32 jours à 22 °C. Le scolyte affectionne donc les températures élevées (Jamarillo, 2006) Les femelles peuvent vivre 157 jours. (Damon, 2000).

3.4 Des bioagresseurs aux capacités de dispersion différentes

La rouille orangée du caféier (*H. vastatrix*) a une forte capacité de dispersion. Ses urédospores équinulées sont, en effet, adaptées au transport par le vent (Nutman et al., 1960). La capacité de dispersion de la cercosporiose (*C. coffeicola*) est peu documentée, mais probablement inférieure à celle de la rouille. Selon Echandi (1959), les conidies de C. coffeicola sont principalement dispersées par la pluie, bien que capables d'être aussi transportées par le vent. Concernant, le scolyte des baies (*H. hampei*), ce sont les femelles qui sont responsables de la dispersion de la population. Elles peuvent voler à quelques centaines de mètres de leur source (Baker *et al.,* 1984 : Avelino *et al.,* 1991).

4. Objectifs & hypothèses de recherche

L'objectif général est de comprendre la distribution spatio-temporelle de la rouille orangée du café, de la cercosporiose et du scolyte des baies dans un milieu hétérogène et de proposer des méthodes de lutte visant à enrayer le développement spatiotemporel de ces bioagresseurs. L'approche pluri-agresseurs permettra de mieux comprendre les effets de l'hétérogénéité du milieu.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont de :

(i) caractériser la distribution spatiotemporelle de ces trois bioagresseurs

(ii) décrire les effets de l'hétérogénéité du milieu sur cette distribution spatiotemporelle

(iii) déduire des effets dispersion des bioagresseurs

Les hypothèses de recherche sont les suivantes :

(a) Il existe une distribution spatiotemporelle spécifique de chaque bioagresseur selon ses besoins et traits de vie.

(b) Le milieu (ombrage, gestion) affecte cette distribution spatiotemporelle différemment selon le bioagresseur, en accord avec ses besoins et traits de vie.

(c) La capacité de dispersion des bioagresseurs étudiés explique en partie leur distribution spatiotemporelle.

Tableau 1 : Les différentes unités expérimentales correspondant à une combinaison "ombrage" et "itinéraire technique". AC correspond au mode de gestion conventionnelle, niveau d'intrants élevé – MC au mode de gestion conventionnelle, niveau d'intrants faible – MO au mode de gestion biologique, niveau d'intrants élevé- BO au monde de gestion biologique, niveau d'intrants faible

	AC	MC	MO	BO
absence d'ombrage/ plein soleil	X	X		
Chloroleucon eurycyclum (Ab)		X	X	
Erythrina poeppigiana (E)	X	X	X	X
Terminalia amazonia (T)	X	X	X	
Chloroleucon eurycyclum + *Erythrina poeppigiana* (Ab+E)	X	X	X	X
Chloroleucon eurycyclum + *Terminalia amazonia (Ab+T)*		X	X	
Erythrina poeppigiana + *Terminalia amazonia (E+T)*		X	X	

II. MATERIELS ET METHODES

1. Site, essai et parcelles

Le site expérimental se situe au Costa Rica, dans la province de Cartago, à Turrialba (9º53´44´´ N,83º40´7´´ O) sur la ferme expérimentale du CATIE. Il est situé à 600 m d'altitude ; le climat est défini selon la classification de Köppen-Geiger, comme tropical humide sans saison sèche (Peel *et al.,* 2007) ; la température annuelle moyenne évolue entre 17 et 21 °C, et la pluviométrie annuelle y est de 3200 mm en moyenne.

Il s'agit d'un essai d'une surface de 9 hectares où les performances de différents systèmes agroforestiers à base de café (*Coffea arabica)* sont comparées. Il a été mis en place en 2000 (cf. Annexe I) avec la variété Caturra. L'inter-rang est de 2 mètres et l'espacement entre plants sur le rang est de 1 mètre, ce qui aboutit à une densité de plantation de 5 000 caféiers par hectare. L'étude est réalisée sur deux des trois blocs de l'essai uniquement. Le dispositif expérimental est un split plot, c'est-à-dire en parcelles divisés avec un traitement principal et un sous traitement. Le traitement principal est le « type d'ombrage ».

Il est caractérisé par trois espèces d'arbres en seuls ou en association : *Chloroleucon eurycyclum* (Ab : fixateur d'azote, essence à usage économique), *Terminalia amazonia* (T: non fixateur d'azote, essence à usage économique), *Erythrina poepiggiana* (E: fixateur d'azote, essence à usage agronomique) et un traitement dit plein soleil, c'est-à-dire sans arbre d'ombrage, à pleine exposition solaire. Sur les deux blocs, l'effectif total des arbres d'ombrage est de 410, mais la densité des arbres dépend des différentes combinaisons.

Le split-facteur «système de gestion » est caractérisé par deux stratégies de gestion (conventionnelle et biologique) et deux niveaux d'intrants pour chaque stratégie de gestion, soit 4 systèmes de gestion. AC correspond au mode de gestion conventionnel, niveau d'intrants élevé – MC au mode de gestion conventionnel, niveau d'intrants faible – MO au mode de gestion biologique, niveau d'intrants élevé- BO au mode de gestion biologique, niveau d'intrants faible (Haggar, 2011). Le détail des différents niveaux d'intrants figure en annexe II. Finalement, chaque unité expérimentale d'une surface de 300 m² correspond à une combinaison entre le traitement « type d'ombrage » et le traitement « système de gestion » (tableau1). Toutes les combinaisons n'existent pas, soit pour des questions agronomiques (il est impossible de cultiver du café biologique à pleine exposition solaire, tableau 1), soit pour des raisons pratiques (le manque de place sur la ferme a obligé à faire des choix). Il s'agit donc, d'un dispositif incomplet avec 19 combinaisons.

2. Cartographie de l'essai et mise en place d'un plan d'échantillonnage

En 2013, deux satellites Pléiades ont permis d'obtenir une image à très haute résolution (VHR : PAN (0.5m), R,V B, NIR (2m)) (Le Maire *et al.,* 2014). A partir de cette image, les 20 000 caféiers de l'essai ont été géo-référencés. Ils sont identifiés par leurs coordonnées géographiques (X,Y), leur numéro de bloc, les types d'ombrage et système de gestion. Les différents arbres d'ombrage ont aussi été géo-référencés. La cartographie de l'essai a été réalisée à l'aide d'un système d'informations géographiques (SIG), en l'occurrence le logiciel QGIS (QGIS Development Team, 2011)

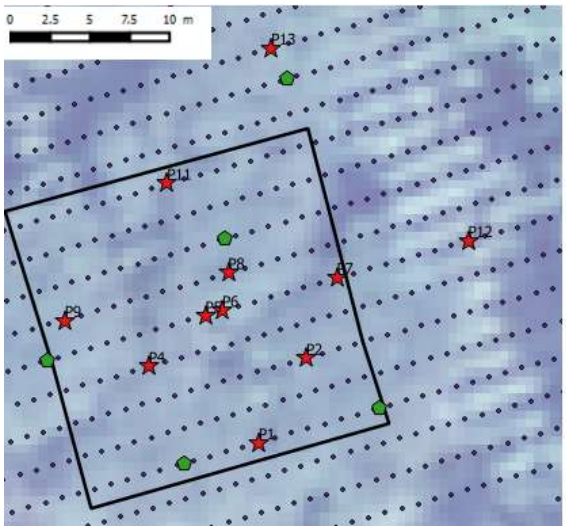
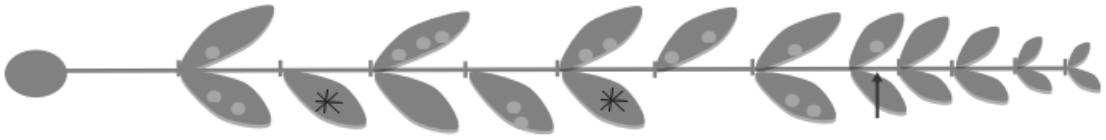


Figure 5 : Illustration du pan d'échantillonnage d'une unité expérimentale (11 caféiers)

date	feuilles totales	I I	I I	I I	I I	I I	I I	I I	I I	I I	I I
suivi n°1	feuilles avec rouille	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
	feuilles avec cercosporiose	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
	# noeuds	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10



date	feuilles totales	I I	I -	I I	I -	I I	-I	I I	I I	I I	I I	I I	II
suivi n°2	feuilles avec rouille	I I	- -	- I	I -	- I	- I	I I	- I	- -	- -	--	--
	feuilles avec cercosporiose	- -	I -	- -	- -	I -	- -	- -	- -	- -	- -	--	--
	# noeuds	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Figure 6 : Méthode pour évaluer la croissance de la rouille et de la cercosporiose en lien avec la croissance du rameau.
La première ligne représente le nombre total de feuilles à chaque nœud (2 bâtons verticaux représente une paire de feuilles, un bâton vertical indique la présence d'une feuille, un bâton horizontal indique l'absence de la feuille) ; la deuxième ligne et troisième ligne représentent l'évolution de la rouille et de la cercosporiose (un bâton horizontal signifie l'absence de la maladie sur la feuille, un bâton vertical signifie l'absence de la maladie sur la feuille.
Le rond grisé représente la rouille orangée et l'étoile noire représente la cercosporiose

L'échantillonnage repose sur l'observation des trois bioagresseurs cités précédemment sur 11 caféiers par unité expérimentale sur deux blocs (38 unités) selon une maille irrégulière (figure 5), soit un total de 11x38=418 caféiers. Le choix d'un tel plan permet d'obtenir des distances différentes entre les caféiers échantillonnés, en vue de la construction de semi-variogrammes. Les caféiers échantillonnés sont identifiés par leurs coordonnées géographiques (X,Y), leur numéro de bloc, les types d'ombrage et le système de gestion à l'aide de la cartographie de l'essai réalisée. L'annexe I bis donne un aperçu de la position des caféiers au sein de l'essai, à partir du logiciel QGIS.

3. Méthodes utilisées pour le suivi des bioagresseurs du café

3.1 Variables observées lors du suivi épidémiologique des bioagresseurs

Les suivis épidémiologiques des bioagresseurs sont réalisés mensuellement : 4 suivis ont été effectués de fin-mars 2015 à fin-juin 2015 sur les 418 caféiers d'intérêt.

a) <u>La rouille orangée & la cercosporiose</u>

Pour chaque caféier d'intérêt, trois rameaux sont marqués. Ces rameaux sont situés à trois étages différents pour assurer la représentativité de l'échantillonnage. Le suivi de la maladie s'effectue grâce à la méthode dite « feuille à feuille », décrite par López-Bravo (2012) où chaque feuille de chacun des rameaux est identifiée et suivie au fil du temps. Sur chacune des feuilles des rameaux suivis, on observe la présence ou l'absence de la maladie. Cette méthode permet de dénombrer entre chaque date d'observation les nouvelles feuilles malades, les feuilles tombées (saines et malades) et les nouvelles feuilles apparues. Le détail de cette méthode est expliquée figure 6.

b) <u>Le scolyte des baies</u>

La figure 7 indique l'échelle utilisée pour caractériser la taille des fruits. Des fruits de calibre C5 à C10 sont considérés à être parasités (cf 1.3.2). Avelino *et al.*, (2012) ont démontré que cette méthode d'échantillonnage permettait d'estimer correctement les taux d'infestation.

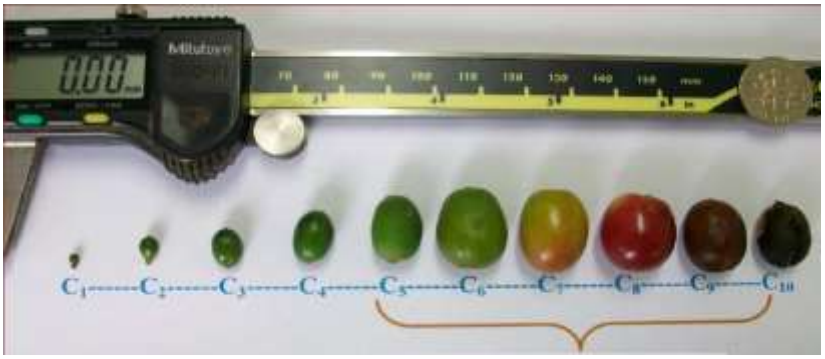


Figure 7 : Echelle utilisée pour caractériser la taille des fruits (Sánchez González, 2011)

A chaque date d'observation, le nombre de rameaux par caféier produisant des baies aptes est compté. Puis, trois rameaux productifs couvrant l'ensemble de la zone de production du caféier sont choisis. Sur chacun de ces trois rameaux sont relevés :
- le nombre total de baies aptes (C5 à C10)
- le nombre de baies aptes perforées par le scolyte
- le nombre de fruits totaux

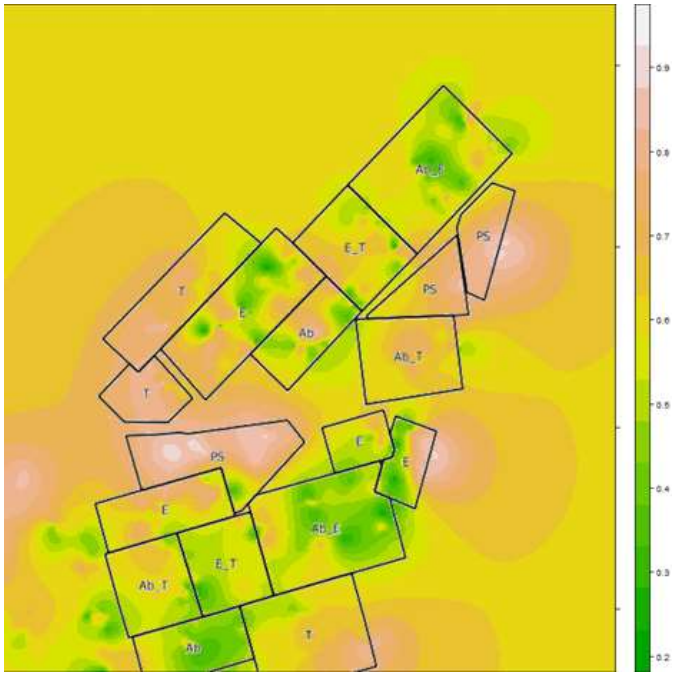


Figure 8 : Carte krigée du degré d'ouverture de la canopée au sein des blocs 1 et 2 de l'essai ; les contours noirs représentent les facteurs principaux « type d'ombrage » (Ab = *Chloroleucon,* T= *Terminalia, E= Erythrina, PS= Plein Soleil*- le vert signifie que le degré d'ouverture de la canopée est faible, le rouge pâle signifie que le degré d'ouverture de la canopée est élevé (*Maxime Soma, 2015)*

3.2 Variables dérivées caractérisant les bioagresseurs

a) La rouille orangée & la cercosporiose

A chaque date d'observation et pour chaque caféier observé, l'incidence cumulée de la rouille et de la cercosporiose a été calculée, d'après la formule :

$$\text{incidence cumulée d'une maladie i à un temps t} : \frac{\text{nombre cumulé des feuilles atteintes par la maladie i de t0 à t}}{\text{nombre cumulé de feuilles de t0 et t}}$$

b) Le scolyte des baies

A chaque date d'observation et pour chaque caféier observé, on estime l'abondance de fruits aptes scolytés par caféier d'après la formule ci-dessous. Ce calcul revient à faire une règle de trois.

$$\text{Estimation du nombre fruits scolytés} = \frac{\text{nombre de fruits scolytés sur les 3 rameaux} \times \text{nombre de rameaux productifs}}{3}$$

La méthode est la même pour estimer l'abondance de fruits aptes et de fruits totaux (l'utilisation de cette variable sera explicitée dans le paragraphe 5.3). Le pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes par caféier est la variable qui est utilisée pour décrire l'infestation des caféiers par le scolyte à chaque date d'observation.

4. Variables mesurées pour caractériser l'ombrage dans les parcelles agroforestières à travers la détermination du degré d'ouverture de la canopée (Maxime Soma, 2015)

La méthode de mesure utilisant les photographies hémisphériques a été choisie afin de caractériser finement l'hétérogénéité spatiale de l'ombrage présente dans le continuum de la canopée (Frazer, 1999). Un Nikon Coolpix 4500 avec une caméra montée fisheye Nikon objectif FC- E8 0.21x a été utilisé. Toutes les photos hémisphériques ont été prises à 20 cm au-dessus de 570 caféiers (dont 70 % des caféiers correspondent aux caféiers échantillonnés pour le suivi épidémiologique) répartis sur l'ensemble de l'essai expérimental, dans des conditions de lumière diffuse pour éviter les reflets spéculaires. Les photos hémisphériques ont été analysées avec le logiciel GLA (Analyzer Lumière Gap v2.0) La variable « Gap can Diffuse » du logiciel GLA a été utilisée pour caractériser l'ouverture de la canopée. Il s'agit d'une variable variant entre 0 et 1.

Une valeur proche de 1 signifie que le degré d'ouverture de la canopée est élevé et que l'ombrage y est faible. A l'inverse, une valeur proche de 0 signifie que le degré d'ouverture de la canopée est faible, et que l'ombrage est élevé. Un krigeage, c'est à dire l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée (ici le degré d'ouverture de la canopée) a permis d'obtenir une carte représentant le degré d'ouverture sur les trois blocs de l'essai. Ici, seuls les blocs d'intérêt 1et 2 sont représentés (figure 8).

Tableau 2: Tableau récapitulatif des variables utilisées ([1] détaillé dans la partie 2.1)

Variables épidémiologiques	incidence cumulée (rouille et cercosporiose)	quantitative comprise entre 0 et 1
	% NB fruits scolytés/NB fruits aptes	entre 0 et 100
Variables environnementales	type d'ombrage [1]	qualitative à 7 modalités PS- Ab -T - E- Ab.T - Ab.E E.T
	mode de gestion [1]	qualitative à 4 modalités AC – MC – MO – BO
	degré d'ouverture de la canopée	entre 0 et 1
Variables spatiales	position géographique	X, Y
	numéro de bloc	1 ou 2
Variable temporelle	date de notation	03/15 04/15 05/15 06/15

Des différences de degré d'ouverture entre les types d'ombrage sont observables, Les parcelles de type *Chloroleucon* (Ab) et celles en association *Choroleucon* et *Erythrina* (Ab+E) expriment la plus faible ouverture de la canopée, tandis que celle en plein soleil expriment une grande ouverture de la canopée. De plus, la carte reflète une grande variabilité intra parcellaire : la présence de trous de lumière entre de nombreux arbres d'ombrage, pouvant avoir des conséquences sur la distribution spatiale des bioagresseurs du café, selon nos hypothèses.

5. Analyses statistiques

5.1 Stratégie d'analyse employée

Le tableau 2 présente les variables utilisées lors des analyses statistiques. La stratégie générale d'analyse employée est indiquée ci-dessous et est détaillée dans les parties 5.2 à 5.4 :

a. Mise en évidence de la distribution spatiale des bioagresseurs par l'utilisation de semi-variogrammes.

b. Explication de la distribution spatiale des bioagresseurs en fonction de l'environnement qui est hétérogène et structuré spatialement. Les variables épidémiologiques présentées dans le tableau 2 sont expliquées par des variables environnementales, grâce à l'utilisation de modèles additifs généralisés (GAM)

c. Analyse spatiale des résidus pour expliquer la part de variance non expliquée par l'environnement (semi-variogrammes). Une dépendance spatiale des résidus indiquerait que l'environnement n'explique pas toute la distribution spatiale des bioagresseurs et que des phénomènes liés à leur capacité de dispersion sont envisageables.

d. Explication de la spatialisation des résidus en utilisant un modèle complet intégrant les variables environnementales et la position géographique des caféiers (variables X et Y). En effet, les motifs de distribution spatiale d'un bioagresseur peuvent être l'expression d'interactions complexes avec des facteurs environnementaux, de la disposition spatiale des plants dans une parcelle (Xu, 2004) et de la capacité de dispersion de l'espèce étudiée.

e. Analyse spatiale des résidus du modèle complet intégrant les variables environnementales et la position géographique – l'absence d'une dépendance spatiale des résidus permet de vérifier que le modèle complet explique la distribution spatiale des bioagresseurs observée

f. Construction d'une carte prédictive de la distribution des bioagresseurs grâce au modèle complet intégrant les variables environnementales et la position géographique.

5.2 Mise en évidence d'une dépendance spatiale à partir de semi-variogrammes

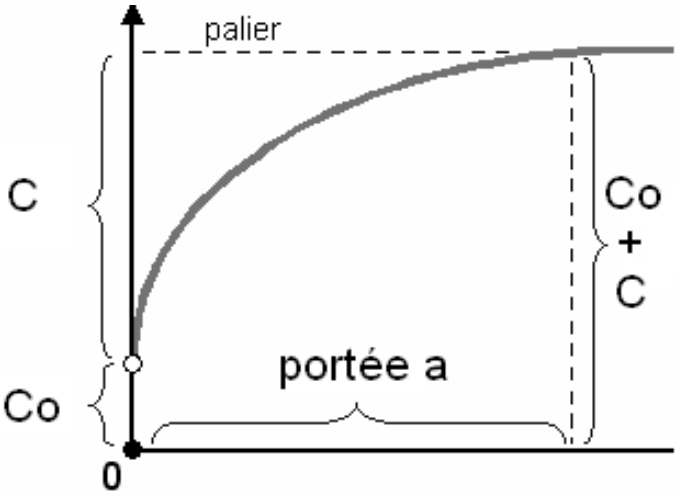
Pour chaque date du suivi épidémiologique, un semi-variogramme expérimental est construit à partir des valeurs obtenues sur le terrain pour mettre en évidence la distribution spatiale des bioagresseurs (étape a). Le semi-variogramme est couramment utilisé pour analyser la dépendance spatiale entre des points (ici les caféiers) ; le semi-variogramme représente les écarts quadratiques moyens entre deux points x_i et x_j en fonction de la distance qui sépare ces points.

La semi-variance est donnée par l'équation (Journel *et al*., 1978 *;* Isaaks *et al.*, 1989*)* :

$$y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z_i - z_{i+h})^2$$

Dans cette équation, y(h) est calculé pour les N(h) points x_i et x_j séparés par une distance h (exprimée en m) ; z_i est l'incidence cumulée de la maladie au point i dans le cas de la rouille orangée et de la cercosporiose - dans le cas du scolyte des baies, z_i est le pourcentage de fruits infestés par rapport au nombre total de fruits aptes. Il s'agit d'un semi-variogramme isotopique, c'est-à-dire qu'aucune direction de l'espace n'est privilégiée. Il s'agit ensuite d'ajuster à ce semi-variogramme expérimental une fonction analytique, c'est à dire une fonction continue qui caractérise complètement la semi-variance en fonction de la distance entre les points. La méthode utilisée pour l'ajustement est la méthode des moindres carrés pondérés. Plus la valeur de la somme au carré des résidus standardisés (RSS) est proche de 0, plus le modèle correspond au semi-variogramme expérimental (Jay *et al.,* 1993). Cette analyse est effectuée à l'aide du logiciel GS+ (Roberston *et al.,* 1998*).*

Les paramètres descriptifs renvoyés pour le semi-variogramme sont les suivants (figure 9) :



C_o : l'effet pépite est la valeur y à laquelle la courbe du modèle coupe l'axe des ordonnées. Un effet de pépite s'explique par des variations non détectées à une très faible échelle.

a : la portée, elle représente la valeur pour laquelle le semi-variogramme atteint une limite et indique qu'à cette distance, il n'y a plus de dépendance spatiale.

Co+C : le palier, c'est la variance à laquelle le plateau se présente

Figure 9 : Exemple de semi-variogramme *(*Baillargeon, 2005*)*

Le niveau de dépendance spatiale est calculé en divisant l'effet de pépite (Co) par le palier (Co+C) ; elle s'exprime en pourcentage. Lorsque le rapport est inférieur à 25 %, le niveau de dépendance spatiale est considéré comme élevé : entre 26 et 75 % comme modéré et supérieur à 76 % faible (Cambardella *et al.*, 1994).

Pour mettre en évidence la spatialisation des résidus (étape c), z_i est le résidu du modèle au point i et z_{i+h} le résidu du modèle au point i+h - le raisonnement suivi pour l'ajustement du semi-variogramme est le même qu'expliqué précédemment.

5.3 Modélisation la distribution spatiale des bioagresseurs en fonction de l'environnement : utilisation de modèles additifs généralisés (GAM)

Pour expliquer la distribution spatiale des bioagresseurs en fonction des facteurs environnementaux (étape b) et en fonction des facteurs environnementaux et de la position géographique (étape d), un modèle additif généralisé (GAM) est utilisé.

L'utilisation d'un modèle GAM est avantageuse lorsque la relation entre covariables et la variable n'est pas linéaire *(*Guisan, 2002). Cette approche est plus flexible qu'un modèle non-linéaire paramétrique car la formulation de la relation paramétrique entre les variables ne doit pas être définie. La relation entre la variable dépendante et les covariables de ce type de modèle est non paramétrique et s'exprime à l'aide d'une fonction de lissage (Hastie *et al.,* 1990).

La stratégie adoptée dans de ce type d'étude consiste à considérer le modèle contenant les variables environnementales, puis de considérer un modèle contenant variables environnementales et spatiales. L'identification des facteurs indispensables à un bon ajustement est faite à l'aide de la déviance. Afin de trouver le modèle parcimonieux, on utilise le critère d'information d'Akaike (AIC). La plus petite valeur obtenue correspond au modèle choisi (Draper et Smith, 1981).

La librairie du logiciel R (R Developement Core Team 2008 ; version 2.12.1), « mgcv » (multiple smoothing parameter estimation by gcv, version 1.7.4) *(*Wood, 2006) a été choisie pour tester les différents modèles.

⇨ <u>La rouille orangée et la cercosporiose</u>

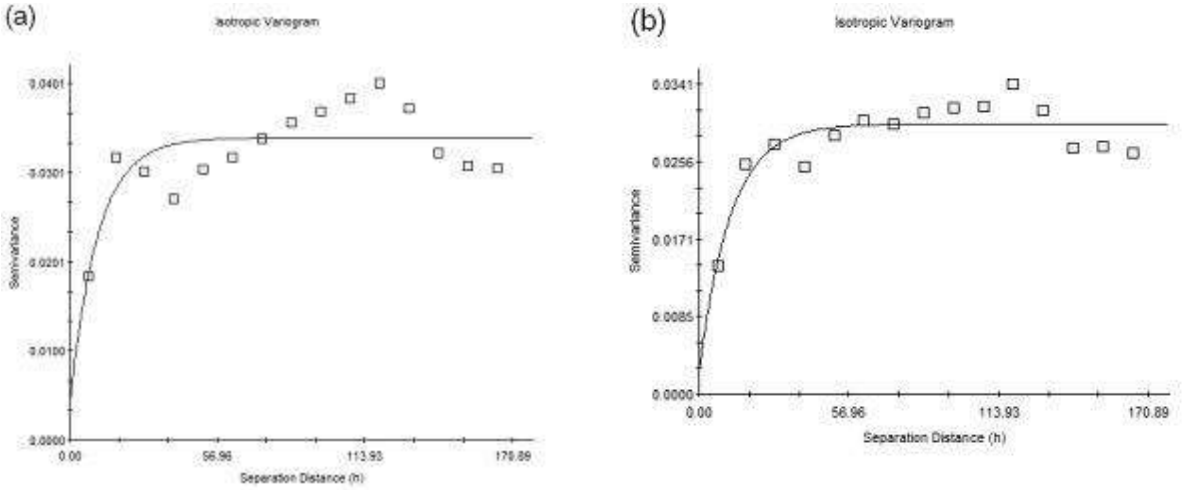
Différents modèles additifs généralisés sont étudiés de la sorte afin de décrire les relations possibles entre les incidences cumulées de la rouille et de la cercosporiose et les variables environnementales (étape b), de même pour la position géographique (étape d).

⇨ <u>Le scolyte des baies</u>

La méthodologie diffère légèrement ; une étape préliminaire consiste à sélectionner un modèle additif généralisé qui prédit le nombre de fruits totaux sur chaque café en fonction des variables environnementales et de la position géographique du caféier. La variable « nombre de fruits totaux » est ensuite utilisé comme covariable (sans fruit, il ne peut y avoir de scolyte) dans la seconde étape. Celle-ci consiste à sélectionner un modèle additif généralisé qui prédit le pourcentage de fruits scolytés en fonction des variables environnementales et le nombre de fruits totaux (étape b).

5.4 Cartographie de la distribution des bioagresseurs en lien avec l'ombrage et les systèmes de gestion

Il est possible ensuite d'établir des prédictions sur la distribution des caféiers non échantillonnés à partir des modèles retenus. La construction des cartes de prédiction d'une résolution de 1 mètre est réalisée à l'aide du package GAM *(*Hasties, 1990*)* et le package maptools (Lewin-Kohl, 2011). L'utilisation de cartes prédictives est un outil qui permet de localiser l'éventuelle présence de foyers des bioagresseurs étudiés en tenant compte de l'hétérogénéité de l'environnement.



:

Figure 10 : Semi variogramme de l'incidence cumulée de la rouille. Les points représentent les données expérimentales, la ligne le modèle d'ajustement (a) avril 2015 (b) juin 2015 (N=418) : il y a une dépendance spatiale

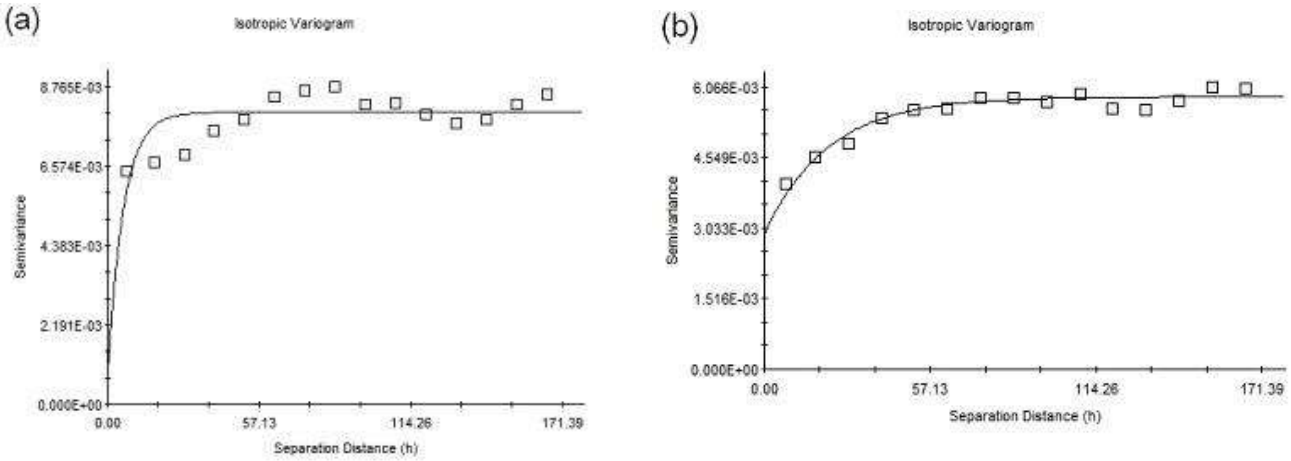


Figure 11: Semi variogramme de l'incidence cumulée de la cercosporiose Les points représentent les données expérimentales, la ligne le modèle d'ajustement (a) avril 2015 (b) juin 2015 (N=418) : il y a une dépendance spatiale

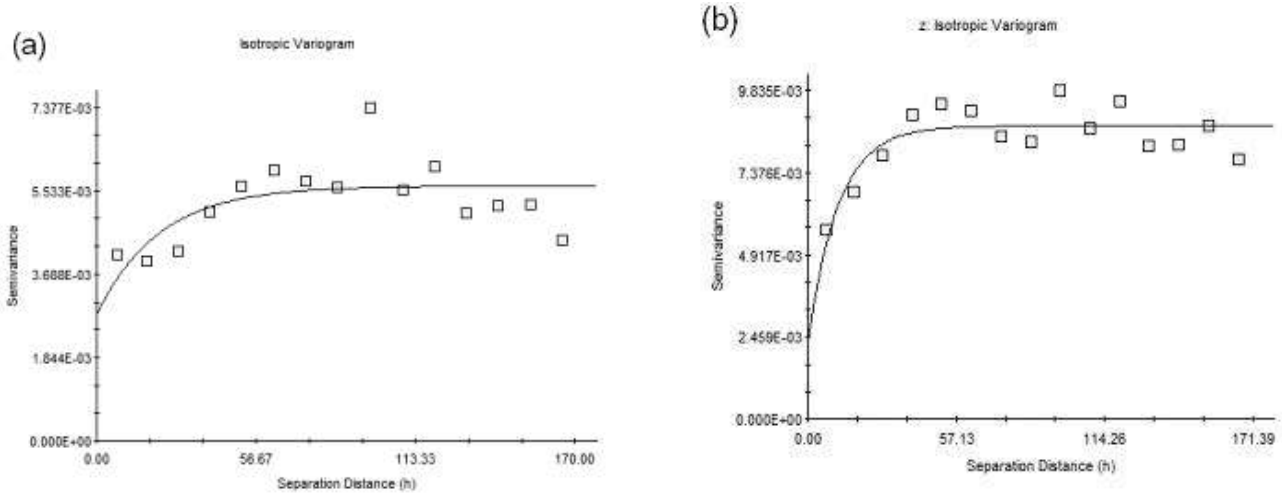


Figure 12 : Semi variogramme du pourcentage de fruits scolytés sur le nombre de fruits aptes. Les points représentent les données expérimentales, la ligne le modèle d'ajustement (a) avril 2015 (b) juin 2015 (N=418) : il y a une dépendance spatiale

III. RESULTATS

1. Evolution des bioagresseurs au cours du temps

Le tableau 3 montre l'incidence cumulée moyenne de la rouille orangée et de la cercosporiose et la moyenne du pourcentage de fruits scolytés au cours des notations. L'incidence cumulée de la rouille passe de 10 % à 48 % sur la période d'analyse.

Pour l'incidence cumulée de la cercosporiose, l'évolution est moins flagrante. Elle passe de 11% en mars à 12 % en avril, puis 10 % en mai et 11 % en juin. Le fait d'obtenir des incidences cumulées plus faibles entre mai et juin signifie que le nombre de feuilles nouvelles et saines est plus important que le nombre de feuilles nouvellement atteintes par la cercosporiose. Il y a dilution de la maladie.

Concernant le pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes, peu d'évolution est visible entre mars et mai où le pourcentage de fruits scolytés est en moyenne de 2 % ; en juin il évolue à 4 %. Cependant, les données concernant le scolyte sont à interpréter avec vigilance car les données sont très dispersées : parmi les 418 caféiers échantillonnés, seul 202 caféiers ont produit au moins un fruit au cours d'une des quatre notations.

Tableau 3 : Evolution des bioagresseurs au cours des notations – moyenne des incidences cumulées et moyenne du % de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes

date de notation	% d'incidence cumulée rouille orangée	% d'incidence cumulée cercosporiose	% (nombre fruits scolytés/ 1+ nombre fruits aptes)
mars 2015	10	11	2
avril 2015	36	12	2
mai 2015	43	10	2
juin 2015	48	11	4

2. Mise en évidence d'une dépendance spatiale des bioagresseurs (étape a)

Le meilleur ajustement obtenu pour l'ensemble des semi-variogrammes est une fonction exponentielle. Les paramètres de la fonction d'ajustement figurent en annexe 3. Sur la figure 10, 11, et 12 sont représentés respectivement les semi-variogrammes de la rouille orangée, de la cercosporiose et du scolyte de baies pour la 2^{e} (avril 2015) et 4^{e} date de notation (juin 2015), pour éviter d'alourdir la lecture.

Les semi-variogrammes retenus sont isotopiques, c'est-à-dire que la dépendance spatiale observée ne suit pas une direction privilégiée. Pour la rouille orangée et la cercosporiose, le rapport moyen C_0/C_0+C est respectivement de 11% et 8%, la dépendance spatiale est considérée comme élevée. Pour le scolyte des baies, le rapport moyen C_0/C_0+C est de 50 %, la dépendance spatiale est considérée comme modérée (d'après Cambardella *et al., 1994*).

La portée représente la distance à laquelle il n'y a plus de dépendance spatiale. La portée augmente au cours du temps, faiblement pour la rouille orangée (elle évolue entre 27 et 36 m).Pour la cercosporiose et le scolyte, la valeur de la portée est multipliée par 3 à 4 environ : entre 16 et 66 m pour la première, et entre 16 et 55 m pour le second. La dépendance spatiale dépend donc des espèces considérées, et de leur capacité propre à se déplacer, mais aussi de l'effet des variables environnementales, selon nos hypothèses. Un effet pépite compris entre 7.10^{-4} et 1.10^{-2} est observé. Il est cependant relativement faible comparé à la semi variance de l'échantillon. Il peut être attribué à des sources de variation spatiale à des distances inférieures à l'intervalle d'échantillonnage (ici la distance minimale était de 1 m).

3. Mise en évidence de variables environnementales expliquant la dépendance spatiale des bioagresseurs (étape b)

3.1 La rouille orangée du caféier et la cercosporiose

Dans le cas de la rouille orangée et de la cercosporiose, l'approche de modélisation utilisée fait appel à une famille bêta-binomiale. Il s'agit d'une distribution de probabilité discrète où la probabilité d'une plante d'être malade est une variable (et non pas une constante comme dans la distribution binomiale). La distribution d'une bêta-binomiale a une variance plus élevée que la binomiale et elle est mieux adaptée aux données issues de modèles agrégés comme attendu pour l'incidence des maladies (Hughes *et al.,* 1993). Les 418 caféiers échantillonnés sont utilisés pour construire le modèle de la rouille orangée et de la cercosporiose.

En langage R, le modèle retenu pour décrire la relation entre l'incidence cumulée de la rouille orangée et les variables environnementales s'exprime de la façon suivante :
gam(Incidence cumulée rouille orangée ~ date + s(mode de gestion, bs='re') +s(type ombrage, bs='re') + s(degré d'ouverture, bs='ts'), family=betar, data=data)

« `s` » indique que « spline » est la méthode de lissage utilisée, `bs='re'` et `bs='ts'` représentent le type de lissage et `family=betar` indique que la fonction de répartition de la variable dépendante est bêta binomiale. La fonction de lien utilisée est « identité » par défaut. Lorsque le degré de liberté du lissage d'une covariable n'est pas significatif et tend à se rapprocher de l'unité, cette covariable peut être testée sur une base strictement linéaire en enlevant les options « `s` » et « `bs` » qui lui sont associées. C'est le cas de la date de notation.

Le modèle retenu pour l'explication de l'incidence cumulée de la rouille orangée est composé de 4 variables explicatives :
- la date de notation ($p=2.10^{-6}$)
- le mode de gestion ($p=9.10^{-8)}$
- le type d'ombrage ($p=7.10^{-15}$)
- le degré d'ouverture de la canopée ($p=0.03$)

Le modèle concernant la cercosporiose suit le même principe que celui de la rouille orangée, Celui qui est retenu pour l'explication de l'incidence cumulée de cercosporiose est composé de 4 variables explicatives :
- date de notation ($p=6.10^{-5}$)
- le mode de gestion ($p=0.03$)
- le type d'ombrage ($p=4.10^{-8}$)
- le degré d'ouverture de la canopée ($p=3.10^{-8}$)

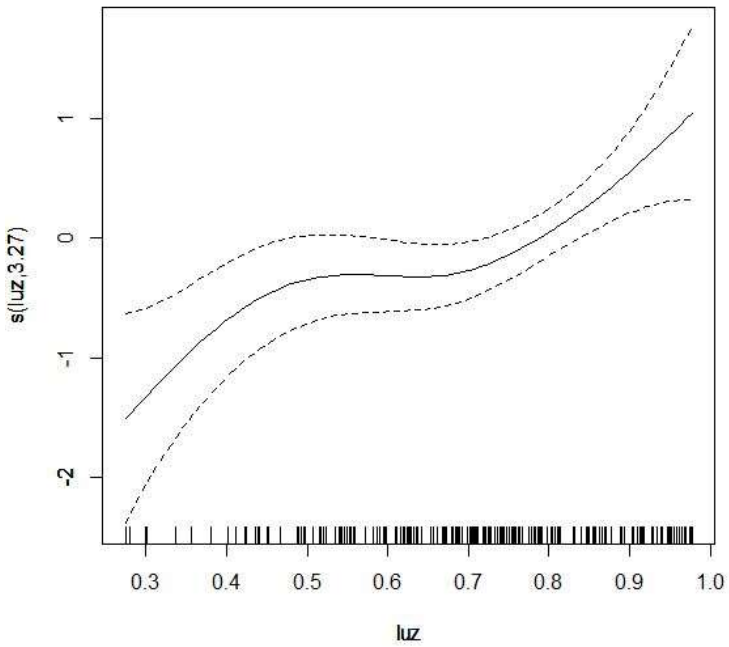


Figure 13 : Fonction de lissage du modèle retenu (avec erreur type) pour l'explication du nombre de fruits totaux en fonction du degré d'ouverture de la canopée (luz) . Les lignes verticales sur l'axe horizontal représentent les valeurs observées du degré d'ouverture de la canopée

3.2 Le scolyte des baies

Concernant le scolyte des baies, les données d'abondance de fruits totaux et fruits scolytés comprenaient un très grand nombre de zéros. Des données avec un grand nombre de zéros peuvent être analysées à l'aide de modèles ZIP (Zero-Inflated Poisson). Les modèles basés sur les distributions « zero-inflated » n'ont pu être utilisés dans le cas présent car ces modèles n'ont pas convergé. La prise en compte des valeurs nulles dans toute autre approche de modélisation entraînerait une sur-dispersion des résidus. En conséquence, les modèles concernant le scolyte des baies sont construits uniquement avec les 202 individus, ayant obtenu au moins un fruit au cours des 4 notations.

L'abondance de fruits totaux est modélisée à l'aide d'une généralisation d'une famille de Poisson : il s'agit d'une loi binomiale négative : au lieu de modéliser une succession d'évènements indépendants, on suppose qu'ils se produisent dans un milieu hétérogène (Bliss, 1953). Une famille suivant la loi de Poisson pouvait être adaptée car il s'agit de variables issues de comptages mais ici comme évoqué précédemment les données sont sur-dispersées dû à la présence de valeurs extrêmes. En effet, certains caféiers ont une productivité beaucoup plus importante que d'autres.

L'abondance de fruits totaux est modélisée avec l'ensemble des variables spatiales et environnementales car le but est d'utiliser la variable nombre de fruits totaux en covariable pour le modèle suivant. L'abondance de fruits totaux est expliquée par :
-l'interaction entre la longitude et la latitude (X,Y) ($p<2.10^{-16}$)
-le bloc ($p<2.10^{-16}$)
-la date de notation ($p=2.26.10^{-1}$)
-le degré d'ouverture de la canopée ($p=7.8.10^{-4}$)

La fonction de lissage (figure 13) indique que le nombre de fruits totaux augmente avec le degré d'ouverture de la canopée, c'est-à-dire que le nombre de fruits totaux est plus élevé dans les zones plus ensoleillées. Les erreurs type de cette fonction de lissage augmentent rapidement pour des degrés d'ouverture faibles en raison du faible nombre d'observation de fruits dans ces zones.

Pour la modélisation du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes, une famille binomiale est choisie car il s'agit d'un pourcentage compris entre 0 et 1. Le modèle retenu pour expliquer le pourcentage fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes intégrant les variables environnementales inclut :
- la date de notation ($p=4.10^{-4}$)
- le type d'ombrage ($p=2.10^{-10}$)
- le degré d'ouverture de la canopée ($p=8.10^{-8}$)
- le nombre de fruits totaux modélisés par le modèle précédent ($p<2.10^{-16}$)

L'utilisation de modèles linéaires généralisés a permis d'expliquer en partie la distribution spatiale. Pour les trois bioagresseurs, la dépendance spatiale est influencée par de la date de notation et le type d'ombrage. Les sorties des modèles testés pour la rouille orangée, la cercosporiose et la rouille orangée figurent respectivement en annexe IV, V, VI.

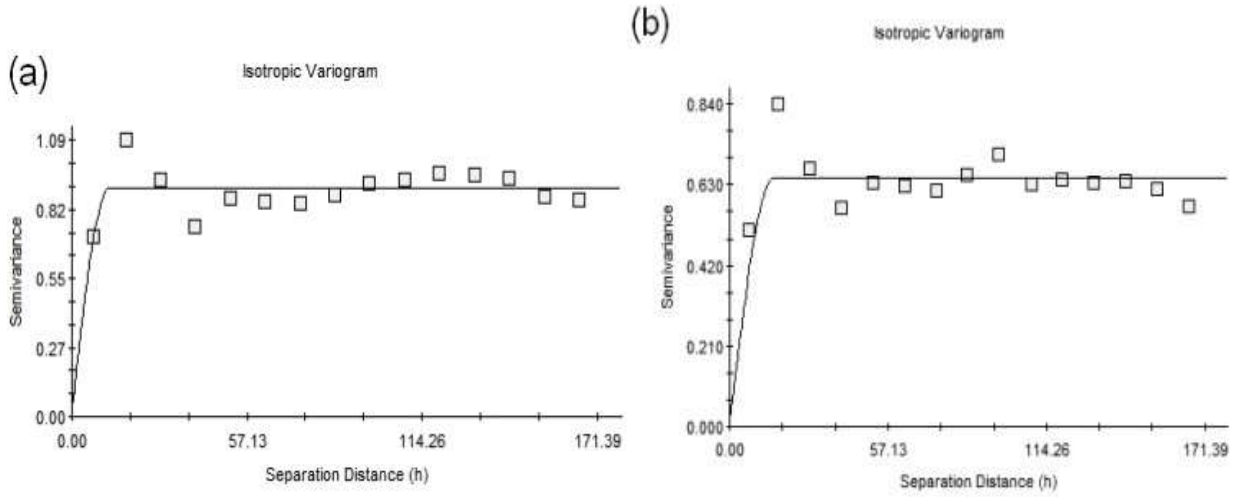


Figure 14: Semi variogramme des résidus du modèle GAM retenu pour la rouille orangée. Les points représentent les résidus du modèle retenu, la ligne le modèle d'ajustement (a) mai 2015 (b) juillet 2015 (N=418) : les résidus sont structurés spatialement

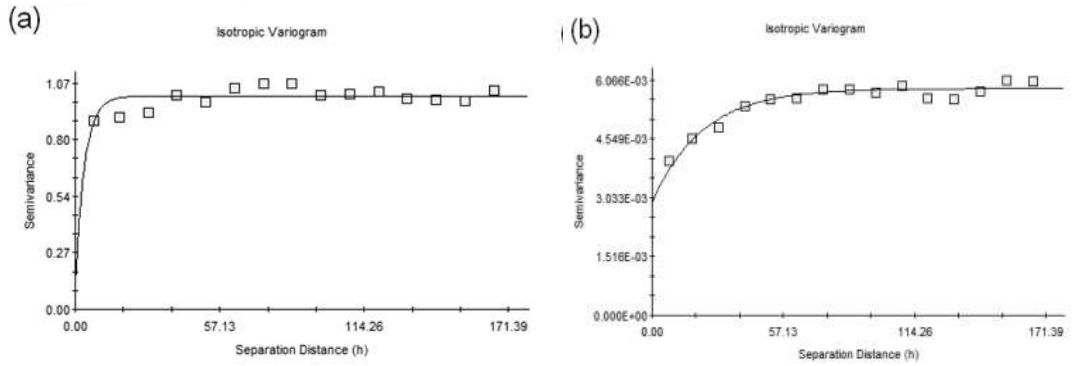


Figure 15: Semi variogramme des résidus du modèle GAM retenu pour la cercosporiose. Les points représentent les résidus du modèle retenu, la ligne le modèle d'ajustement (a) mai 2015 (b) juillet 2015 (N=418) : les résidus sont structurés spatialement

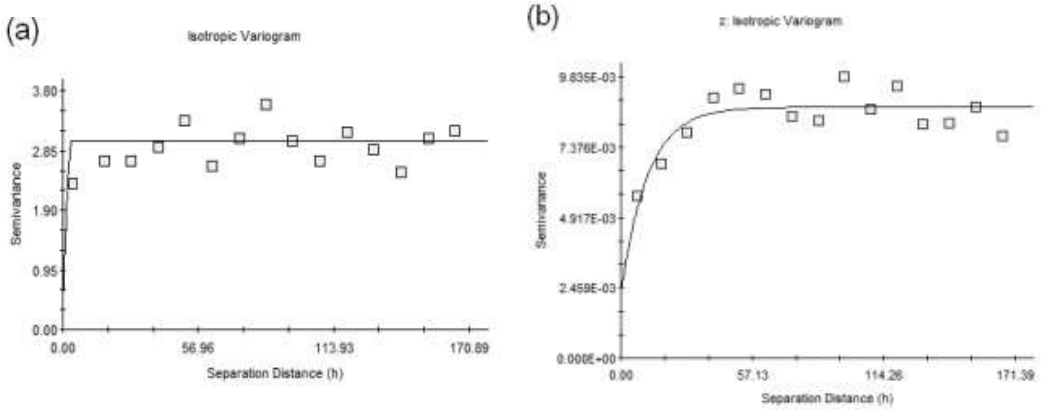


Figure 16 : Semi variogramme des résidus du modèle GAM retenu pour le scolyte. Les points représentent les résidus du modèle retenu, la ligne le modèle d'ajustement (a) mai 2015 (b) juillet 2015 (N=202) : les résidus sont structurés spatialement

Le degré d'ouverture de la canopée influence aussi la dépendance spatiale des trois bioagresseurs, mais de manière plus prononcée pour la cercosporiose ($p=3.10^{-8}$) et le scolyte ($p=8.10^{-8}$). La gestion de la parcelle affecte la dépendance spatiale de la rouille orangée et de la cercosporiose, mais cette fois de façon plus prononcée pour la rouille orangée ($p=9.10^{-8}$)

4. Analyse spatiale des résidus : une partie de la variance non expliquée par l'environnement (étape c)

Sur la figure 14, 15, 16 sont représentés respectivement les semi variogrammes des résidus des modèles GAM retenus pour la rouille orangée, la cercosporiose et le scolyte des baies pour les 2^{e} (avril 2015) et 4^{e} dates de notation (juin 2015).

Le meilleur ajustement de ces résidus dans le cas de la rouille orangée, est une fonction sphérique. Pour les semi-variogrammes des résidus du modèle GAM retenu pour la cercosporiose, la fonction d'ajustement est exponentielle. Pour le scolyte, le semi-variogramme de la première notation n'est pas pris compte, la somme au carré des résidus standardisés étant supérieure à 1, ainsi le semi variogramme de la notation 1 n'est pas interprétable. Pour les trois autres dates de notation, la fonction d'ajustement est une fonction sphérique. Les paramètres des fonctions d'ajustement figurent en annexe VII.

Les semi-variogrammes retenus sont isotopiques. Pour l'ensemble des trois bioagresseurs étudiés, l'analyse des semi-variogrammes révèle qu'il existe une dépendance spatiale élevée (Cambardella *et al.,* 1994). Pour la rouille orangée, la valeur de la portée évolue entre 12 et 15 mètres, pour la cercosporiose la portée évolue entre 10 et 11 mères, pour le scolyte des baies, la portée évolue entre 4 et 13 mètres. Les dépendances spatiales entre résidus s'exercent sur une distance faible.

En intégrant les variables environnementales dans le modèle, une partie des dépendances spatiales entre les caféiers a été prise en compte, mais elles ne permettent pas toujours de capturer l'ensemble de la dépendance spatiale. En effet, un phénomène spatial de second ordre est mis en évidence par la construction de ces semi-variogrammes. C'est-à-dire que d'autres variables influencent la dépendance spatiale des bioagresseurs.

5. Explication de la spatialisation des résidus en utilisant un modèle intégrant les variables environnementales et la position géographique des caféiers (étape d)

Ici, les modèles construits utilisent la même méthodologie présentée dans le paragraphe 3.2. Les variables spatiales (latitude, longitude et bloc) sont intégrées dans les modèles précédents (3.3)

Le modèle retenu pour l'explication de l'incidence cumulée de la rouille orangée intégrant les variables spatiales et environnementales inclut :

- la date de notation ($p=1.10^{-6}$)
- le mode de gestion ($p=1.10^{-15}$)
- le type d'ombrage ($p=2.10^{-7}$)
- le bloc *(p=0.01)*
- l'interaction (X, Y) ($p<2.10^{-16}$)

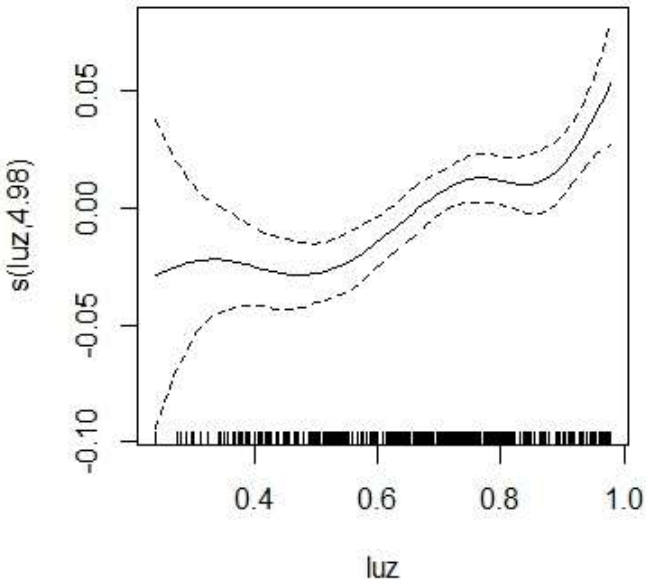


Figure 17 : Fonction de lissage du modèle retenu (avec erreur type) pour l'explication des données d'incidence cumulée de la cercosporiose en fonction du degré d'ouverture de la canopée (luz) . Les lignes verticales sur l'axe horizontal représentent les valeurs observées pour le degré d'ouverture de la canopée

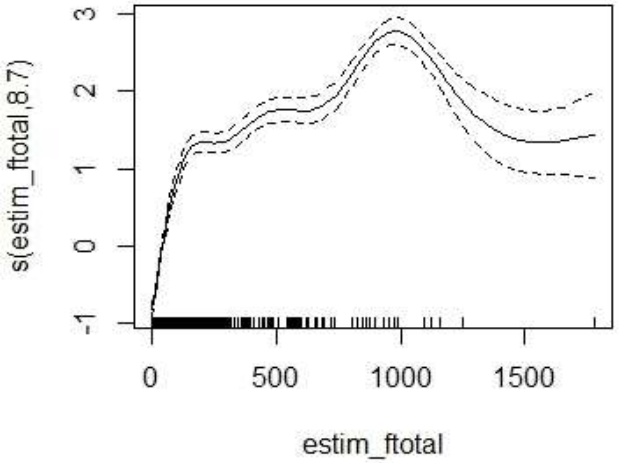


Figure 18 : Fonction de lissage du modèle retenu (avec erreur type) pour l'explication du % de fruits scolytés en fonction du du nombre de fruits totaux estimés (estim_ftotal). Les lignes verticales sur l'axe horizontal représentent les valeurs observées pour le nombre de fruits totaux

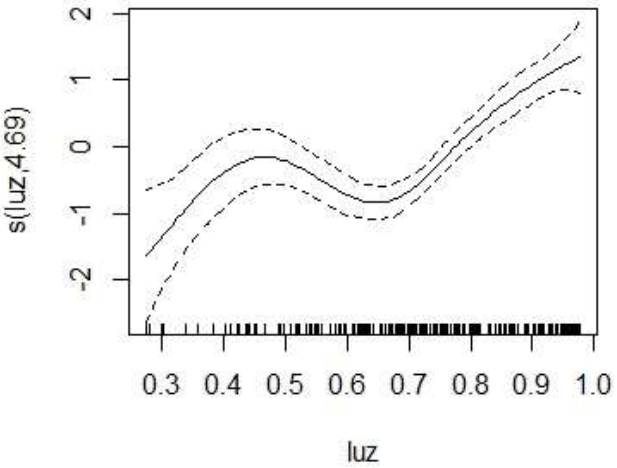


Figure 19 : Fonction de lissage du modèle retenu (avec erreur type) pour l'explication du % de fruits scolytés en fonction du degré d'ouverture de la canopée (luz). Les lignes verticales sur l'axe horizontal représentent les valeurs observées pour le degré d'ouverture de la lumière

Les variables spatiales latitude et longitude (X, Y) incluent probablement l'effet ouverture de la canopée qui elle-même est spatialisée. Cette dernière variable devient alors non significative à p=0.05.

Le modèle retenu pour l'explication de l'incidence cumulée de la cercosporiose intégrant les variables spatiales et environnementales inclut :
- la date de notation ($p<2.10^{-16}$)
- le mode de gestion (p=3.10^{-4})
- le type d'ombrage (p=0.02)
- le degré d'ouverture de la canopée (p=4.10^{-4})
- l'interaction (X, Y) (p<2.10^{-16})

La fonction de lissage de la figure 17 indique que l'incidence cumulée de la cercosporiose augmente avec le degré d'ouverture de la canopée, c'est-à-dire que l'incidence de la cercosporiose est plus élevée dans les zones plus ensoleillées. Les erreurs type de cette fonction de lissage augmentent rapidement pour des degrés d'ouverture de la canopée faible en raison du faible nombre d'observations.

Le modèle retenu pour l'explication du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes intégrant les variables spatiales et environnementales inclut :
- la date de notation ($p<2.10^{-16}$)
- le type d'ombrage ($p=3.10^{-8}$)
- le degré d'ouverture de la canopée (p=2.10^{-8})
- le nombre de fruits totaux (p<2.10^{-16})
- l'interaction (X, Y, date de notation) (p<2.10^{-16})

La fonction de lissage de la figure 18 illustre la relation globalement positive entre le pourcentage de fruits scolytés et le nombre total de fruits. Les erreurs type de cette fonction de lissage augmentent rapidement pour des effectifs de fruits totaux supérieurs à 1000, en raison du faible nombre d'observations. Si l'on prend en compte l'intervalle compris entre 0 et 1000 fruits (où les erreurs type de cette fonction de lissage sont plus faibles), plus il y a de fruits totaux, plus le pourcentage de fruits scolytés sera élevé.

La fonction de lissage de la figure 19 illustre la relation à tendance positive entre le pourcentage de fruits scolytés et le degré d'ouverture de la canopée: dans les zones ensoleillées, le pourcentage de fruits scolytés est plus important que dans les zones ombragées. Les erreurs type de cette fonction de lissage sont élevées pour des degrés d'ouverture de la canopée compris entre 0 et 0.4 dû au faible nombre d'observations.

L'ensemble des sorties des modèles pour la rouille orangée, la cercosporiose et le scolyte fiugrent respectivement en annexe VIII, IX et X. Le tableau 4 compare l'AIC des modèles contenant uniquement des variables environnementales (étape c), et des modèles contenant variables environnementales et variables spatiales (étape d). Le fait de rajouter les variables spatiales (X, Y) et le bloc (pour le cas de la rouille orangée) permet d'obtenir des AIC plus faibles. Par conséquent les modèles prenant en compte à la fois variables environnementales et spatiales permettront de faire de meilleures prédictions.

Tableau 4 : Comparaison de l'AIC des modèles contenant uniquement des variables environnementales, et des modèles contenant variables environnementales et variables spatiales (AIC =critère d'information d'Akaike)

Variables expliquées	Type variables contenu dans le modèle GAM	AIC
Incidence cumulée de la rouille orangée	variables environnementales	-725
	variables environnementales+ variables spatiales	-799
Incidence cumulée de la cercosporiose	variables environnementales	-3989
	variables environnementales+ variables spatiales	-3748
%(fruits scolytés/fruits aptes)	variables environnementales	3662
	variables environnementales+ variables spatiales	3093

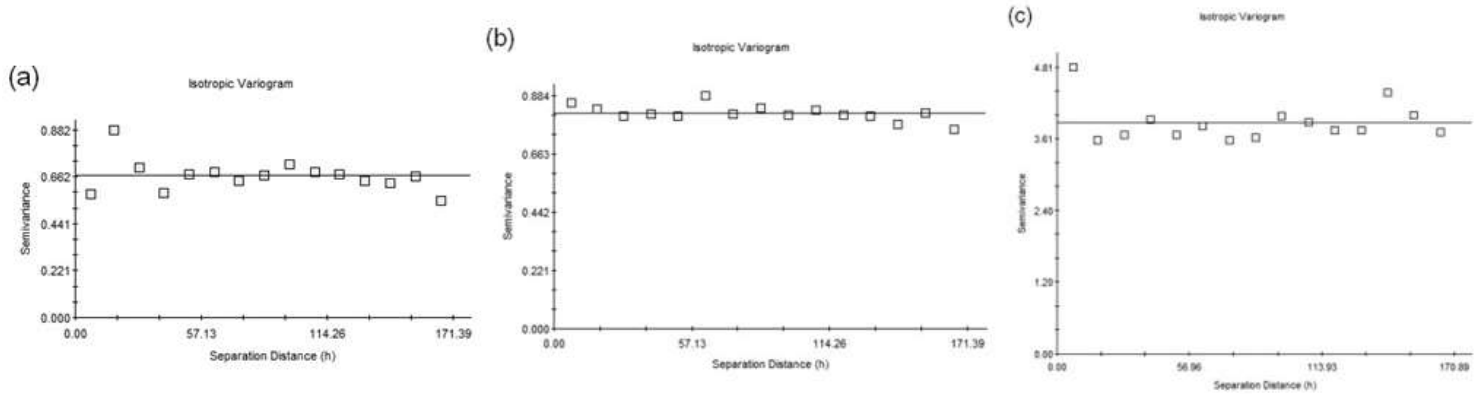


Figure 20 : Semi-variogrammes des résidus des modèles GAM retenus intégrant variables environnementales et spatiales pour la rouille orangée (a), la cercosporiose (b), le scolyte des baies (c) pour la date de juin 2015. Les points représentent les résidus du modèle retenu, la ligne le modèle d'ajustement

6. Vérification de la distribution spatiale des résidus du modèle complet intégrant les variables environnementales et la position géographique (étape e)

Sur la figure 20 sont représentés les semi-variogrammes des résidus du modèle global retenu à l'étape (d) pour la rouille orangée, la cercosporiose, et le scolyte de baies pour la dernière notation (juin 2015).

Pour l'ensemble des 3 bioagresseurs étudiés, l'analyse des semi-variogrammes permet de vérifier le fait que les résidus ne soient plus structurés spatialement : la fonction d'ajustement est une fonction linéaire. Cela n'est pas étonnant, puisque les coordonnées géographiques des caféiers ont été incluses dans le modèle. La dépendance spatiale résiduelle observée à l'étape (c) est donc expliquée. Par conséquent, le modèle GAM incluant des variables environnementales et variables spatiales permet d'expliquer l'ensemble de la dépendance spatiale observée à l'étape a.

7. Construction d'une carte prédictive de la distribution des bioagresseurs grâce au modèle complet intégrant les variables environnementales et la position géographique (étape f)

L'annexe 0 pourra être utilisée pour repérer les différentes unités expérimentales de l'essai, ainsi que le degré d'ouverture de la canopée. La figure 21 illustre l'évolution de l'épidémie de rouille orangée entre avril et juin 2015. L'évolution de la maladie est assez hétérogène avec des zones où en avril 2015 l'incidence cumulée de la rouille est élevée (60-80 %) et d'autres zones où la maladie est absente. Une progression de la maladie vers les zones saines est visible entre avril et juin, cependant il semble que les sous parcelles correspondant au facteur « mode de gestion » limitent la progression de la maladie. Le motif de distribution de la rouille est assez diffus et il est structuré spatialement par la gestion des parcelles. En annexe XI figurent les cartes prédictives de l'incidence cumulée de la rouille orangée pour les quatre suivis épidémiologiques.

Une autre tendance est observée pour la distribution spatiale de la cercosporiose (figure 22) et du scolyte (figure 22). En avril 2015, l'incidence cumulée moyenne des caféiers est comprise entre 0 et 10 %. La distribution de la cercosporiose n'est pas uniforme, en effet il y a présence de zones où se concentre de la maladie. On peut parler de distribution agrégative. L'observation de ces agrégats montre que leur localisation correspond majoritairement à des parcelles sans arbre d'ombrage. En juin 2015, on observe une expansion des agrégats, avec toutefois des zones où la cercosporiose est absente. En annexe XII figurent les cartes prédictives de l'incidence cumulée de la cercosporiose pour les quatre suivis épidémiologiques.

Pour le cas du scolyte (figure 23), en avril 2015, des foyers de scolytes (10-15 % de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes) peuvent être aussi identifiés. En juin 2015, une expansion des foyers existants est observée ainsi que l'apparition de nouveaux foyers. En annexe XIII et XII bis figurent les cartes prédictives du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes, ainsi que les cartes prédictives du nombre de fruits totaux au cours des quatre suivi épidémiologiques.

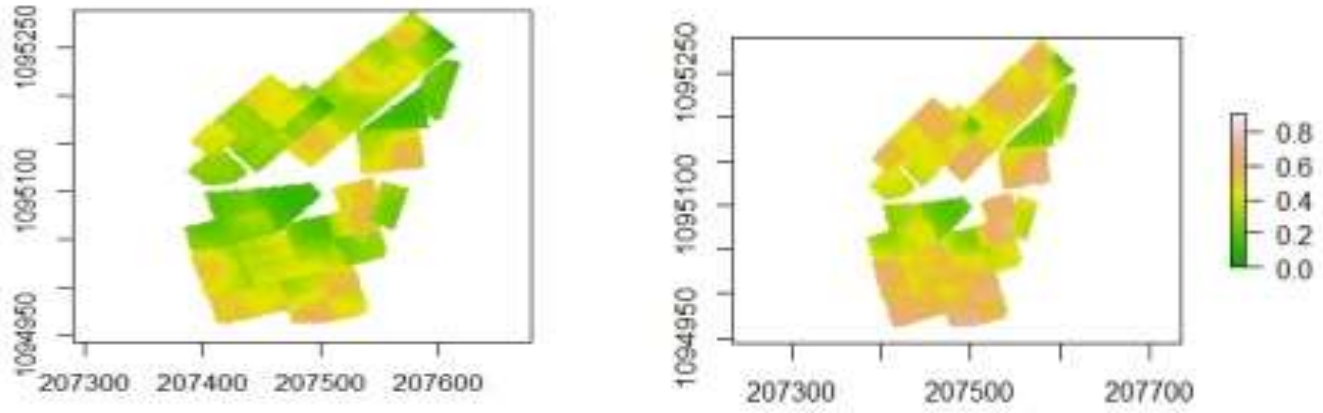


Figure 21 : Carte prédictive de l'incidence cumulée de la rouille en avril 2015 (à gauche) et en juin 2015 (à droite). La latitude et la longitude y sont représentées. L'échelle représente l'incidence cumulée de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum

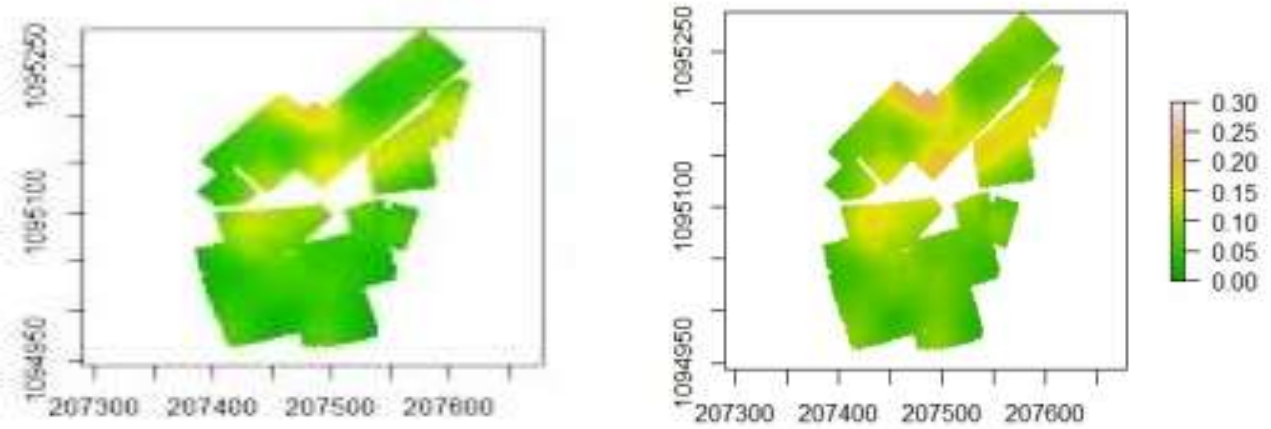


Figure 22 : Carte prédictive de l'incidence cumulée de la cercosporiose avril 2015 (à gauche) et en juin 2015 (à droite). La latitude et la longitude y sont représentées. L'échelle représente l'incidence cumulée de la cercosporiose de 0 (vert) à 0.3 (rosé) ; le maximum possible vaut 1

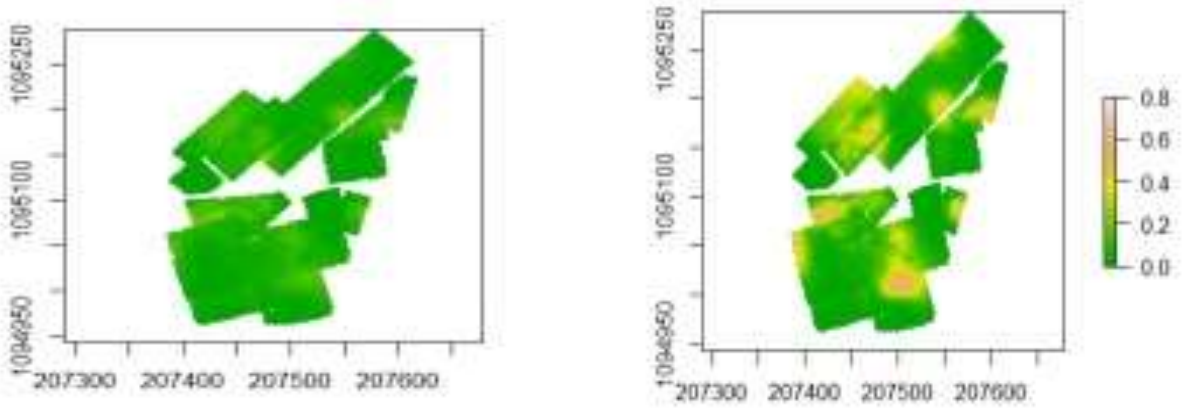


Figure 23 : Carte prédictive du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes en avril 2015 (à gauche), en juin 2015 (à droite). La latitude et la longitude y sont représentées. L'échelle représente l'incidence de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1.

IV. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

1. Retour sur la méthodologie utilisée

Des observations épidémiologiques mensuelles ont permis de caractériser la distribution spatiotemporelle de trois bioagresseurs du café et d'en déduire des patrons de dispersion.

L'originalité de cette étude repose sur la construction d'un modèle, pas à pas, qui explique la dépendance spatiale des caféiers vis-à-vis des attaques de bioagresseurs en prenant en compte l'hétérogénéité d'une parcelle d'agroforesterie.

Cette approche est nouvelle. On opposera à notre étude celle de Bedimo et al. (2007) où les auteurs en déduisent des patrons de dispersion de l'agent pathogène responsable du Coffee Berry Disease sur caféier Arabica (*Colletotrichum kahawae)* dans une parcelle ombragée sans prendre en compte l'hétérogénéité conférée par les arbres d'ombrage.

Dans notre étude, la caractérisation de l'ombrage des parcelles a montré des conditions d'ensoleillement très hétérogènes liées à la nature des espèces d'ombrage présentes et à leur nombre. Cette hétérogénéité, qui est spatialisée, explique en partie la spatialisation des bioagresseurs. Nous avons montré que la spatialisation des bioagresseurs dépend, par ailleurs, de leur capacité à se disperser La déviance des modèles généralisés additifs reste faible (entre 27 et 58 % selon les bioagresseurs). Les prédictions sur les cartes permettent de délimiter les patrons de distribution et la présence éventuelle de foyers, mais de façon certainement imprécise.

2. Une dépendance spatiale observée différentes selon les bioagresseurs

L'utilisation de semi-variogrammes a permis de mettre en évidence une distribution spatiale des bioagresseurs au sein de la parcelle agroforestière. La portée de la dépendance spatiale augmente au cours du temps (sans doute dû à de meilleurs conditions pour le développement) et dépend des bioagresseurs. Celle de la rouille orangée évolue entre 27 et 36 m, celle de la cercosporiose évolue entre 13 et 33 m, celle du scolyte entre 16 et 55 m.

Les valeurs obtenues dans les travaux d'Alves *et al.,* (2008) sont plus élevées entre 38 et 84 m pour la rouille orangée du café et légèrement plus faibles ente 0.3 et 23 m pour la cercosporiose, équivalentes pour le scolyte (22-69m). Mais, cette étude diffère profondément de la nôtre, car elle s'intéressait à la progression de chaque maladie entre années, avec une seule observation par an et seulement trois années de relevés.

2.1 Les variables environnementales qui expliquent la dépendance spatiale diffèrent en fonction des bioagresseurs.

Si le degré d'ouverture de la canopée n'est pas le facteur déterminant permettant d'expliquer l'incidence cumulée de la rouille orangée et donc sa distribution spatiale, les variables telles que le type d'ombrage et le type de gestion permettent de l'expliquer.

Le type d'ombrage peut favoriser les étapes de pré-infection (comme la germination et la pénétration) du pathogène. En effet, une durée d'humectation élevée (Avelino *et al.,* 2012), une température comprise entre 22 et 23 °C (Nutman *et al.,* 1960), et l'absence de rayonnement sont les conditions optimales pour la germination des spores. Ces conditions sont rencontrées dans les caféières ombragées. De plus, le type d'ombrage peut influencer la dispersion de la maladie.

Les gouttes de pluie interceptées par l'ombrage peuvent augmenter de taille et acquérir une plus forte énergie cinétique qui causera de forts impacts sur les feuilles du caféier, libérant à sec ou via splashing (éclaboussures) les urédospores (Nutman *et al.,* 1963 ; Boudrot *et al.,* 2015). Cet effet va dépendre du type d'arbre d'ombrage : sa hauteur, la forme de ses feuilles, la surface spécifique.

Au sein de l'essai, l'organisation spatiale des parcelles aux différents types de gestion structure aussi la distribution de la rouille. L'application de produits fongicides spécifiquement contre la rouille, comme le cyproconazole au niveau des parcelles avec de forts niveaux d'intrants (parcelles AC) permet de maintenir de faibles incidences cumulées de cette maladie – au contraire au niveau des parcelles avec de faibles niveaux d'intrants, les incidences de rouille orangée seront plus élevées.

Concernant la nutrition azotée, les parcelles à faibles niveaux d'intrants, peu fertilisées (parcelles BO) se voient plus attaquées par la rouille, avec des incidences pouvant dépasser 60 % en juin. Ceci est en accord avec les résultats de Cristancho *et al.,*. (2012) rapportant que des carences minérales sont l'une des causes de l'épidémie de rouille en Colombie dans les années 2008-2011 et au Costa Rica en 1989.

.

Pour la cercosporiose et le scolyte, c'est surtout le degré d'ouverture de la canopée et le type d'ombrage qui influence la distribution spatiale. L'incidence cumulée de la cercosporiose est plus élevée dans les trous de lumière provoquée par une interruption de la canopée des arbres d'ombrage. Ceci confirme les travaux d'Echandi *et al.,*. (1969) indiquant que la germination des spores est favorisée par des températures supérieures à 30°C, et la colonisation dans les tissus lorsque l'humidité relative est faible, conditions qui sont fréquemment rencontrées dans les zones ensoleillées. Le type de gestion affecte aussi la distribution spatiale de la cercosporiose, les plantes en carence nutritive sont plus sensibles à ce champignon (Wrigley *et al.,* 1988). En effet, la cercosporiose est considérée comme un parasite de faiblesse qui infecte préférentiellement les plantes présentant des déséquilibres nutritionnels (Echandi *et al.,*. 1959). Ces déséquilibres se présentent quand le rapport fruit/feuille est trop grand. Une mauvaise fertilisation azotée affectant négativement l'apparition de nouvelles feuilles pourra en être à l'origine, mais aussi une charge fruitière trop élevée (Fernández *et al.,* 1966). Sur l'essai, des foyers de cercosporiose sont observés dans les parcelles faiblement ombragées mais à forts niveaux d'intrants. Il apparaît que, malgré les niveaux d'intrants élevés, les caféiers de ces parcelles présentent des déséquilibres nutritionnels, probablement liés à leur charge fruitière, qui les prédisposent aux attaques de la cercosporiose.

Sur l'essai expérimental, une majorité de caféiers ne présentait que peu ou pas de fruits. Il a été possible, cependant, de démontrer que le taux de baies infestées par le scolyte était plus important lorsque le degré d'ouverture de la canopée était élevé. Arcila *et al.* (1993) ont montré que l'ombrage réduit l'intensité de floraison et que le nombre de fruits par branche fruitière est plus faible ; c'est-à-dire que dans les zones ombragées, la ressource en fruits est plus faible. Par conséquent, les populations de scolyte se concentrent dans les trous de lumière car la ressource en fruits y est plus abondante.

Cependant l'ombrage tend à favoriser la reproduction et la survie du scolyte. Baker *et al.,* (1986) rapportent que l'optimum du développement et la survie du scolyte se trouve entre 90 et 95 % d'humidité relative et à 25 °C, conditions souvent rencontrées sous ombrage. Notre étude conduite au cours d'une année où la charge fruitière sous ombrage était quasiment inexistante est particulière. Il conviendra de poursuivre l'étude en 2016 avec une charge fruitière plus élevée.

2.2 Des capacités de dispersion des bioagresseurs expliquant la dépendance spatiale ?

Une partie de la dépendance spatiale entre les caféiers a été prise en compte, en intégrant les variables environnementales dans le modèle, mais elles ne permettent pas toujours de capturer l'ensemble de la dépendance spatiale. En effet, un phénomène spatial de second ordre a été mis en évidence. On suppose que les phénomènes liés à la capacité de dispersion des bioagresseurs rentreraient en jeu.

En d'autres termes, la portée du semi-variogramme construit à partir des résidus du modèle intégrant uniquement les variables environnementales représente la capacité de dispersion du bioagresseur. Ainsi, la distance de dispersion de la rouille orangée au sein de l'essai serait comprise entre 12 et 15 mètres, pour la cercosporiose entre 10 et 11 mètres et 4 à 13 mètres pour le scolyte des baies.

Dans la littérature, ces trois bioagresseurs ont des capacités de dispersion différentes. En effet, la rouille orangée est capable de se disperser à de grandes distances par le vent, entre régions productrices de café (Rivillas *et al.,* 2011 ; Avelino 2012). Certaines études montrent que la rouille orangée du café a probablement été introduite en Amérique en étant transportée par le vent depuis l'Afrique (Bowden *et al.,* 1971). La pluie agit sur de plus courtes distances (effets splash, et tap and puff – impact et libération). Pour la cercosporiose, ses conidies sont dispersées principalement par la pluie mais aussi par le vent, résultant d'une dispersion de quelques mètres à quelques centaines de m (Echandi et *al.,* 1959). Pour le scolyte, ce sont les femelles qui sont responsables de la dispersion de la population par le vol, mais seulement en période de carence de fruits, à l'intersaison (entre janvier et mai). On considère aussi que le scolyte se déplace sur des distances de quelques dizaines de mètres au plus. Dès que les fruits sont disponibles, les déplacements se font par la marche et sont donc beaucoup courts (Castano *et al.,* 2005 ; Baker *et al.,* 1986)

Dans notre essai, la distance de dispersion des bioagresseurs est faible et quasi-similaire pour les trois bioagresseurs. Cette similarité est particulièrement étonnante pour le cas de la rouille orangée. Cela peut être expliqué par : (i) l'effet brise-vent des arbres d'ombrage empêchant la dispersion à grande échelle par le vent (Jose *et al.,* 2009 ; Schroth *et al.,* 2000) (ii) l'effet des traitements phytosanitaires qui structure fortement la distribution de la rouille. Toutefois, l'observation des cartes de prédiction de la distribution spatiotemporelle de ces bioagresseurs permet de visualiser une dispersion de proche en proche, même pour le cas de la rouille orangée.

3. Des perspectives dans les méthodes de lutte

La construction de cartes prédictives à partir du modèle est un outil qui permet de mieux comprendre le développement des épidémies dans un système complexe, en l'occurrence un système agroforestier. Différents types de méthodes de lutte spécifiques peuvent être appliquées en fonction des trois bioagresseurs étudiés.

Sur la carte prédictive des épidémies de rouille, les motifs spatiaux de la rouille orangée sont assez diffus et c'est le mode de gestion qui affecte en grande partie la dépendance spatiale, l'application d'une méthode de lutte «spécifique à un site» ne paraît pas adaptée. La lutte doit être préventive en protégeant l'ensemble de la ferme. L'utilisation de fongicides systémiques est aujourd'hui très répandue et semble justifiée.

Les motifs spatiaux de la distribution de la cercosporiose sont agrégés, avec l'apparition de quelques foyers qui ensuite s'agrandissent (figure X). Ces motifs agrégés sont aussi retrouvés dans l'étude d'Alves *et al.,* (2008). Cela suggère une méthode de lutte « foyer-spécifique », (Liebhold *et al.,* 1993) c'est-à-dire que les zones infectées par la cercosporiose doivent être ciblées pour éviter un développement de la maladie. Les populations de scolytes sont aussi fortement agrégées. Ces motifs sont aussi retrouvés dans l'étude d'Alves *et al.* (2008).

Cela suggère que l'infestation des parcelles pourrait résulter du développement d'une population à partir de foyers localisés dans les zones favorables au développement du scolyte.

L'hypothèse envisagée ici sur la formation de ces foyers est que la ressource en fruits se situe au sein des zones ensoleillées attirant les femelles fondatrices. En ciblant les zones infestées le plus tôt (environ 110 jours après la floraison correspondant à l'apparition des fruits aptes) (DaMatta *et al.,* 2007), la propagation du scolyte sur l'essai pourrait être limitée. Actuellement, les pièges destinés à la lutte contre la prolifération des scolytes des baies dans les plantations de caféier, notamment les pièges Brocap ® (CIRAD, 2004 ; Dufour *et al.,* 2005) sont répartis de façon uniforme sur l'ensemble de l'essai. La pose de ces pièges au niveau des « trous de lumières » de la canopée plutôt que de façon uniforme est une idée à explorer.

4. Des perspectives méthodologiques

L'hétérogénéité spatiale du degré d'ouverture de la canopée ne permet pas de renseigner sur l'ensemble des variations microclimatiques d'une parcelle. Toutefois, elle s'avère être un indicateur du microclimat intéressant pour la formulation d'hypothèses sur la distribution spatiale des bioagresseurs dans des agroécosystèmes complexes. Cependant, les photos hémisphériques ont réalisées à 20 cm au-dessus des caféiers prenant en compte seulement l'ombrage fourni par les arbres associés au caféier. Or, les caféiers forment une strate de végétation et produisent un auto-ombrage, c'est-à-dire que les feuilles du haut créent un ombrage sur celles du bas. De plus, chaque caféier étant au contact de ses voisins, il y a un effet d'auto-ombrage inter et intra-caféiers non pris en compte dans l'étude. Intégrer le frondaison des caféiers dans l'étude pourrait donc améliorer la précision des modèles.

Par ailleurs, les parcelles sur l'essai expérimental sont proches ; l'effet d'un arbre d'ombrage sur une parcelle peut avoir un effet sur le microclimat d'une parcelle située à proximité. En effet, on suppose qu'il existe un effet d'interaction non pris en compte entre les parcelles relativement proches, mais qu'il conviendrait d'essayer d'inclure dans une prochaine analyse.

Certains paramètres de l'environnement pouvant influencer le développement spatio-temporel des bioagresseurs n'ont pas été sont pas pris en compte et pourraient améliorer la précision du modèle, comme la présence des ennemis naturels. La présence de *Lecanicillium lecanii*, hyperparasite de la rouille orangée du café a été suivie au cours de différentes dates de notation. La proportion de feuilles malades hyperparasitées par *L. lecanii* a été calculée pour chaque caféier. Elle oscille entre 1 et 3 % ; cependant ces données comprennent un trop grand nombre de zéros et les modèles statistiques n'ont pas convergé.

Il convient de poursuivre ces suivis jusqu'à la fin de cette année pour voir l'expression maximale des bioagresseurs au sein de l'essai. De plus, cette année la productivité des caféiers était peu importante, même si il a été possible de montrer l'influence du degré d'ouverture de la canopée sur le développement du scolyte, il conviendrait de répéter cette étude lors d'une année plus productive pour confirmer ces résultats.

V. CONCLUSION

Ce travail, situé à l'interface de plusieurs disciplines : phytopathologie, agronomie et modélisation, apporte des pistes pour approfondir nos connaissances dans les mécanismes de distribution des bioagresseurs dans les systèmes agroforestiers. Notre approche originale permet de prendre en compte le milieu, par nature hétérogène, pour mieux comprendre les patrons de dispersion des bioagresseurs. A notre connaissance, c'est la première fois que l'on utilise une telle approche pour l'étude de la distribution spatiotemporelle des bioagresseurs. Ici, les effets de l'hétérogénéité spatiale d'un système agroforestier ainsi que la capacité de dispersion des trois bioagresseurs ont permis d'expliquer leur distribution spatio-temporelle.

Cette distribution spatiale varie pour chaque bioagresseur. Le type de gestion est l'un des facteurs qui influence la distribution spatiale de la rouille orangée du café, tandis que le type d'ombrage et le degré d'ouverture de la canopée va influencer la distribution de la cercosporiose et du scolyte des baies.

Notre étude la complexité de la distribution spatiale des bioagresseurs dans un milieu hétérogène, et les difficultés que pourrait avoir un producteur à affronter cette complexité. Au-delà d'une meilleure connaissance des mécanismes de dispersion des bioagresseurs dans un système agroforestier, les patrons de dispersion des bioagresseurs observés à partir des cartes prédictives peuvent apporter des pistes de réflexion pour la conception de nouveaux modes de gestion de ces bioagresseurs. En effet, pour le scolyte et la cercosporiose, une lutte foyer spécifique est envisageable

Toutefois, il apparaît nécessaire de ne pas raisonner à l'échelle d'un bioagresseur spécifique, mais plutôt d'appréhender la complexité du cortège de bioagresseurs. Des cartes de prédiction illustrant l'évolution des pressions parasitaires, dans leur globalité, pourraient être envisagées, à l'aide d'outils géostatistiques : zones à fortes pressions, moyennes pressions, faibles pressions.

VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

Alves, Marcelo C, Da Silva, Fábio M, Moraes, Jair Campos, Pozza, Edson A, de Oliveira, Marcelo S, Souza, Júlio CS, & Alves, Luciana S. (2011). Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. *Precision Agriculture, 12*(1), 18-31.

Anderson, Pamela K, Cunningham, Andrew A, Patel, Nikkita G, Morales, Francisco J, Epstein, Paul R, & Daszak, Peter. (2004). Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology & Evolution, 19*(10), 535-544.

Avelino, J, Muller, RA, Cilas, C, & Velasco Pascual, H. (1991). Développement et comportement de la rouille orangée du caféier (Hemileia vastatrix Berk. et Br.) dans des plantations en cours de modernisation, plantées de variétés naines, dans le sud-est du Mexique. *Café, cacao, thé, 35*(1), 21-42.

Avelino J., Toledo JC, Medina B. (1993). Développement de la rouille orangée (Hemileia vastatrix) dans une plantation du sud ouest du Guatemala et évaluation des dégâts qu'elle provoque. In: Quinzième colloque scientifique international sur le café, Montpellier (France), 6-11 juin 1993. p. 293-302. *Quinzième colloque scientifique international sur le café, Montpellier (France), 6-11 juin 1993*, 293-302.

Avelino, Jacques, Romero-Gurdián, Alí, Cruz-Cuellar, Héctor F, & Declerck, Fabrice AJ. (2012). Landscape context and scale differentially impact coffee leaf rust, coffee berry borer, and coffee root-knot nematodes. *Ecological applications, 22*(2), 584-596.

Avelino, Jacques, Ten Hoopen, G Martijn, & DeClerck, F. (2011). Ecological mechanisms for pest and disease control in coffee and cacao agroecosystems of the neotropics. *Ecosystem Services from Agriculture and Agroforestry Measurement and Payment. London: Earthscan*, 91-117.

Baillargeon, S. (2005). Le krigeage: revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale des données de précipitations. *Université de Laval, Québec*.

Baker PS. (1986). Biología, ecología y hábitos de la broca. *CURSO Regional sobre Manejo Integrado de Plagas del Cafeto con Enfasis en Broca del Fruto/Hypothenemus hampei/Ferr. San Pedro Sula (Honduras), 21-26 Julio, 1986.*.

Bedimo, Joseph Aubert Mouen, Dufour, Bernard P, Cilas, Christian, & Avelino, Jacques. (2012). Effets des arbres d'ombrage sur les bioagresseurs de Coffea Arabica. *Cahiers Agricultures, 21*(2), 89-97.

Bergamin, J. (1943). Contribuição para o conhecimento da biologia da broca do café Hypothenemus hampei (Ferrari, 1867)(Col. Ipidae). *Arq. Inst. Biol, 14*, 31Ð72.

Boudrot Audrey, Jimmy Pico, Isabelle Merle, Eduardo Granados, Sergio Vílchez, Philippe Tixier, Elías de Melo Virginio Filho, Fernando Casanoves, Ana Tapia, Clémentine Allinne, Robert A. Rice, Jacques Avelino. (2015). (en cours de publication) Shade Effects on the Dispersal of Airborne Hemileia vastatrix Uredospores.

Bliss, R.A Fisher. (1953). Fitting the Negative Binomial Distribution to Biological Data. Retrieved http://www.jstor.org/stable/3001850, Vol. 9, No. 2 (Jun., 1953)

Cambardella, CA, Moorman, TB, Parkin, TB, Karlen, DL, Novak, JM, Turco, RF, & Konopka, AE. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society of America journal, 58*(5), 1501-1511.

Cerdán, CR, Rebolledo, MC, Soto, G, Rapidel, B, & Sinclair, FL. (2012). Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems, 110*, 119-130.

Change, IPCC Intergovernmental Panel on Climate. (2007). Summary for policymakers. In Climate Change *Cambridge*, 18.

Cristancho, MA, Rozo, Y, Escobar, C, Rivillas, CA, & Gaitán, AL. (2012). Outbreak of coffee leaf rust (Hemileia vastatrix) in Colombia. *New Disease Reports, 25*(19), 2044-0588.2012.

DaMatta, Fábio M, Ronchi, Cláudio P, Maestri, Moacyr, & Barros, Raimundo S. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology, 19*(4), 485-510.

Damon, A. (2000). A review of the biology and control of the coffee berry borer, Hypothenemus hampei (Coleoptera: Scolytidae). *Bulletin of entomological research, 90*(06), 453-465.

Draper, NR, & Smith, Harry. (1981). Applied regression analysis, 709 pp: John Wiley, New York.

Dufour, BP, González, MO, Mauricio, JJ, Chavez, BA, & Ramírez, R. (2005). *Validation of coffee berry borer (CBB) trapping with the Brocap® trap.* Paper presented at the ASIC 2004. 20th International Conference on Coffee Science, Bangalore, India, 11-15 October 2004.

Echandi, E. (1959). La chasparria de los cafetos causada por el hongo Cercospora coffeicola Berk. & Cooke. *Turrialba*, *9*(2), 54-67.

Fernández Borrero, O, Mestre Mestre, A, & López Duque, S. (1966). Efecto de la fertilización en la incidencia de la mancha de hierro (Cercospora coffeicola) en frutos de café. *Cenicafé (Colombia).*

Fernando, López Bravo Donal. (2001). Efecto de la carga fructífera sobre la roya (Hemileia vastatrix) del café, bajo condiciones microclimáticas de sol y sombra, en Turrialba, Costa Rica.

Guisan, Antoine, Edwards, Thomas C, & Hastie, Trevor. (2002). Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological modelling, 157*(2), 89-100.

Haggar, J, Barrios, M, Bolaños, M, Merlo, M, Moraga, P, Munguia, Rodolfo, . . . Staver, Charles. (2011). Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agroforestry Systems, 82*(3), 285-301.

Hastie, Trevor, & Tibshirani, Robert. (1986). Generalized additive models. *Statistical science*, 297-310.

Hughes, G, & Madden, LV. (1993). Using the beta-binomial distribution to describe aggegated patterns of disease incidence. *Phytopathology, 83*(7), 759-763.

Isaaks, E.; SRIVASTAVA, M. (1989). An introduction to applied geostatistics. *Oxfort university press, New York*, 561p.

Jaramillo, J, Borgemeister, C, & Baker, P. (2006). Coffee berry borer Hypothenemus hampei (Coleoptera: Curculionidae): searching for sustainable control strategies. *Bulletin of entomological research, 96*(03), 223-233.

Jay, M, Hoef, Ver, Cressie, Noel AC, & Glenn-Lewin, David C. (1993). Spatial models for spatial statistics: some unification. *Journal of Vegetation Science*, 441-452.

Jongejans, Eelke, Skarpaas, Olav, & Shea, Katriona. (2008). Dispersal, demography and spatial population models for conservation and control management. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 9*(3), 153-170.

Jose, Shibu. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry systems, 76*(1), 1-10.

Journal, A; Huijbregts C.J. (1978). Mining geostatistics*Academic Press, London, United Kingdom*, 600p.

Klein Koch, Carlos. (1988). Factores naturales de regulaciones y control biológico de la broca del café (Hypothenemus hampe; Ferr.) *Factores naturales de regulaciones y control biológico de la broca del café (Hypothenemus hampe; Ferr.)*: GTZ.

Le Maire G, Rançon F, Charbonnier F, Roupsard. (2014). Characterizing the structure of a coffee agroforestry systems in Costa Rica. Poster. Pleiades days. April 1-3 2014. Toulouse, France.

Lewin-Koh, Nicholas J, Bivand, Roger, Pebesma, EJ, Archer, E, Baddeley, A, Bibiko, HJ, . . . Giraudoux, P. (2011). maptools: Tools for reading and handling spatial objects. *R package version 0.8-10, URL http://CRAN. R-project. org/package= maptools*.

Liebhold, Andrew M, Rossi, Richard E, & Kemp, William P. (1993). Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Annual review of entomology, 38*(1), 303-327.

López-Bravo, DF, Virginio-Filho, E de M, & Avelino, J. (2012). Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop Protection, 38*, 21-29.

Martins, RB, Maffia, LA, & Mizubuti, ESG. (2008). Genetic variability of Cercospora coffeicola from organic and conventional coffee plantings, characterized by vegetative compatibility. *Phytopathology, 98*(11), 1205-1211.

Mouen Bedimo, JA, Bieysse, D, Cilas, C, & Nottéghem, JL. (2007). Spatio-temporal dynamics of arabica coffee berry disease caused by Colletotrichum kahawae on a plot scale. *Plant Disease, 91*(10), 1229-1236.

Muller. (1959). Plantas deficientes en nitrogeno son mas suceptibles al ataque de la Chasparria.

Nutman, FJ, Roberts, FM, & Bock, KR. (1960). Method of uredospore dispersal of the coffee leaf-rust fungus, Hemileia vastatrix. *Transactions of the British Mycological Society, 43*(3), 509-IN506.

Pasek, Judith E. (1988). 30. Influence of wind and windbreaks on local dispersal of insects. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 22*, 539-554.
Peel, Murray C, Finlayson, Brian L, & McMahon, Thomas A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions Discussions, 4*(2), 439-473.
Pohlan, Hermann A Jürgen, & Janssens, Marc JJ. (2012). Growth and production of coffee. *Soil, Plant Growth Crop Produc, 3*, 1-11.
Quesada, R. (1950). Estudios sobre la mancha de la hoja del café producida por Cercospora en la region de Turrialba, Costa Rica. Tesis sin publicar. Instituto Interamericano de Ciencias agricolas. 90
Rao, MR, Singh, MP, & Day, R. (2000). Insect pest problems in tropical agroforestry systems: Contributory factors and strategies for management. *Agroforestry Systems, 50*(3), 243-277.
Remond, F, Cilas, C, Vega-Rosales, MI, & Gonzalez, MO. (1993). Méthodologie d'échantillonnage pour estimer les attaques des baies du caféier par les scolytes (Hypothenemus hampei Ferr.). *Café, cacao, thé, 37*(1), 35-52.
Ristaino, Jean B, Larkin, Robert P, & Campbell, C Lee. (1994). Spatial dynamics of disease symptom expression during Phytophthora epidemics in bell pepper. *Phytopathology, 84*(10), 1015-1023.
Rivillas-Osorio, C, Serna-Giraldo, C, Cristancho-Ardila, M, & Gaitán-Bustamante, A. (2011). La roya del cafeto en Colombia, impacto, manejo y costos de control. *Avances Tecnicos Cenicafe. Chinchiná, Colombia: Cenicafé*.
Robertson, GP. (1998). GS+: Geostatistics for the environmental sciences. *Gamma design software, Plainwell, MI*.
Scherm, H, Ngugi, HK, & Ojiambo, PS. (2006). Trends in theoretical plant epidemiology *Plant disease epidemiology: facing challenges of the 21st Century* (pp. 61-73): Springer.
Schroth, G, Krauss, U, Gasparotto, L, Aguilar, JA Duarte, & Vohland, K. (2000). Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agroforestry systems, 50*(3), 199-241.
Schroth, Götz. (2004). *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes*: Island Press.
Soma, Maxime. (2015). On the relationship between Structure and Temperature in stands: comparing Shaded and Full sun situations in a coffee agroforestry trial in Costa Rica". *(en cours)*.
Souza, André Gomes Coelho, Rodrigues, Fabrício Ávila, Maffia, Luiz Antônio, & Mizubuti, Eduardo Seiti Gomide. (2011). Infection process of Cercospora coffeicola on coffee leaf. *Journal of phytopathology, 159*(1), 6-11.
Statistics, FAO. (2012). FAOSTAT—production. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
Toledo, Víctor M, & Moguel, Patricia. (2012). Coffee and sustainability: the multiple values of traditional shaded coffee. *Journal of Sustainable Agriculture, 36*(3), 353-377.
Verchot, Louis V, Van Noordwijk, Meine, Kandji, Serigne, Tomich, Tom, Ong, Chin, Albrecht, Alain, . . . Palm, Cheryl. (2007). Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and adaptation strategies for global change, 12*(5), 901-918.
Villaseñor Luque, A. Broca del café. *Café de Nicaragua (Nicaragua). 1973.(*(257-259), 7.
Wood, Simon. (2006). *Generalized additive models: an introduction with R*: CRC press.
Xu, X-M, & Madden, LV. (2004). Use of SADIE statistics to study spatial dynamics of plant disease epidemics. *Plant Pathology, 53*(1), 38-49.
Young, Anthony. (1989). *Agroforestry for soil conservation*: CAB international.

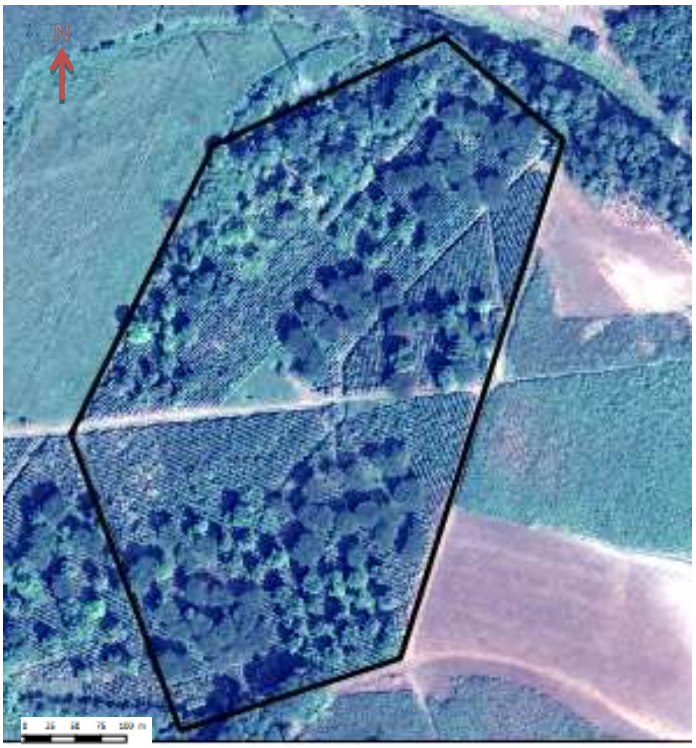
LISTE SITOGRAPHIQUE

Coffee : Description, Use, Propogation, References, Disease
http://www.plantvillage.com

International organization that promotes the study and management of plant diseases
http://www.aspnet.org

VII.ANNEXES

ANNEXE I : Photographie aérienne de l'essai d'agroforesterie (haut) et schéma du dispositif expérimental (bas)



en vert les unités expérimentales : combinaison entre ombrage et itinéraire technique

ANNEXE I (bis) : Aperçu général du plan d'échantillonnage issu de QGIS. Les étoiles rouges représentent les caféiers échantillonnés, les points vers les arbres d'ombrages et les carrés violets représentent les différentes unités expérimentales

ANNEXE II : Détails des itinéraires techniques appliqués sur l'essai expérimental (Haggar, 2011)

Type d'itinéraires techniques	AC[1]	MC[2]	MO[3]	BO[4]
Niveau de nutriments et fertilisants apportés	300 kg N. ha^{-1} 20 kg P. ha^{-1} 150 K. ha-1	150 kg N.ha^{-1} 10 kg P. ha^{-1} 75 K. ha^{-1}	287 kg.ha^{-1} 205 kg P.ha^{-1} 326 kg K.ha^{-1} (via 10 t.ha^{-1} de fumier de volaille)	46 kg N.ha^{-1} 2kg P.ha^{-1} 44 kg. ha^{-1} (via de 5 t.ha^{-1} de la pulpe de café)
Contrôle des bioagresseurs	rouille orangée Cu 1 kg.ha^{-1} 0.4 L.ha^{-1} de ciproconazol (10 % WG)	rouille orangée : Cu 1 kg.ha^{-1}	rouille orangée 1.5 kg.ha^{-1} de bouillie bordelaise (10% Cu, et 10 % Ca)	---------

[1]AC correspond au mode de gestion conventionnelle, niveau d'intrant élevé

[2]MC au mode de gestion conventionnelle, niveau d'intrant faible

[3] MO au mode de gestion biologique, niveau d'intrant élevé

[4] BO au mode de gestion biologique, niveau d'intrant faible

ANNEXE III : Caractéristiques des semi-variogrammes ajustés à partir des données expérimentales (étape a)

Tableau : Caractéristiques ses semi-variogrammes de l'incidence cumulée de la rouille orangée

Date	Modèle	Portée A (en m)	Palier (Co+C)	Pépite (Co)	Co/Co+C	Type de dépendance [1]	Residuals Squared Standardized
mars 2015	Exponentiel	27	0.034020	0.004410	13 %	**élevée**	**$6.8.10^{-5}$**
avril 2015	Exponentiel	32	0.0325	0.004390	14 %	**élevée**	**$1.6.10^{-4}$**
mai 2015	Exponentiel	39	0.0345	0.003870	11%	**élevée**	**$1.66.10^{-4}$**
juin 2015	Exponentiel	36	0.0297	0.002590	8 %	**élevée**	**$7.47.10^{-4}$**

Tableau : Caractéristiques ses semi-variogrammes de l'incidence cumulée de la cercosporiose

Date	Modèle	Portée A (en m)	Palier (C_o+C)	Pépite (C_o)	Co/Co+C	Type de dépendance [1]	Residuals Squared Standardized
mars 2015	Exponentiel	16	0.008770	0.001230	14 %	**élevée**	**$4.73.10^{-6}$**
avril 2015	Exponentiel	18	0.008050	0.000920	11%	**élevée**	**$4.45.10^{-6}$**
mai 2015	Exponentiel	47	0.008462	0.000401	4%	**élevée**	**$6.15.10^{-7}$**
juin 2015	Exponentiel	66	0.005842	0.000291	4%	**élevée**	**$3.49.10^{-7}$**

Tableau : Caractéristiques ses semi-variogrammes du % de fruits scolytés sur le % de fruits

Date	Modèle	Portée A (en m)	Palier (C_o+C)	Pépite (C_o)	Co/Co+C	Type de dépendance [1]	Residuals Squared Standardized
mars 2015	Exponentiel	16	0.0017	0.00074	43%	**modérée**	**$5.17.10^{-7}$**
avril 2015	Exponentiel	23	0.0056	0.00281	50%	**modérée**	**$6.75.10^{-6}$**
mai 2015	Exponentiel	55	0.0089	0.0040	44%	**modérée**	**$6.15.10^{-6}$**
juin 2015	Exponentiel	55	0.0087	0.0022	25 %	**modérée**	**$6.50.10^{-6}$**

ANNEXE IV: Mise en évidence de variables environnementales expliquant de la dépendance spatiale de la rouille orangée – illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape b)

Tableau : Résultats des modèles additifs généralisés testés sur les données d'incidences cumulées de la rouille orangée. Relevées réalisés mensuellement entre mars et juillet 2015. (N=418). En grisé, il s'agit du modèle retenu

Variable à expliquer	Famille	Variables et fonctions de lissage	p value	R^2 ajusté	Déviance expliquée	AIC
Incidence cumulée de la rouille orangée	bêta binomiale	date de notation	2.10^{-6}	0,27	30 %	-725.32
		s(type ombrage)	7.10^{-15}			
		s(ouverture de la canopée)	0,03			
		s(mode de gestion)	9.10^{-8}			

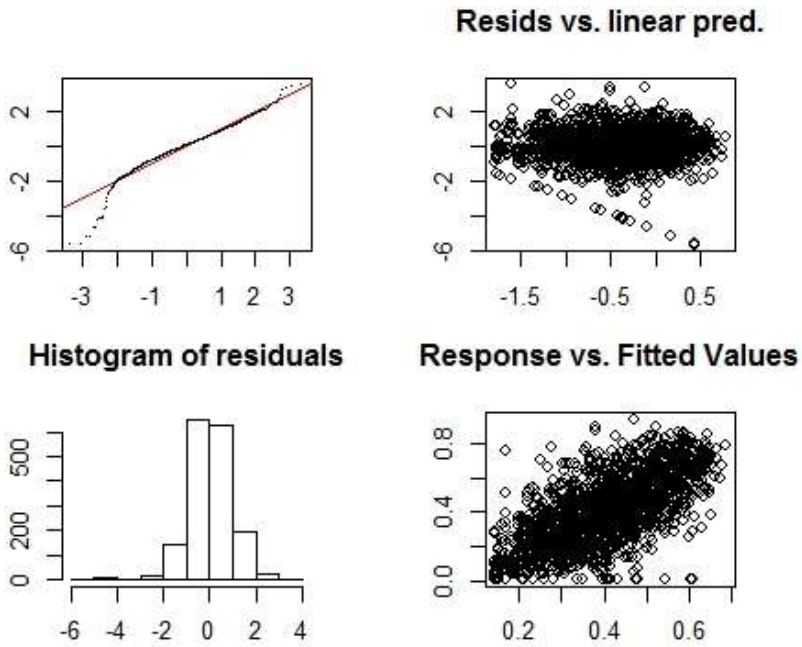


Figure: Diagnostic du GAM retenu expliquant la dépendance spatiale pour les données d'incidence cumulée de la rouille orangée orangée, à partir des données environnementales (N=418)

ANNEXE V: Mise en évidence de variables environnementales expliquant de la dépendance spatiale de la cercosporiose – illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape b)

Tableau: Résultats des modèles additifs généralisés testés sur les données d'incidences cumulées de la cercosporiose. Relevées réalisés mensuellement entre mars et juillet 2015. (N=418)

Variable à expliquer	Famille	Variables et fonctions de lissage	p	R^2 ajusté	Déviance expliquée	AIC
Incidence cumulée de la cercosporiose	bêta binomiale	date de notation	6.10^{-5}	0.11	12 %	-3989
		s(type ombrage)	4.10^{-8}			
		s(ouverture de la canopée)	3.10^{-8}			
		s(mode de gestion)	0.03			

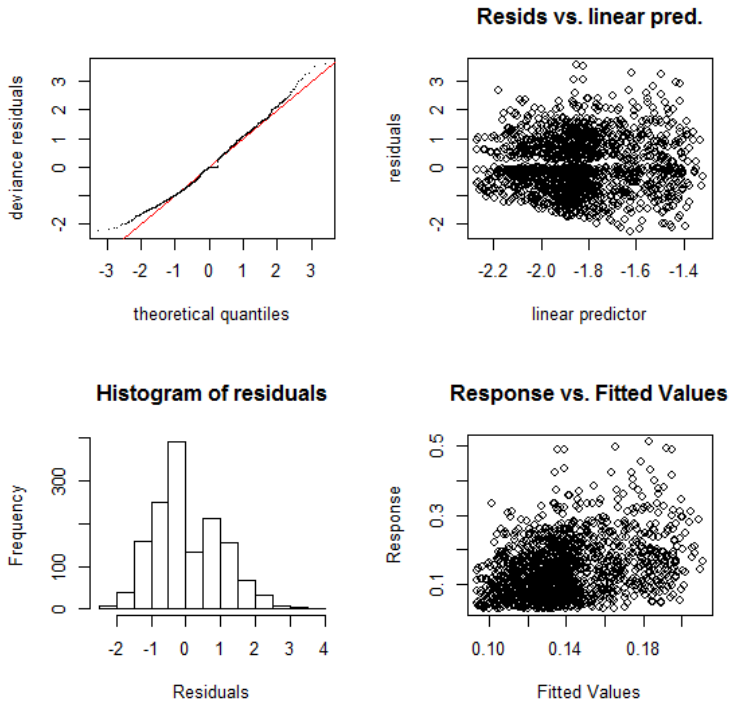


Figure : Diagnostic du GAM retenu expliquant la dépendance spatiale pour les données d'incidence cumulé de la cercosporiose, à partir des données environnementales (N=418)

ANNEXE VI: Mise en évidence de variables environnementales expliquant de la dépendance spatiale du scolyte des baies– illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape b)

Tableau : Résultats des modèles additifs généralisés testés sur les données % de fruits scolytés. Relevées réalisés mensuellement entre mars et juillet 2015. (N=202)

Variable à expliquer	Famille	Variables et fonctions de lissage	p value	R^2 ajustée	Déviance expliquée	AIC
% fruits scolytés/fruits aptes	binomiale	date de notation	4.10^{-4}	0.41	45 %	3662
		s(type ombrage)	2.10^{-10}			
		s(d'ouverture de la canopée)	8.10^{-8}			
		s(fruits totaux)	$<2.10^{-16}$			

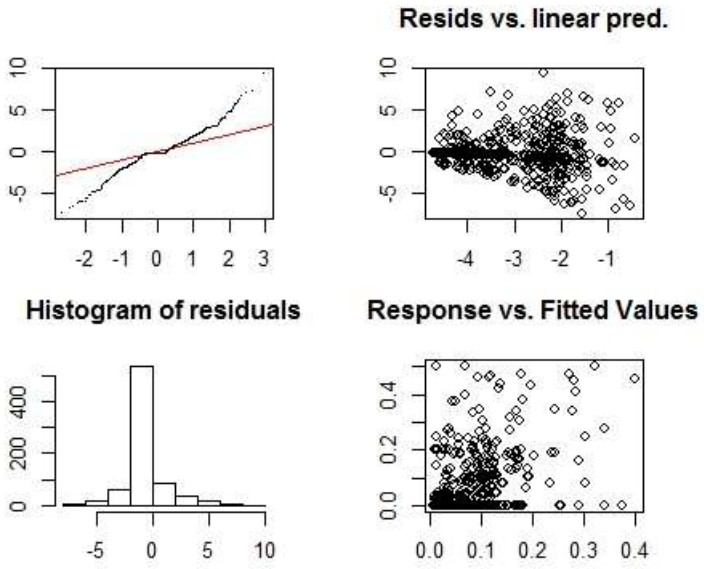


Figure : Diagnostic du GAM retenu expliquant la dépendance spatiale pour les données du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes, à partir des données environnementales (N=202)

ANNEXE VII : Caractéristiques des semi-variogrammes ajustés à partir des résidus des modèles GAM

Tableau : Caractéristiques des semi-variogrammes des résidus du modèle GAM retenu pour la rouille orangée

Date	Modèle	Portée A (en m)	Palier (Co+C)	Pépite (Co)	Co/Co+C	Type de dépendance [1]	Residuals Squared Standardized
mars 2015	Sphérique	13	1.3	0.06	4 %	**élévée**	**0.0407**
avril 2015	Sphérique	13	0.9	0.04	4%	**élévée**	**0.08**
mai 2015	Sphérique	15	0.77	0.01	1%	**élévée**	**0.0494**
juin 2015	Sphérique	15	0.64	0.007	1%	**élévée**	**0.0661**

Tableau : Caractéristiques des semi-variogrammes des résidus du modèle GAM retenu pour la cercosporiose

Date	Modèle	Portée A (en m)	Palier (C_o+C)	Pépite (C_o)	Co/Co+C	Type de dépendance [1]	Residuals Squared Standardized
mars 2015	Exponentiel	10	1.02	0.12	11 %	**élévée**	**0.0295**
avril 2015	Exponentiel	11	1.01	0.12	11%	**élévée**	**0.0259**
mai 2015	Exponentiel	18	0.96	0.12	12 %	**élévée**	**0.0437**
juin 2015	Exponentiel	11	0.82	0.09	10 %	**élévée**	**0.0121**

Tableau : Caractéristiques des semi-variogramme des résidus du modèle GAM retenu pour le scolyte

Date	Modèle	Portée A (en m)	Palier (C_o+C)	Pépite (C_o)	Co/Co+C	Type de dépendance [1]	Residuals Squared Standardized
mars 2015	gaussian	5	2.6	0.64	24%	**élévée**	**1.8**
avril 2015	sphérical	4	3.0	0.25	8%	**élévée**	0.024
mai 2015	sphérical	13	3.44	0.21	6%	**élévée**	0.07
juin 2015	sphérical	9	4.67	0.31	6%	**élévée**	0.2

ANNEXE VIII: Mise en évidence de variables environnementales et spatiale expliquant de la dépendance spatiale de la rouille orangée – illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape d)

Tableau : Résultats des modèles additifs généralisés testés sur les données de la rouille orangée. Relevées réalisés mensuellement entre mars et juillet 2015. (N=418)

Variable à expliquer	Famille	Variables et fonctions de lissage	p	R^2 ajustée	Déviance expliquée	AIC
Incidence cumulée de la rouille orangée	beta binomiale	date de notation	1.10^{-6}	0.47	51 %	-799
		s(type ombrage)	2.10^{-7}			
		s(mode de gestion)	1.10^{-15}			
		bloc	0.01			
		interaction (X,Y)	$<2.10^{-16}$			

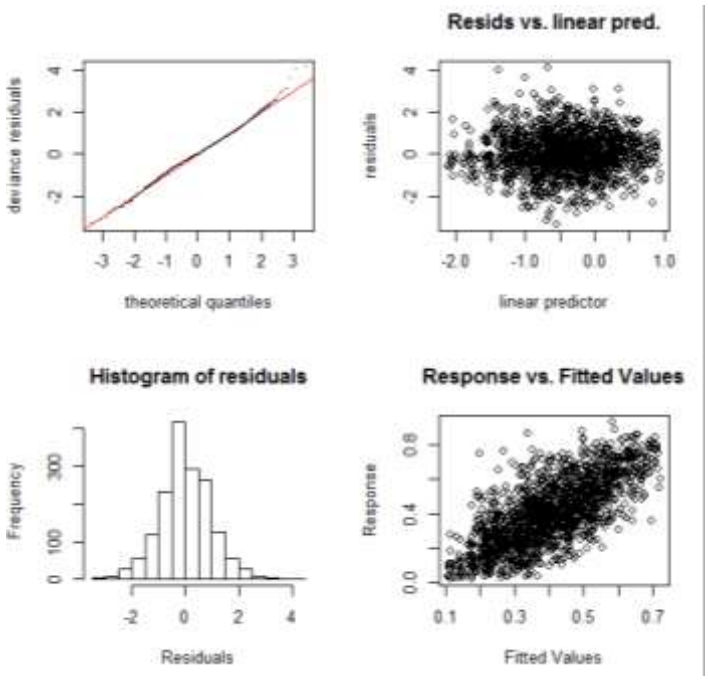


Figure : Diagnostic du GAM retenu expliquant la dépendance spatiale pour les données de l'incidence de la rouille orangée, à partir des données environnementales et spatiale (N=418)

ANNEXE IX: Mise en évidence de variables environnementales et spatiale expliquant de la dépendance spatiale de la cercosporiose – illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape d)

Tableau : Résultats des modèles additifs généralisés testés sur les données de la cercosporiose. Relevées réalisés mensuellement entre mars et juillet 2015. (N=418)

Variable à expliquer	Famille	Variables et fonctions de lissage	p value	R^2 ajustée	Déviance expliquée	AIC
Incidence cumulée de la cercosporiose	beta binomiale	date de notation	$<2.10^{-16}$	22	26 %	-3748
		s(type ombrage)	0.02			
		s(d'ouverture de la canopée)	4.10^{-4}			
		s(mode de gestion)	3.10^{-4}			
		interaction (X,Y)	2.10^{-16}			

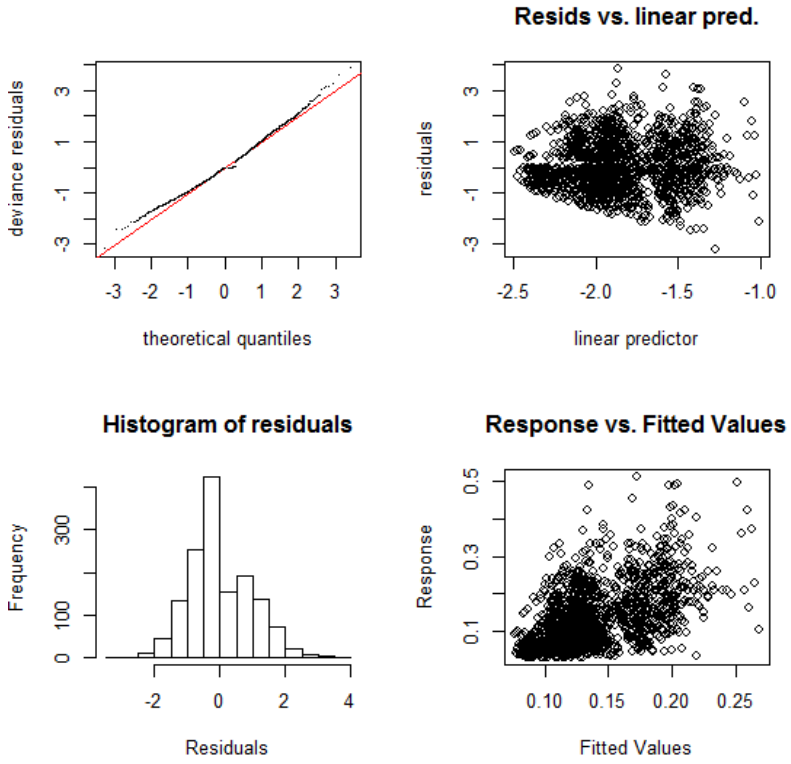


Tableau : Diagnostic du GAM retenu expliquant la dépendance spatiale pour les données d'incidence cumulée de la cercosporiose à partir des données environnementales et spatiales (N=418)

ANNEXE X: Mise en évidence de variables environnementales et spatiale expliquant de la dépendance spatiale du scolyte des baies – illustration des modèles testés et des sorties des modèles retenus (étape d)

Tableau : Résultats des modèles additifs généralisés testés sur les données du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes. Relevées réalisés mensuellement entre mars et juillet 2015. (N=202)

Variable à expliquer	Famille	Variables et fonctions de lissage	p	R^2 ajustée	Déviance expliquée	AIC
% fruits scolyés/fruits aptes	binomiale	date de notation	2.10^{-16}	0.57	58 %	3093
		s(type ombrage)	3.10-8			
		s(d'ouverture de la canopée)	2.10^{-8}			
		s(fruits totaux)	$<2.10^{-16}$			
		interaction (X,Y)	$<2.10^{-16}$			

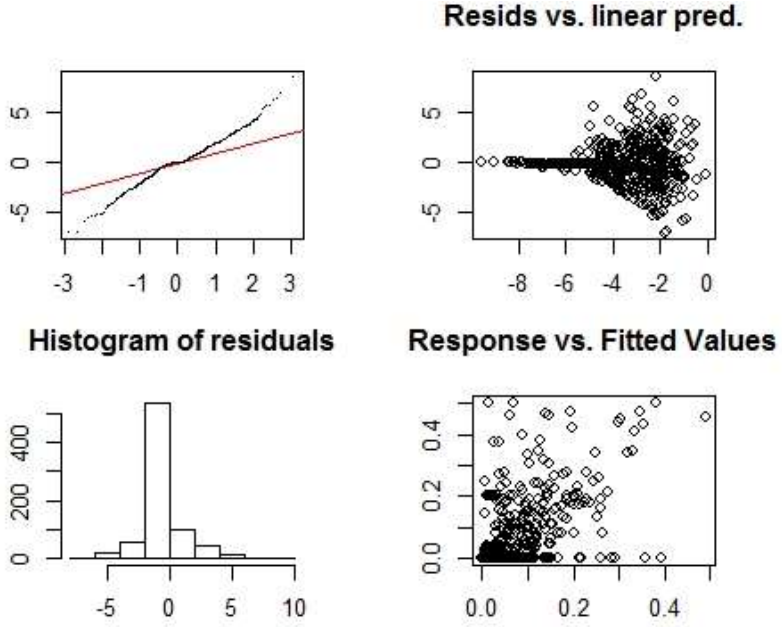
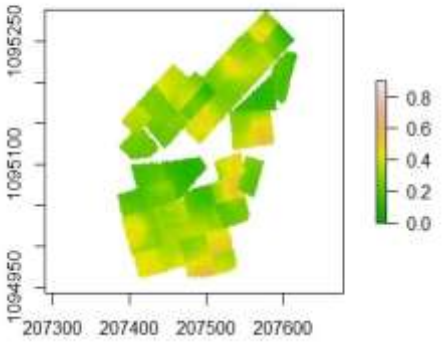
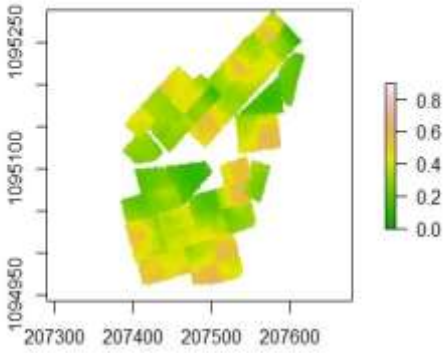


Tableau : Diagnostic du GAM retenu expliquant la dépendance spatiale pour les données du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes, à partir des données environnementales et spatiales (N=202)

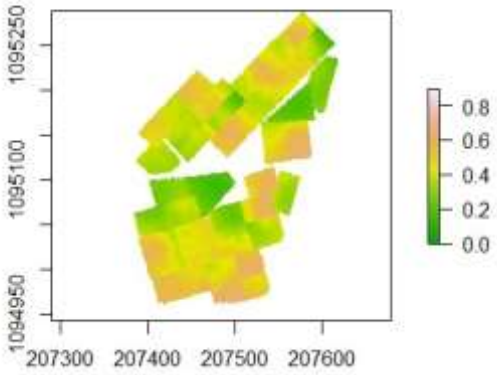
ANNEXE XI : Cartes prédictives de l'incidence cumulée de la rouille orangée entre mars 2015 et juin 2015 La latitude et la longitude y sont représentées. L'échelle représente l'incidence cumulée de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1



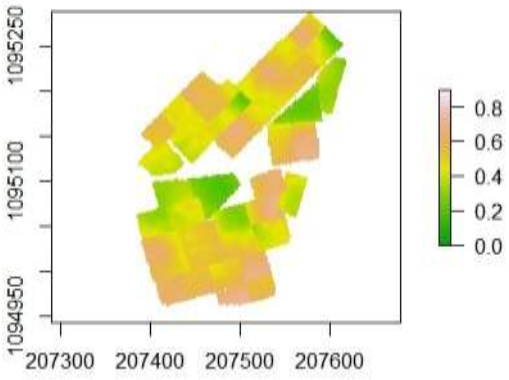
mars 2015



avril 2015

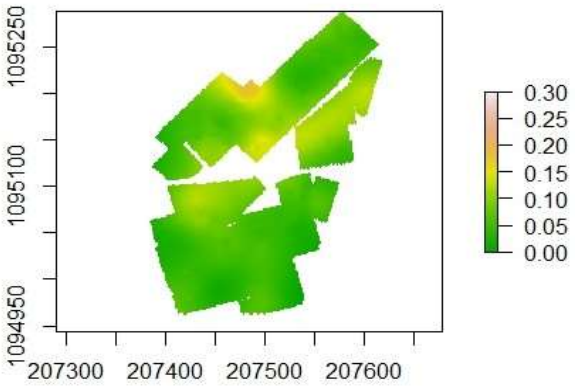


mai 2015

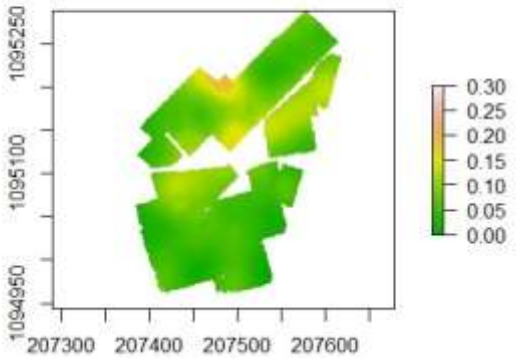


juin 2015

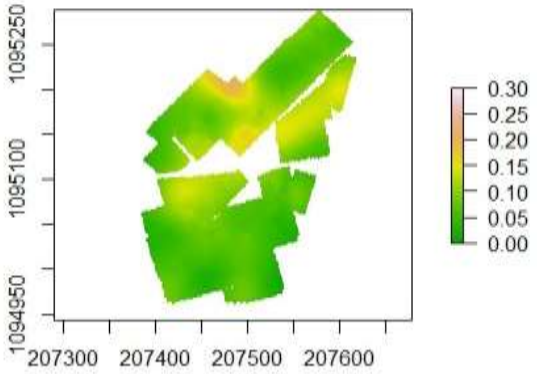
ANNEXE XII : Cartes prédictives de l'incidence cumulée de la cercosporiose entre mars 2015 et juin 2015 La latitude et la longitude y sont représentées. L'échelle représente l'incidence cumulée de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1



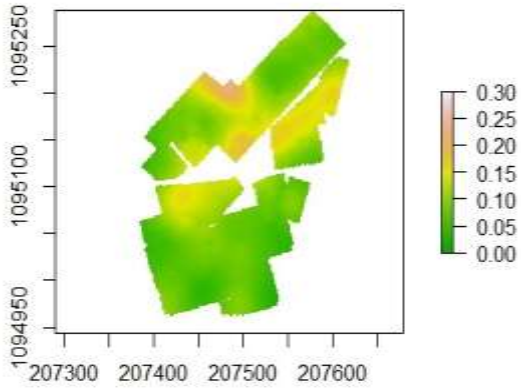
mars 2015



avril 2015



mai 2015



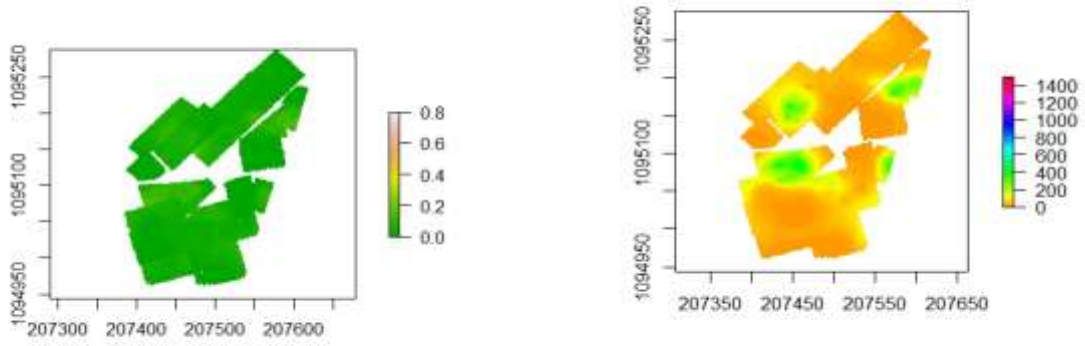
juin 2015

ANNEXE XIII : Cartes prédictives du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes entre mars 2015 et avril 2015 (colonne de gauche), l'échelle représente l'incidence cumulée de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1, colonne de droite les cartes prédictives du nombre de fruits totaux entre mars 2015 et juin 2015, l'échelle représente le nombre de fruits totaux de 0 (orange) à 1400 (rose).

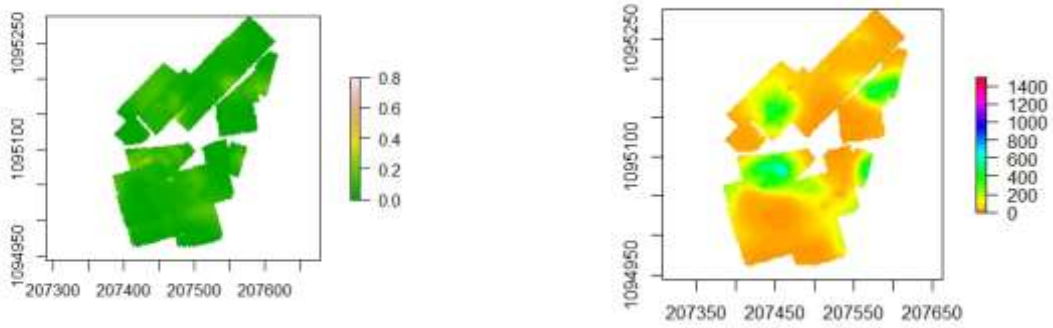
La latitude et la longitude y sont représentées.

Cartes prédictives du % de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes (colonne de gauche)

Cartes prédictives du nombre de fruits totaux (colonne de droite)



mars 2015



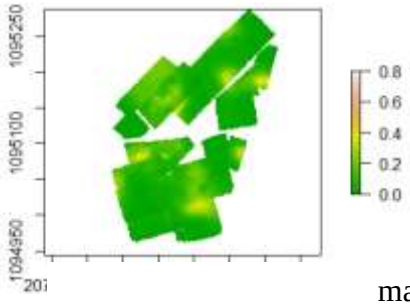
avril 2015

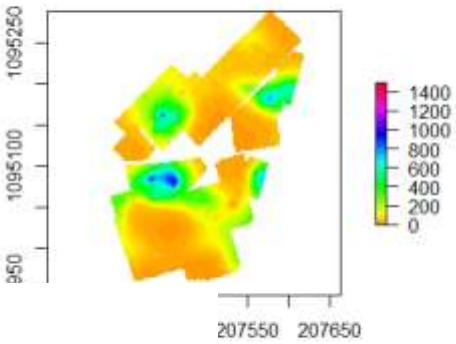
ANNEXE XIII bis : Cartes prédictives du pourcentage de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes entre mai 2015 et juin 2015 (colonne de gauche), l'échelle représente l'incidence cumulée de 0 (vert) à 0.8 (rosé) ; le maximum possible vaut 1, colonne de droite les cartes prédictives du nombre de fruits totaux entre mars 2015 et juin 2015, l'échelle représente le nombre de fruits totaux de 0 (orange) à 1400 (rose).

La latitude et la longitude y sont représentées

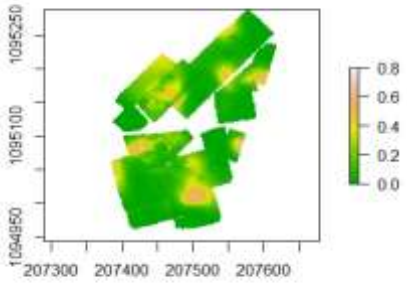
Cartes prédictives du % de fruits scolytés par rapport au nombre de fruits aptes (colonne de gauche)

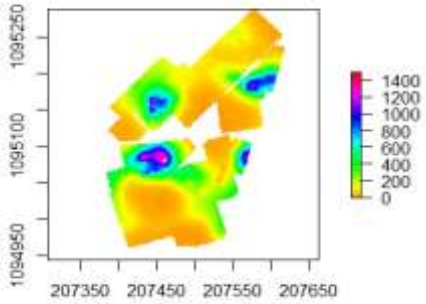
Cartes prédictives du nombre de fruits totaux (colonne de droite)





mai 2015





juin 2015

Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, horticoles et du Paysage

Spécialisation : Sciences & Productions Végétales

Option : Ingénierie des agrosystèmes Responsable d'option : Christine

Auteur(s) : Cyrielle Deswarte Organisme d'accueil : CIRAD

Date de naissance* : 14.11.1991 UR bioagresseurs

Nb pages : 25 Annexe(s) : 21 Maître de stage : Jacques Avelino

Année de soutenance : 2015

Titre français : Etude spatio-temporelle de trois bioagresseurs du café en fonction de l'ombrage

Titre anglais : Spatio-temporal dynamics of three coffees pests depending on the shade

Résumé : Au sein des systèmes agroforestiers, la dynamique des bioagresseurs et leur évolution au cours du temps dépendent d'un grand nombre de facteurs (biotiques et abiotiques souvent en interaction). L'objectif général est de comprendre le développement spatio-temporel de trois bioagresseurs du caféier aux traits de vie différents, la rouille orangée du café (*Hemileia vastatrix*), la cercosporiose (*Cercospora coffeicola*) et le scolyte des baies (*Hypothenemus hampei*), et d'en déduire des stratégies de lutte. Des suivis mensuels des populations de ces trois bioagresseurs ont été réalisés, entre mars et juin 2015, sur une parcelle de 4 ha à Turrialba, au Costa Rica, où différents systèmes agroforestiers et différentes stratégies de gestion sont comparés. Un modèle additif généralisé, construit pas à pas, prenant en compte l'hétérogénéité spatiale du milieu, en particulier la lumière, et les déplacements des bioagresseurs, explique la dépendance spatiale des caféiers vis-à-vis des attaques de bioagresseurs. L'utilisation de modèles généralisés permet de réaliser des cartes de prédiction et de délimiter les patrons de distribution et la présence éventuelle de foyers. Une distribution spatiale diffuse, avec une forte influence de la gestion des parcelles, est observée pour la rouille orangée où les taux moyens d'incidence cumulée sont de 40 % avec une distance de dispersion comprise entre 12 et 15 m. En revanche, pour le scolyte et la cercosporiose, la distribution spatiale est agrégée avec des foyers se situant dans les zones où l'ensoleillement est plus important. Le taux moyen d'incidence cumulée de la cercosporiose est de 10 % avec une distance de dispersion de 10-11m. Pour le scolyte le taux de fruits infestés était en moyenne de 2% avec une distance de déplacement de 4 à 13m. On en déduit que la lutte contre la rouille orangée doit être généralisée alors que la lutte contre la cercosporiose et le scolyte doit être dirigée précocement contre les foyers, c'est-à-dire dans les endroits ensoleillés de la parcelle.

Abstract :In agroforestry systems, dynamics of pests and their evolution over time depend on a number of factors (biotic and abiotic often in interacion). The overall objective is to understand the spatio-temporal development of three pests of coffee which have different life traits, coffee leaf rust (Hemileia vastatrix), brown leaf spot (Cercospora coffeicola) and coffee berry borer (Hypothenemus hampei) and to deduce pest control strategies. A monthly monitoring of the populations of these three pests was carried out on a plot of 4 ha in Turrialba, Costa Rica, where different agroforestry systems and different management strategies are compared. A model built step by step, taking into account the spatial heterogeneity of the environment, especially the light, and movement of pests, explained the spatial dependence of pests coffee. The uses of generalized models enable us to build prediction maps and put in evidence the distribution patterns and the possible presence of disease foci. A diffuse spatial distribution, with a strong influence of the management of plots, is observed for leaf rust, the average rate of cumulative incidence is 40% with a distance of dispersion between 12 and 15 m. However, the spatial distribution of the brown leaf spot and the coffee borer is aggregated – some disease foci are localized where sunlight is most important. The average rate of cumulative incidence of brown leaf spot is 10% with a dispersion distance of 10 and 11m . For coffee berry borer, the average of rate of fruit is of 2% with a moving distance of 4 to 13m . Eventually, control of coffee leaf rust should be generalized whereas that the current strategy of control of brown leaf spot and coffee berry borer based in total area may be replaced by site specific, where foci are localized, that is to say in the sunny areas.

Mots-clés : café – agroforesterie – cartes prédictives – semi-variogramme - GAM

Key Words: coffee – agroforestry – predictive map – semi variograms – GAM