

SOMMAIRE

Pages

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CAFEIER ET LES ANTHRACNOSES DUES A <i>Colletotrichum spp.</i>	
1.1. Le caféier	3
1.1.1. Généralités	3
1.1.2. Histoire du café	4
1.1.3. Description	5
1.1.4. La culture du caféier arabica	7
1.1.5. Les contraintes de productions au Cameroun	9
1.1.5.1. <i>Les ravageurs</i>	9
1.1.5.2. <i>Les maladies cryptogamiques</i>	10
1.2. Etat des connaissances sur les <i>Colletotrichum spp.</i> en milieu tropical	12
1.2.1. Taxonomie et description.....	12
1.2.2. Biologie de <i>Colletotrichum spp.</i>	14
1.2.2.1. <i>La germination des conidies</i>	15
1.2.2.2. <i>La formation des appressoria</i>	15
1.2.2.3. <i>La pénétration</i>	16
1.2.2.4. <i>La colonisation</i>	16
1.2.3. Epidémiologie de l'anthracnose des baies du caféier arabica	17
CHAPITRE 2 : PROBLEMATIQUE	
2.1. Contexte	19
2.2. Hypothèses de recherche	20
2.3. Objectifs et plan de la thèse	21

CHAPITRE 3 : DYNAMIQUE SPATIALE DE L'ANTHRACNOSE
DES BAIES A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

3.1	Introduction	23
3.2	Matériel et méthodes	24
3.2.1.	Caractérisation des parcelles	24
3.2.2.	Observations et évaluation des pertes dues à la maladie.....	24
3.2.3.	Analyses statistiques	25
3.3.	Résultats	28
3.3.1.	Incidence du CBD en fonction de la position des branches sur le caféier	28
3.3.2.	Dynamique spatio-temporelle de la maladie	30
3.3.2.1.	<i>Dynamique temporelle</i>	30
3.3.2.2.	<i>Dynamique spatiale aux différentes dates de l'épidémie</i>	30
3.4.	Discussion	36

CHAPITRE 4 : INCIDENCE DES CONDITIONS MICRO-ENVIRONNEMENTALES
SUR LE DEVELOPPEMENT DE LA MALADIE

4.1.	Introduction	40
4.2.	Matériel et méthodes	41
4.2.1.	Matériel végétal	41
4.2.2.	Dispositif expérimental et observations	42
4.2.3.	Evaluation des pertes et analyses statistiques	42
4.3.	Résultats	44
4.3.1.	Evaluation des pertes annuelles de récoltes	44
4.3.2.	Impact des itinéraires techniques sur le niveau d'infection du CBD	45
4.3.3.	Effet des arbres d'ombrage sur le développement de la maladie	46
4.3.4.	Développement de la maladie en fonction de la position des fruits sur le rameau (années 2004 et 2005)	49
4.4.	Discussion	51

CHAPITRE 5 INCIDENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR
 LE DEVELOPPEMENT DE LA MALADIE

5.1.	Introduction	55
5.2.	Matériel et méthodes	56
5.2.1.	Dispositif expérimental et observations	56
5.2.2.	Analyses statistiques	57
5.3.	Résultats	58
5.3.1.	Relations entre les facteurs climatiques et la sévérité de la maladie	58
5.3.2.	Effet conjugué de différents paramètres climatiques sur la sévérité de la maladie	63
5.4.	Discussion	65

CHAPITRE 6 : ROLE SPECIFIQUE DE LA PLUIE SUR
 LE DEVELOPPEMENT DE LA MALADIE

6.1.	Introduction	68
6.2.	Matériel et méthodes	69
6.2.1.	Matériel végétal et dispositif expérimental	69
6.2.2.	Observations et évaluation des pertes	69
6.3.	Résultats	70
6.3.1.	Expérimentation 2004 : impact de la protection intégrale des caféiers contre la pluie sur le niveau de pertes dues au CBD	70
6.3.2.	Expérimentation 2005 : évaluation de l'arrière effet de la protection des caféiers contre la pluie en 2004 sur les pertes dues au CBD en 2005	72
6.4.	Discussion	74

CHAPITRE 7 : ANALYSE DE L'EFFET DE L'OMBRAGE
A L'AIDE D'UN ECRAN ARTIFICIEL

7.1. Introduction	77
7.2. Matériel et méthodes	78
7.2.1. Matériel végétal	78
7.2.2. Agent phytopathogène et techniques d'inoculations	79
7.2.3. Dispositifs expérimentaux	79
7.2.3.1. <i>Expérimentation au champ</i>	79
7.2.3.2. <i>Expérimentation au laboratoire</i>	80
7.2.4. Evaluation des pertes de récoltes	81
7.2.5. Evaluation de la sensibilité des baies <i>in vitro</i>	81
7.2.6. Analyses statistiques	82
7.3. Résultats	83
7.3.1. Caractérisation des pertes de récoltes	83
7.3.2. Développement de la maladie sur les baies contaminées artificiellement au laboratoire	85
7.4. Discussion	88

CONCLUSION

I. Caractéristiques des épidémies de CBD	90
II. Conséquences sur la gestion des épidémies	91
III. Perspectives	93

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. *Valeur des recettes des exportations des principaux produits agricoles du Cameroun (en 1000 \$ E.U).*

Tableau 1.1. *Exportations mondiales de café vert (quantité en tonnes) 2001-2004 : contribution des pays d'Afrique centrale*

Tableau 1.2. *Première descriptions du CBD dans les pays d'Afrique (Van der Graaff, 1992)*

Tableau 3.1. *Effectif des baies en début de campagne et taux de maladie dans les deux sites, en fonction des étages des années d'observations.*

Tableau 3.2. *Caractéristiques des épidémies de CBD observées dans les deux sites*

Tableau 3.3. *Caractéristiques des semi-variogrammes obtenus à Santa (2003 et 2004) et à Bafou (2004 et 2005)*

Tableau 4.1. *Analyses de la variance des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction des pratiques culturales (2002 – 2005).*

Tableau 4.2. *Pertes annuelles dues au CBD et aux chutes physiologiques*

Tableau 4.3. *Moyennes des différentes pertes annuelles en fonction des itinéraires techniques*

Tableau 4.4. *Moyennes des pertes annuelles en fonction de l'ombrage des caféiers*

Tableau 4.5. *Analyse de la variance des pertes dues au CBD et celles dues aux chutes physiologiques en fonction de la position des baies sur les branches (2004-2005)*

Tableau 4.6. *Moyennes des différentes pertes annuelles en fonction des étages et de la position des fruits sur les branches*

Tableau 5.1. *Coefficients de corrélation optimum en fonction des semaines de décalage, entre les taux de baies nouvellement infectées et les paramètres climatiques– Santa 2005*

Tableau 5.2. *Analyse des régressions multiples entre les paramètres climatiques et les taux de nouvelles infections*

Tableau 5.3. *Analyse des régressions entre la température maximale ou la fréquence des pluies et le taux de nouvelles infections observées sous ombrage en 2004.*

Tableau 6.1. *Analyse de la variance des taux de pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en 2004*

Tableau 6.2. *Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction du bâchage des caféiers (% bruts)*

Tableau 6.3. *Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction de l'interaction entre le bâchage et les étages du caféier (%bruts)*

Tableau 6.4. *Analyse de la variance des taux de pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en 2005*

Tableau 6.5. *Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction du bâchage appliqué aux des caféiers en 2005 (% bruts)*

Tableau 6.6. *Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques sur les différents des caféiers (% bruts)*

Tableau 7.1. *Analyse de la variance des pertes dues au CBD et celles dues aux chutes physiologiques*

Tableau 7.2. *Comparaison des moyennes des pertes de récolte en fonction de l'ombrage des caféiers et de la position de leurs branches*

Tableau 7.3. *Analyse de variance du niveau d'infection et de l'indice de précocité de la maladie*

Tableau 7.4. *Moyennes du niveau d'infection et de l'indice de précocité par type de caféier, par étage et par âge des baies*

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. *Description des rameaux (Wintgens, 2004)*

Figure 1.2. *Coupes transversale et longitudinale d'une baies de café (Wintgens, 2004)*

Figure 1.3. *Cycle de développement des baies (Wintgens, 2004)*

Figure 1.4. *Formation de l'endosperme (Wintgens, 2004)*

Figure 1.5. *Cycle annuel de développement de l'anthracnose des baies (C. kahawae)*

Figure 2.1. *Tétraèdre épidémiologique. La partie en vert représente l'interaction plante-parasite-environnement. La partie en bleu symbolise l'effet de l'action de l'homme sur le développement de la maladie. (Zadocks et Schein, 1979)*

Figure 3.1. *Caractéristiques d'un variogramme (Anonyme, 2004)*

Figures 3.2. *Courbes d'ajustements logistiques de la progression temporelle du CBD à SANTA (axe y = % baies infectées ; ● = courbe réelle, — courbe théorique)*

Figures 3.3. *Courbes d'ajustements logistiques de la progression temporelle du CBD à BAFOU (axe y = % baies infectées ; ● = courbe réelle, — courbe théorique)*

Figure 3.4. *Distribution spatiale des caféiers infectés à la 10^{ème} semaine après la floraison à Santa*

Figure 3.5. *Distribution spatiale des caféiers infectés à la 20^{ème} semaine après la floraison à Santa (les barres représentent le pourcentage cumulé des baies infectées)*

Figure 3.6. *Semi-variogrammes ayant indiqué les corrélations spatiales lors de la première année d'expérimentation (2003 à Santa et 2004 à Bafou).*

Figure 3.7. *Semi-variogrammes obtenus à la deuxième année d'expérimentation (2005) à Bafou. (l'allure des courbes suivantes est similaire à celle de la 12^{ème} semaine)*

Figure 3.8. *Cartes de dispersion focale du CBD dans les deux sites lors de la première année d'expérimentation (2003 à Santa et 2004 à Bafou) (F = présence d'un foyer d'infection)*

Figure 3.9. *Cartes de dispersion focale du CBD à la deuxième année d'expérimentation (2005) à Bafou (F = présence d'un foyer d'infection)*

Figures 4.1. *Progression temporelle des différentes pertes de récoltes sur les caféiers sousombrage et en plein soleil de 2002 à 2005*

Figures 4.2. *Pourcentages cumulés de baies infectées suivant leur position sur les branches*

Figure 5.1. *Corrélogramme des températures maximales avec le taux de nouvelles infections observées sur les caféiers exposés au soleil – Santa 2004.*

Figure 5.2. *Corrélogramme des températures maximales avec le taux de nouvelles infections observées sur les caféiers exposés au soleil – Santa 2005.*

Figure 5.3. *Corrélogramme du nombre de jours pluvieux avec le taux de nouvelles infections observées sur les caféiers exposés au soleil – Santa 2004.*

Tableau 5.1. *Coefficients de corrélation optimum en fonction des semaines de décalage, entre les taux de baies nouvellement infectées et les paramètres climatiques– Santa 2005*

Tableau 5.2. *Analyse des régressions multiples entre les paramètres climatiques et les taux de nouvelles infections*

Tableau 5.3. *Analyse des régressions entre la température maximale ou la fréquence des pluies et le taux de nouvelles infections observées sous ombrage en 2004.*

Tableau 6.1. *Analyse de la variance des taux de pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en 2004*

Tableau 6.2. *Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction du bâchage des caféiers (% bruts)*

Tableau 6.3. *Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction de l'interaction entre le bâchage et les étages du caféier (%bruts)*

Tableau 6.4. *Analyse de la variance des taux de pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en 2005*

Tableau 6.5. *Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction du bâchage appliqué aux des caféiers en 2005 (% bruts)*

Tableau 6.6. *Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques sur les différents des caféiers (% bruts)*

Tableau 7.1. *Analyse de la variance des pertes dues au CBD et celles dues aux chutes physiologiques*

Tableau 7.2. *Comparaison des moyennes des pertes de récolte en fonction de l'ombrage des caféiers et de la position de leurs branches*



LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photo 1.1. *Acervule de C. kahawae sur baies (vue sous microscopie à balayage)*

Photo 1.2. *Baies infectées par le CBD*

Photo 1.3. *Forme Scab de la maladie*

Photo 3.1. *Baies infectées marquées lors des observations*

Photo 3.2. *Marquage des baies infectées lors des observations (M. Victor LEKOMBOU)*

Photo 6.1. *Caféiers sous abris bâchés à Bafou*

Photo 6.2a. *Caféier bâché latéralement – vue de côté*

Photo 6.2b. *Caféier bâché latéralement – vue de dessus*

Photo 6.3. *Baies infectées des branches basses d'un caféier protégé de la pluie – Bafou 2004*

Photo 7.1. *Caféiers couverts individuellement par la toile d'ombrière*

Photo 7.2. *Faciès cultural d'un isolat de Colletotrichum kahawae sur le milieu PDA (Potato-Destrose-Agar)*

Photo 7.3. *Disposition des baies dans une boîte de pétri pour les inoculations artificielles*

Photo 7.4. *Symptômes de CBD après les inoculations artificielles*

PREAMBULE

Les chapitres 3 et 4 de cette thèse ont fait l'objet d'articles scientifiques soumis pour publication dans les revues « *Plant Disease* » et « *European Journal of Plant Pathology* ».

1. Article re-soumis à « *Plant Disease* » le 13 Novembre 2006 suivant les corrections et les recommandations de « *Phytopathology* » :

Spatio-temporal dynamics of arabica coffee berry disease due to *Colletotrichum kahawae* on a plot scale

Mouen Bedimo J. A¹., Bieysse D²., Cilas C³., Nottéghem J.L².

¹ IRAD, Station de Foumbot, BP 665 Bafoussam Cameroon

² CIRAD-INRA-ENSAM, UMR BGPI, Campus International de Baillarguet, TA41/k, 34398 Montpellier Cedex 5 France

³ CIRAD-CP, UPR Bioagresseurs de pérennes, Avenue Agropolis, TA80/02 34398 Montpellier Cedex 5 France

Numéro : PD-11-06-0664-RE

2. Article soumis à « *European Journal of Plant Pathology* » du 27 Octobre 2006:

Effect of micro-environmental conditions on the development of arabica Coffee Berry Disease caused by *Colletotrichum kahawae*

Mouen Bedimo J. A¹., Bieysse D²., Njiayouom I.¹, Deumeni J. P¹., Cilas C³., Nottéghem J.L².

¹ IRAD, Station de Foumbot, BP 665 Bafoussam CAMEROUN

² Cirad-Inra-Ensam, UMR BGPI, Campus International de Baillarguet, TA41/k, 34398 Montpellier Cedex5

³ Cirad-CP, UPR Bioagresseurs de pérennes, Avenue Agropolis, TA80/02 34398 Montpellier Cedex5

Numéro : EJPP-S-06-00386

Tableau I. Valeur des recettes des exportations des principaux produits agricoles du Cameroun (en 1000 \$ E.U).

Produit	Année 2001	Année 2002	Année 2003	Année 2004
Ananas	158	141	272	384
Bananes	47,748	45,223	70,982	74,763
<u>Café vert</u>	<u>76.022</u>	<u>52.238</u>	<u>69.215</u>	<u>76.497</u>
Caoutchouc nat.	15,789	16,435	23,899	30,222
Fèves de cacao	116,733	187,723	178,936	230,040
Fibres de coton	101,194	91,982	107,780	144,427
Huile de palme	3,688	3,777	13,660	8,958
Pâte de cacao	31,359	41,315	60,991	34,942
Tabacs	1,519	1,909	2,001	2,693

Source : FAOSTAT | © OAA Division de la Statistique 2006

INTRODUCTION

Le café compte parmi les produits agricoles d'exportation présentant un enjeu socio-économique majeur car plus d'une centaine de millions de personnes dans le monde dépendent de sa production (Osorio, 2002). Il représente près de la moitié des exportations des produits tropicaux et constitue la base de l'économie de nombreux pays producteurs (Hallam, 2004). Le café génère environ 80% des recettes d'exportation du Burundi et en moyenne 50% de celles de l'Ethiopie, de l'Ouganda ou du Rwanda (Hallam, 2004). Au Cameroun, il constitue avec le cacao, le coton et la banane, les quatre principales sources de recettes issues de la commercialisation des denrées agricoles (tableau I). En raison de son importante valeur rentière, le café a continué à susciter l'intérêt de la plupart des pays producteurs, malgré l'effondrement des cours mondiaux au début de la dernière décennie. Cette mévente a provoqué une profonde déstructuration de la filière qui s'est traduite par un piètre entretien des vergers caféicoles dans les pays les plus pauvres. Il s'en est suivi un déclin significatif de la production, accentué par les dégâts dus aux insectes et aux maladies. Cependant, dans les pays producteurs d'Afrique, la protection phytosanitaire des caféières demeure insignifiante ou inappropriée en raison de la grande contrainte financière qu'elle représente pour la plupart des planteurs (Osorio, 2002 ; Hallam, 2004).

L'une des attaques parasitaires les plus destructrices observées sur le *Coffea arabica* est celle due à *Colletotrichum kahawae* sur les baies. Ce champignon est responsable de l'antracnose des baies ou *Coffee Berry Disease* (CBD), une mycose typique des régions de haute altitude (Masaba et Waller, 1992 ; Waller *et al.*, 1993). Cette maladie, présente à ce jour uniquement en Afrique, provoque la pourriture des baies vertes et leur chute prématurée, à partir des premières semaines de leur développement, jusqu'au stade qui précède la maturation. L'antracnose peut être contrôlée chimiquement par de nombreuses applications de fongicides systémiques ou de fongicides de contact à base de cuivre. Mais cette méthode de lutte reste contraignante, polluante et coûteuse. De plus, les règles du commerce international exigent désormais une normalisation rigoureuse des produits destinés à l'exportation, notamment en ce qui concerne la limitation des résidus de pesticides. Cette nouvelle réglementation n'autorise plus la mise sur le marché, des produits agricoles ayant été traités massivement par des pesticides. La lutte génétique est un autre moyen préconisé pour réduire l'incidence de cette maladie. Elle a conduit à la mise à disposition des producteurs, de certaines variétés tolérantes au CBD. Il s'agit par exemple des variétés *Java* au Cameroun (Bouharmont, 1992)

et *Riuru11* au Kenya (Van der Vossen et Walyaro, 1980). Toutefois, les observations réalisées au champ indiquent que les variétés tolérantes peuvent présenter un niveau d'infection non négligeable lorsqu'elles sont soumises à une forte pression infectieuse. En général, la lutte génétique n'est envisageable qu'à très long terme, alors que les producteurs sont d'abord demandeurs de solutions facilement applicables à court terme sur leurs plantations déjà en place. Les méthodes de lutte contre l'antracnose qui mobilisent les savoir-faire paysans tels que les pratiques culturales et les opérations agricoles simples pourraient être un moyen pour limiter les pertes de récolte et satisfaire cette attente des caféiculteurs. Cependant pour être efficaces, elles nécessitent avant leur mise en œuvre, une bonne connaissance de l'épidémiologie de la maladie et principalement, son évolution dans divers contextes agro-écologiques.

CHAPITRE 1 :

**SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CAFÉIER ET LES
ANTHRACNOSES DUES À *Colletotrichum* spp.**

1.1. LE CAFEIER

1.1.1. Généralités

Le caféier est une plante pérenne cultivée pour ses graines destinées prioritairement à l'exportation vers les pays d'Europe et d'Amérique du nord. Son aire naturelle de production s'étend autour de l'équateur, entre les tropiques du Cancer et du Capricorne (Smith, 1987) où il bénéficie des conditions climatiques optimales de croissance. Celles-ci sont caractérisées par des températures variant entre 17-23°C et des pluies abondantes de 1500 à 1800mm qui s'étalent sur une période de huit mois. Deux types de caféiers sont généralement cultivés dans les pays producteurs : le caféier Robusta et le caféier Arabica. Le café Robusta, pourvu d'une forte teneur en caféine, est cultivé dans les régions de basse altitude (alt. < 1000 mètres). Il est largement répandu dans les pays d'Asie (Vietnam, Indonésie, Inde, Philippines) et dans les pays d'Afrique de l'Ouest et Centrale (Côte d'Ivoire, Togo, Guinée, RDC). Le café Arabica, très apprécié en raison de sa faible teneur en caféine et de son arôme, est cultivé dans les régions de haute altitude (alt. > 1000 mètres). Il constitue les trois quarts de la production mondiale du café et l'Amérique latine en est la zone de culture par excellence (Charrier et Eskes, 2004.). Le Brésil est le premier pays exportateur de café (environ 1,6 million de tonnes par an), suivi par la Colombie (environ 570 000 tonnes par an). En Afrique, la culture du café est pratiquée sur une superficie de 13 millions de km² environ (Onzima *et al.*, 2002). La production annuelle de café en Afrique qui plafonnait à près d'un million de tonnes dans les années 70, a régressé à environ 635 000 tonnes au cours de ces cinq dernières années. Le café arabica y est surtout produit dans les pays de la partie orientale comme l'Éthiopie, quatrième producteur mondial de ce café, avec quatre millions de sacs de 60 kg par an. Le Kenya, le Rwanda, le Burundi, le Malawi, l'Ouganda peuvent être cités parmi les principaux pays de culture d'arabica de cette région. Cette culture est aussi pratiquée au Cameroun qui, avec l'Ouganda, sont les seuls pays du continent où coexistent les cultures de caféiers robusta et arabica. Le Cameroun, premier producteur de café en Afrique Centrale connaît, selon les statistiques de la FAO¹, une forte baisse de ses exportations qui ont régressé de 150 000 tonnes en 1990 à 55 000 tonnes en 2004 (Tableau 1.1). Cette situation est commune à tous les pays producteurs d'Afrique qui ont vu leur production décliner au cours de ces dernières années. Ce déclin en partie dû à la baisse des cours du café a contribué à réduire leur part de marché qui est passée de 30% dans les années 80 à 17% aujourd'hui (Onzima *et al.*, 2002). Le

¹ FAOSTAT : division de la Statistique 2006

café demeure néanmoins l'un des principaux socles du développement socio-économique de ces pays. Il constitue une importante source de devises et procure des revenus monétaires non négligeables aux petits paysans.

Tableau 1.1. *Exportations mondiales de café vert (quantité en tonnes) 2001-2004 : contribution des pays d'Afrique centrale*

Pays	Année 2001	Année 2002	Année 2003	Année 2004
Monde	5 440 429,14	5 492 413,00	5 232 477,00	5 661 213,00
1^{ers} exportateurs				
Brésil	1 252 217,00	1 551 410,00	1 369 159,00	1 410 801,00
Colombie	559 988,00	578 846,00	578 149,00	574 935,00
Afrique	678 333,14	645 748,00	549 589,00	669 188,00
Afrique Centrale	86 713,00	59 217,00	70 277,00	70 441,00
Angola	1 000,00	525,00	846,00	712,00
<u>Cameroun</u>	<u>70 601,00</u>	<u>47 929,00</u>	<u>53 325,00</u>	<u>53 674,00</u>
R.C.A	4 691,00	5 505,00	1 533,00	1 080,00
R.D. Congo	9 954,00	4 923,00	5 607,00	7 478,00
Rép. du Congo	250,00	255,00	8 159,00	6 718,00
Gabon	122,00	15,00	28,00	0,00
Guinée équatoriale	0,00	54,00	779,00	779,00
Tchad	0,00	0,00	0,00	0,00

Source : FAOSTAT : division de la Statistique 2006

1.1.2. Histoire du café arabica

Le caféier arabica serait originaire de la région de Kaffa en Abyssinie (l'actuelle Éthiopie) où il aurait été découvert vers l'an 850. Il fut cultivé pour la première fois vers le 9^{ème} siècle au Yémen qui devint par la suite son premier centre de diffusion à travers le monde. Mais, l'on ignore comment il y fut introduit. Sa propagation se fit rapidement dans les régions arabes à partir du 15^{ème} siècle, via les graines rapportées de la Mecque par les pèlerins musulmans. Vers 1690, les marins hollandais l'introduisirent à Ceylan (actuel Sri-Lanka), dans l'île de Java en Indonésie, puis dans toutes les colonies hollandaises d'Asie. Un exemplaire venant de

Java fut rapporté en Europe et conservé au jardin botanique d'Amsterdam. Des plants issus de sa multiplication furent préservés dans différents jardins botaniques d'Europe. Louis XIV fit conserver l'unique plant qui lui fut offert au Jardin du roi (actuel jardin des Plantes). Tous ces exemplaires furent utilisés quelques années plus tard, pour répandre le caféier arabica dans les colonies européennes des Caraïbes et d'Amérique du sud où il fut dénommé « *Typica* » (Eskes et Leroy, 2004). Des introductions des caféiers provenant des plantations yéménites furent aussi effectuées dans l'île de la Réunion vers 1708. Elles furent à l'origine des caféiers de type « *Bourbon* » cultivés en Afrique et dans plusieurs pays d'Amérique latine. Au Cameroun, les caféiers ont été introduits par les colons allemands en 1905. Cependant, la culture du caféier arabica dans ce pays a véritablement commencé en 1929, avec la distribution des jeunes plants issus des semences des caféiers de *Jamaïque*, cultivés dans une station expérimentale à Dschang (Wrigley, 1988). Les caféiers provenant du Kenya et de Java y ont été introduits plus tardivement. Les caféiers de type *Jamaïque*, communément appelés « *Dschang coffee* » et très sensibles au CBD, ont constitué les premières plantations de caféiers arabica au Cameroun. Un grand nombre de ces plantations subsistent encore dans la zone de culture d'arabica dans ce pays. Par contre, les caféiers *Java* qui sont très productifs et assez tolérants à cette maladie, n'ont commencé à être vulgarisés qu'au début des années 80, sous l'impulsion de l'Union Centrale des Coopératives Agricoles de l'Ouest Cameroun (UCCAO).

1.1.3. Description

Les forêts d'altitude du Sud-Ouest éthiopien constituent le centre de diversification du caféier arabica. Mais, Thomas (1942) et Berthaud et *al.* (1980), cités par Charrier et Berthaud (1987), estiment que cette plante pousserait également à l'état sauvage dans les forêts du plateau de Boma au Sud-Est du Soudan et dans celles du mont Marsabit au nord du Kenya. Son origine arabe supposée et certaines de ses caractéristiques proches du jasmin ont servi de prétexte pour sa dénomination *Jasminum arabicum* ou « Jasmin d'Arabie », lors de sa première description en 1713 par De Jussieu (Charrier et Berthaud, 1987 ; Charrier et Eskes, 2004). Le caféier appartient au genre *Coffea* qui, rattaché à la famille des Rubiacées, compte plus de quatre vingt dix espèces parmi lesquelles, seules les espèces *Coffea arabica* et *Coffea canephora* sont cultivées (Charrier et Berthaud, 1987). Le genre *Coffea* regroupe toutes les plantes tropicales de la famille des Rubiacées qui produisent des fruits drupacés à deux graines, présentant un sillon longitudinal médian (Hepper, 1963 ; Charrier et Berthaud, 1987).

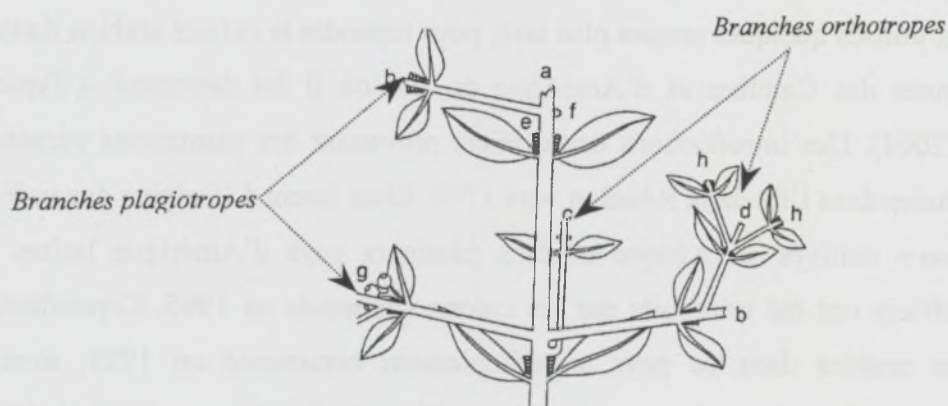


Figure 1.1. Description des rameaux (Wintgens, 2004)

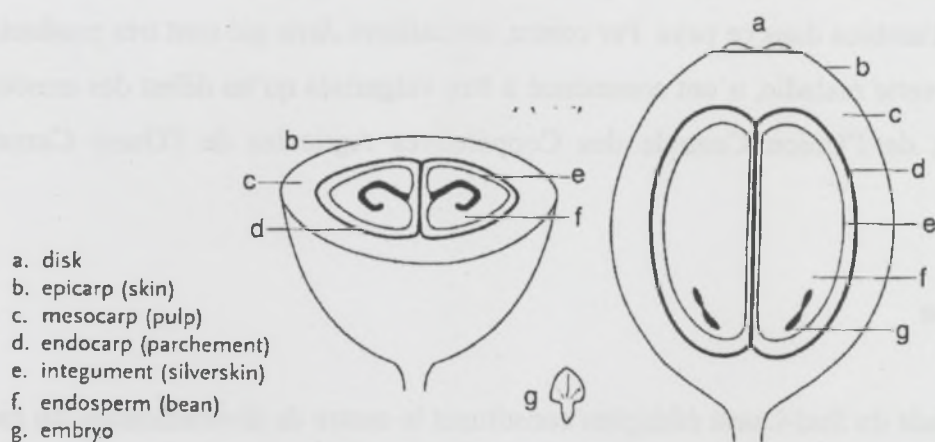


Figure 1.2. Coupes transversale et longitudinale d'une baies de café (Wintgens, 2004)



Toutes les espèces de caféiers sont diploïdes ($2n = 22$ chromosomes), auto-incompatibles et allogames (Charrier et Berthaud, 1987; Charrier et Eskes, 1997), à l'exception de *Coffea arabica* qui est allotetraploïde ($2n = 44$ chromosomes) et largement autogame (Van der Vossen et al., 1976 ; Charrier et Berthaud, 1987). Les caféiers présentent deux types de rameaux : les rameaux *orthotropes*, et les rameaux *plagiotropes* qui portent l'essentiel de la production (figure 1.1). Les feuilles sont persistantes, lancéolées et disposées en paires opposées le long de ces rameaux où elles s'insèrent au niveau des nœuds qui les divisent en petites sections ou *entre-nœuds*. La première floraison survient lorsque les caféiers sont âgés de 3 ans environ. L'on dénombre une floraison principale par an dans les régions à pluviométrie monomodale et deux dans celles disposant d'un régime bi-modal de précipitations. Les fleurs apparaissent généralement une dizaine de jours après le premier épisode pluvieux important, en fin de saison sèche. Elles sont de couleur blanche et sont disposées par cymes à l'aisselle des feuilles, formant des *verticilles* ou des *glomérules* de 8 à 15 fleurs en moyenne (Coste, 1955 ; Cannell, 1987 ; Van Der Graaff, 1992). Les rameaux ont une croissance indéfinie et généralement, chacun de leurs nœuds porte des fleurs une seule fois au cours de leur développement. D'où la nécessité de tailler les rameaux pour renouveler les zones fructifères. Les fleurs donnent naissance aux fruits qui sont des *drupes* du point de vue botanique, mais qui sont considérés comme des baies en raison de la faible épaisseur de leur endocarpe (Coste, 1955). De couleur verte au début de leur croissance, ils deviennent rouges foncés en mûrissant. La drupe (figure 1.2) est constituée de deux petites graines, séparées par un sillon et protégées par une pulpe ou *mésocarpe*. Chaque graine comprend un *endosperme* entourée par une fine pellicule argentée appelée *spermodermes* qui est elle-même recouverte d'une enveloppe cellulosique ou *endocarpe*, communément dénommée *parche*. Dans les conditions pédo-climatiques favorables, les caféiers peuvent produire une quinzaine de fruits par glomérule. Mais cette production est aussi très dépendante de l'état physiologique des plants. La croissance des fruits a été décrite suivant les différents stades ci-dessous (figure 1.3) (Cannell, 1985 ; Wintgens, 2004) :

- a. le **stade « tête d'épingle »** qui indique la plus petite taille des baies. Il commence à la nouaison et se termine vers la 8^{ème} semaine après la floraison ;
- b. le **stade d'expansion** des baies qui s'étend de la 8^{ème} à la 15^{ème} semaine après la floraison, caractérise la période de croissance rapide du péricarpe ;

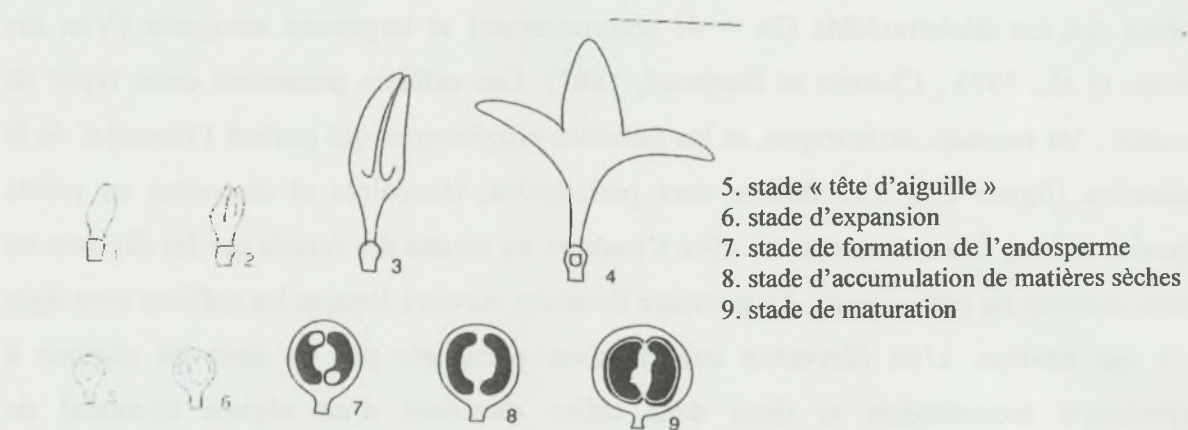


Figure 1.3. Cycle de développement des baies (Wintgens, 2004)

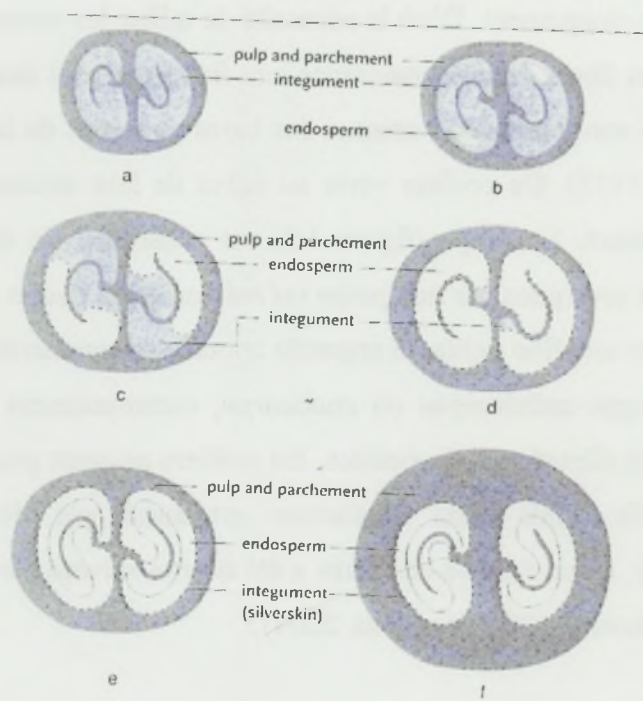


Figure 1.4. Formation de l'endosperme (Wintgens, 2004)

- c. le **stade de formation de l'endosperme**, de la 16^{ème} à la 21^{ème} semaine après la floraison, correspond au début de la formation des deux graines constituant la drupe. Ce stade correspond à la phase de remplissage des fruits (figures 1.4) ;
- d. le **stade d'accumulation de matières sèches** de la 22^{ème} à la 30^{ème} semaine, marque la période de la formation complète de l'endosperme. Ce stade représente la période de lignification de l'endocarpe et d'endurcissement des fruits ;
- e. le **stade de maturation** des fruits débute vers la 32^{ème} semaine après la floraison. Il se distingue par le ramollissement et l'expansion du mésocarpe dont la coloration vire graduellement du vert au rouge vif.

Il s'écoule en moyenne 8 mois entre la floraison et la maturation des fruits. La durée de chacun de ces différents stades de croissance des fruits peut sensiblement varier en fonction des génotypes et des conditions agro-écologiques du milieu.

1.1.4. La culture du caféier arabica

Contrairement à *C. canephora* qui est cloné en routine par bouturage avant son établissement dans les parcelles, *C. arabica* est généralement multiplié à partir des graines. Les graines sélectionnées sont mises en germe et, après environ deux mois, les plantules qui en sont issues sont transférées en pépinière. Ces jeunes plants seront entretenus pendant une période de 9 à 12 mois avant leur plantation. Une fois installés au champ, ils peuvent entrer en production dès la deuxième année ; toutefois, leur potentiel productif ne commence à s'exprimer pleinement que vers la quatrième année. Selon le mode de conduite, le caféier arabica peut rester en production pendant 15 à 70 ans. La densité des plantations dépend du développement végétatif des arbres. Elle est assez faible (≈ 1200 plants/ha) au Cameroun où la pratique d'associations culturales avec des plantes vivrières et/ou fruitières est très fréquente. En région de moyenne altitude (alt. ≈ 1100 m) où le développement végétatif des arbres est important, Bouharmont (1992) préconise pour la culture intensive, des densités de 2222 caféiers/ha, plantés aux écartements de 3m X 1,50m ou 2,50m X 1,80m. Ces caféiers sont en général cultivés sous couvert de plantes d'ombrage constituées, dans les exploitations paysannes, d'arbres fruitiers ou de bananiers (Phiri et al., 2001). Dans les plantations en conduite intensive, l'ombrage est fourni par des espèces du genre *Leucaena*, *Albizia*, ou

Acacia plantées à des écartements de 6m x 6m (Muller, 1980 ; Bouharmont, 1992). La taille, le désherbage, la fertilisation et les traitements phytosanitaires sont des opérations agricoles indispensables pour l'entretien annuel des caféières en vue d'une production optimale de fruits.

Taille

Deux types de taille sont pratiqués sur le caféier :

a) la **taille d'entretien** dont le but est de stimuler les poussées foliaires et de favoriser le développement des rameaux fructifères. Elle est effectuée annuellement et consiste à supprimer les « gourmands », les rameaux parasités ou desséchés, les branches primaires trop basses et serrées, et toutes les branches secondaires encombrantes rendues peu productives à la suite de plusieurs cycles de fructifications.

b) la **taille de formation** qui permet de structurer le port des arbres et de régénérer les caféières au bout de plusieurs cycles de production. Elle peut être conduite en *multicaulie*, c'est à dire en tiges multiples à croissance libre avec un recepage cyclique. Elle peut également être conduite en *unicaulie*, autrement dit, en tige unique écimée (Cannell, 1987 ; Bouharmont, 1992). La taille en multicaulie favorise le débourrement des bourgeons et la croissance rapide des jeunes rejets. Elle est généralement pratiquée pour les caféiers plantés sur des sols fertiles, au risque d'occasionner la perte d'un certains nombre de souches, ou de favoriser l'émergence de rejets moins vigoureux, aux feuilles carencées. La taille en unicaulie est recommandée pour les caféiers disposés sur des sols moins riches. Elle nécessite obligatoirement le maintien d'un tire-sève sur les arbres en cours de régénération afin d'atténuer le choc physiologique qu'ils pourraient subir lors de cette opération (Bouharmont, 1992).

Désherbage

Deux ou trois désherbages annuels sont recommandés pour l'entretien des caféières. Ils sont généralement effectués avant la fertilisation afin de limiter la concurrence éventuelle des mauvaises herbes. L'usage des herbicides tels que le glyphosate (Round-Up 450) ou le paraquat (Gramoxone) est fréquent dans les plantations de type intensif. Par contre, dans les

exploitations paysannes, le rythme du désherbage qui est exclusivement manuel dépend des opérations agricoles réalisées pour l'entretien des cultures vivrières associées.

Fertilisation

Dans les plantations paysannes, il est pratiqué une fertilisation organique générée par des déchets domestiques, des déjections d'animaux d'élevage (porcs, poulets, etc...) et des résidus du dépulpage en fin de campagne. Cet apport de matière organique est souvent complété par un épandage d'engrais minéraux (N-P-K : 20-10-10) en mi-campagne. Malheureusement, cette fertilisation profite peu aux caféiers qui subissent, du fait de leur association avec des cultures vivrières, une concurrence fortement dommageable pour leur développement. Dans les caféières camerounaises conduites suivant un itinéraire technique de type intensif, l'application des fertilisants est effectuée en trois passages : une à deux semaines après la nouaison (en mi-Avril), en mi-campagne (en Juillet) et vers la fin de la saison des pluies (Octobre). Mais il est recommandé que cette fertilisation soit adaptée à chaque type de sol (Bouharmont 1992)

Traitements phytosanitaires

Ils consistent en l'application, en cas de besoin, d'insecticides contre les chenilles défoliatrices, les punaises, les foreurs de tiges et les cochenilles. Au Cameroun, dans les zones à forte incidence d'anthracnose des baies, quelques exploitants réalisent des traitements fongicides qui nécessitent 7 à 8 applications annuelles, à partir de la 6^{ème} semaine après la floraison (Berry *et al*, 1991).

1.1.5. Les contraintes de production au Cameroun

1.1.5.1. Les ravageurs

Tous les organes du caféier sont attaqués par les ravageurs. Les attaques de *Hypotenemus hampei* Ferr perforent les baies (Dufour, 2002) et celles de *Xyleborus spp* endommagent les branchettes (Hillocks *et al*. 1999). Les épicaumoptères détruisent les feuilles, entraînant parfois la défoliation complète des arbres. Les nématodes *Meloidogyne incognita*, *Meloidogyne exigua* et *Pratylenchus coffeae* peuvent fortement perturber le développement

des racines et occasionner des dysfonctionnements de la nutrition minérale et hydrique des plants (Charrier et Eskes, 1997 ; Hillocks et *al.* 1999 ; Villain et *al.*, 2002). Ces désordres physiologiques se traduisent par le ralentissement de la croissance des caféiers et la chlorose de leur feuillage (Villain et *al.*, 2002).

1.1.5.2. Les maladies cryptogamiques :

Le caféier arabica est sujet à un grand nombre de maladies cryptogamiques dont les plus couramment rencontrées au Cameroun sont : la cercosporiose (*Cercospora coffeicola*), les rouilles (*Hemileia spp.*) et les anthracnoses des feuilles, des rameaux et des baies (*Colletotrichum spp.*).

La cercosporiose

Cette maladie due à *Cercospora coffeicola* attaque surtout les feuilles. Elle se manifeste par des taches circulaires et brunes présentant un halo jaunâtre et une petite zone centrale de couleur claire. Les baies infectées par cette mycose présentent les taches de même type qui se singularisent cependant par leur concavité (Muller et *al.*, 2004). La cercosporiose peut être très sévère sur les jeunes caféiers, lorsque les conditions du milieu sont favorables. Elle peut être contrôlée par des méthodes préventives qui consistent à maintenir la plantation dans un bon état sanitaire et à effectuer une bonne fertilisation azotée. Au Cameroun, les traitements fongicides ne sont pas spécifiquement effectués pour lutter contre cette maladie ; mais leur usage contre l'anthracnose des baies permet aussi de protéger les plants contre toutes les autres mycoses.

a. Les rouilles

Par leurs attaques sur feuilles, les rouilles réduisent les capacités assimilatrices des arbres et occasionnent par conséquent, des baisses sensibles de rendements. Deux sortes de rouilles ont été décrites sur le caféier : la rouille orangée due à *Hemileia vastatrix* Berk. et Br et la rouille farineuse causée par *Hemileia coffeicola* Maublanc et Roger. La rouille orangée qui est la plus spectaculaire, en raison de l'ampleur des dégâts qu'elle peut occasionner, a été observée pour la première fois en 1868 à Ceylan (actuel Sri-Lanka) (Muller, 1980). Elle débute par l'apparition de petites taches jaunâtres d'aspect huileux par transparence, à la face inférieure

de feuilles. Ces taches s'étendent ensuite progressivement et se recouvrent au bout d'une dizaine de jours, d'une poudre orangée constituée d'urédospores. Cette affection est l'une des plus graves menaces de la culture de l'arabica dans les pays d'Amérique du Sud (Avelino *et al.*, 2004). Au Cameroun, elle est observée dans toutes les zones de production d'arabica. Mais, elle est surtout importante dans les caféières situées autour de 1000 mètres d'altitude, probablement à cause des températures journalières élevées. La rouille farineuse quant à elle, a été identifiée pour la première fois en 1929 au Cameroun (Muller *et al.*, 2004). Cette maladie se caractérise par la présence d'une pulvérulence jaune orangée couvrant l'ensemble de la face inférieure du limbe ; la feuille jaunit complètement, puis tombe. Contrairement à *Hemileia vastatrix* qui provoque des taches aux contours bien définis sur les limbes, *Hemileia coffeicola* ne cause pas de nécroses sur les feuilles ; celles-ci présentent une teinte normale au début de l'infection (Muller, 1980 ; Muller *et al.*, 2004). Les dégâts dus aux rouilles peuvent être contrôlés par la mise en œuvre de pratiques culturales défavorables à la croissance des agents pathogènes (Avelino *et al.*, 2004). Les variétés résistantes comme *Catimor*, *Colombia* ou *Icatu* ont aussi permis un meilleur contrôle de la rouille orangée dans les pays producteurs d'Amérique du Centre et du Sud (Charrier et Eskes, 1997). L'application des fongicides à base de cuivre s'est avérée efficace pour la lutte contre les deux types de rouille au Cameroun (Muller *et al.*, 2004).

b. Les anthracnoses

Elles sont dues aux champignons du genre *Colletotrichum* et se différencient suivant la spécificité des espèces pathogènes vis-à-vis de certains organes du caféier. C'est ainsi que l'anthracnose des rameaux et des feuilles, causée par *C. gloeosporioides* (Gielink et Vermeulen, 1983 cités par Massaba et Waller, 1992) se distingue de celle des baies due à *C. kahawae*. (Waller *et al.*, 1993). Sur les feuilles, elle se manifeste par les taches nécrotiques irrégulières apparaissant généralement à la marge du limbe (Muller *et al.*, 2004). Les attaques sur les rameaux se caractérisent quant à elles par un dessèchement régressif qui débute par l'apparition des taches brunes entourées d'un halo jaunâtre (Muller *et al.*, 2004). Cette forme d'anthracnose est marginale dans les plantations camerounaises qui subissent plutôt les attaques très dévastatrices de l'anthracnose des baies. Cette maladie qui est le principal objet de notre travail sera présentée dans la section 1.2 du présent chapitre.

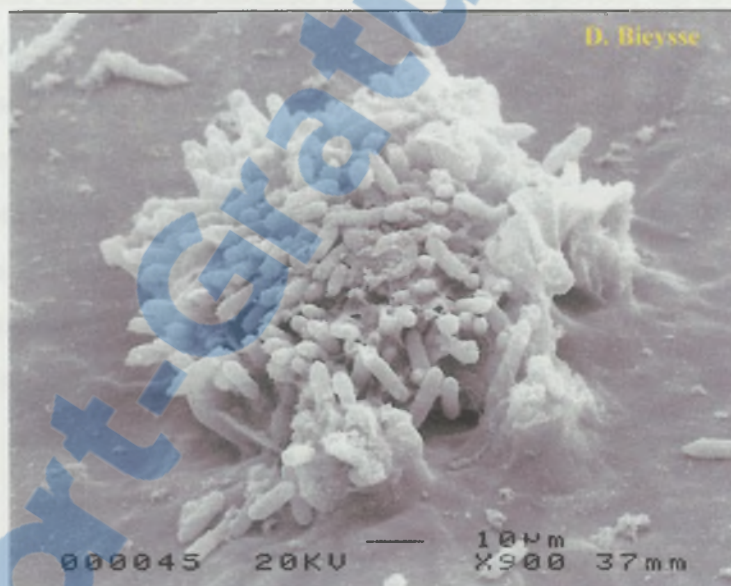


Photo 1.1. *Acervule de C. kahawae sur baie*
(vue sous microscopie à balayage)

I.2. Etat des connaissances sur les maladies causées par les champignons du genre *Colletotrichum* en milieu tropical

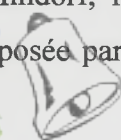
I.2.1. Taxonomie et description

Les champignons du genre *Colletotrichum* sont des Deutéromycètes appartenant à l'ordre des Mélanconiales (Roger, 1953 ; Lepoivre, 2003). Ce sont des champignons très ubiquistes qui occasionnent des maladies nécrotiques ou anthracoses sur la plupart des espèces végétales cultivées à travers le monde. Plusieurs espèces dont *Colletotrichum kahawae* sont considérés comme des champignons imparfaits lorsque leur mode de reproduction sexuée n'est pas connue. Toutefois, la forme sexuée, généralement rattachée aux champignons du genre *Glomerella*, a été décrite pour un certain nombre de ces champignons (Sutton, 1992). C'est ainsi que *Glomerella cingulata* Stonen et *Glomerella musarum* Petch sont la forme téléomorphe des anamorphes *C. gloeosporioides* et *C. musae*. Les *Colletotrichum* présentent des structures de fructification ou *acervules* (photo 1.1) qui sont constituées de conidiophores accolés les uns aux autres (Cox et Irwin, 1988). Ces structures sont entourées d'une couche mucilagineuse hydrosoluble orangée, essentiellement composée de glycoprotéines, de polysaccharides et de diverses autres enzymes (Bailey *et al.*, 1992). Le mucilage des acervules assure la viabilité des conidies dans les conditions défavorables du milieu (Nicholson, 1992). Les conidies sont issues du bourgeonnement apical des conidiophores. Elles sont unicellulaires et hyalines ; mais leurs dimensions varient suivant les espèces. Les caractéristiques des acervules et celles des conidies ont constitué les critères de base pour la première description de *Colletotrichum* spp. par Corda en 1831 (Jeffries *et al.*, 1990). Plus tard, la discrimination entre les espèces a été effectuée sur la base des faciès culturels *in-vitro* (Simmonds, 1965; Baxter *et al.*, 1983 ; Sutton, 1992). C'est ainsi qu'il a été proposé que certaines espèces ayant jadis appartenu au genre *Colletotrichum* soient regroupées au sein d'un nouveau genre dénommé *Vermicularia* (Baxter *et al.*, 1985). Au cours de ces dernières années, l'usage des outils de la biologie moléculaire dans les travaux de taxonomie ont permis d'établir une discrimination fine entre diverses espèces de *Colletotrichum* (Freeman *et al.*, 1993 ; Sreenivasaprasad *et al.*, 1993).

Plusieurs espèces de *Colletotrichum* peuvent occasionner différents symptômes d'anthracnose sur une même plante hôte. C'est le cas de *C. gloeosporioides*, *C. acutatum*, et *C. fragariae* qui causent différents symptômes d'anthracnose sur les fraises (Freeman et Shabi ; 1996). Parfois,

des champignons saprophytes peuvent s'installer dans les organes préalablement infectés par une espèce pathogène de *Colletotrichum*. C'est ainsi que *C. acutatum* ou *C. gloeosporioides* dont la pathogénicité n'a jamais été signalée sur les baies vertes du caféier arabica, sont souvent isolés des baies infectées par *C. kahawae*. De même, la présence des espèces comme *Pestalotiopsis psidii* et *Botryodiplodia theobromae* a été signalée dans les lésions d'anthracnose de goyaves dues à *Colletotrichum gloeosporioides* (Hossain et Meah, 1992). *C. gloeosporioides* a été signalé comme l'un des champignons le plus ubiquiste du genre *Colletotrichum* (Fitzell et Peak, 1984 ; Arauz, 2000). Il est fréquemment mis en cause dans les infections d'anthracnose sur diverses plantes tropicales telles que les avocatiers, les papayers, les manguiers, les goyaviers, les *Citrus*, etc. Il peut s'adapter rapidement aux nouvelles plantes hôtes du fait des mutations ou du phénomène de parasexualité (Sreenivasaprasad *et al.*, 1993 ; Alahakoon *et al.*, 1994). *C. gloeosporioides* avait été isolé pour la première fois en 1882 par Penzig, à partir des feuilles et des branches de *Citrus* cultivés en Italie. Il avait été dénommé *Vermicularia gloeosporioides*, et avait été décrit comme un champignon disposant d'un thalle cloisonné et des conidies hyalines et cylindriques (Walker *et al.*, 1991). Simmonds (1965) a subdivisé les individus de cette espèce en deux sous groupes: *C. gloeosporioides* var. *gloeosporioides* qui dispose de larges conidies oblongues, arrondies à leurs extrémités et *C. gloeosporioides* var. *minor* dont les conidies moins larges présentent une extrémité effilée. Certaines populations de *C. gloeosporioides*, comme celles isolés d'avocatiers en Nouvelle Zélande ou en Australie, sont génétiquement proches de *C. kahawae*, agent causal de l'anthracnose des baies du caféier (Sreenivasaprasad *et al.*, 1993).

Les premiers cas d'anthracnose sur caféiers ont été signalés en 1901 par Noack, sur les feuilles et l'écorce du caféier arabica au Brésil et l'espèce *Colletotrichum coffeanum* avait été identifiée comme le champignon responsable de cette maladie (Hindorf et Muthappa, 1974). Cependant, l'anthracnose des baies a été observée pour la première fois en 1922 par McDonald, dans les plantations du plateau de Uasin Gishu, à l'ouest du Kenya (Griffiths et Waller, 1971). Elle s'est progressivement propagée à tous les pays producteurs de café arabica d'Afrique, jusqu'en 1980 (Tableau 1) (Van der Graaff, 1992). L'agent pathogène de cette forme d'anthracnose avait été décrit comme une variante de *Colletotrichum coffeanum* Noack, dénommée « var. *virulans* » (Rayner 1952, cité par Gibbs, 1969). Il avait été caractérisé par son profil cultural *in-vitro* qui présentait un mycélien aérien abondant, grisâtre ou noir et sans acervules, les conidies étant formées directement sur les hyphes isolés (Hindorf, 1970). La dénomination *Colletotrichum coffeanum* Noack (*sensu* Hindorf) a été proposée par Hindorf



(1970) pour marquer la spécificité de cet agent pathogène vis-à-vis des baies du caféier arabica. Plus tard, une analyse biochimique de plusieurs isolats de *Colletotrichum* issus du caféier arabica a permis d'identifier les isolats pathogènes sur baies vertes, grâce à leur incapacité d'utiliser le citrate ou le tartate comme unique source de carbone pendant leur métabolisme (Waller *et al.*, 1993). C'est ainsi que l'appellation *Colletotrichum kahawae* sp. nov. (Waller & Bridge) a été adoptée afin de distinguer l'espèce pathogène sur baies vertes de toutes les autres, vivant en saprophytes sur le caféier arabica (Waller *et al.*, 1993). *C. kahawae* cohabite naturellement avec *C. acutatum* et *C. gloeosporioides* dans les caféières atteintes par le CBD.

Tableau 1.2. Première descriptions du CBD dans les pays d'Afrique (Van der Graaff, 1992)

Pays	1ère observation	Références
Kenya (Ouest de la vallée du Rift)	1922	McDonald, J.
Angola	1930	Mendes da Ponte, A.
RDC	1937	Hendrickx, F. L.
Kenya (Est de la vallée du Rift)	1939	Rayner, R. W.
Cameroun (Ouest)	1955/1956	Muller, R. A.
Cameroun (Est)	1957	Muller, R. A.
Rwanda	1957	Foucarg, G. et Brion, L.
Ouganda	1959	Butt, D. J. et Butters, B.
Tanzanie (Kilimandjaro)	1964	Tapley, R. G.
Ethiopie	1969?	Mulinge, S. K.
Zimbabwe	Début 1980	-

1.2.2. Biologie de *Colletotrichum* spp.

Le cycle de base de *Colletotrichum* sp. débute par le germination des conidies à la suite de leur contact avec les tissus des plantes hôtes. Il s'en suit une elongation des tubes germinatifs dont la partie apicale se différencie plus tard, en une structure spécialisée appelée *appressorium* (Bailey *et al.*, 1992 ; Swinburne, 1983; Jeffries *et al.*, 1990). Les hyphes d'infection se développent à partir des appressoria pour coloniser l'organe attaqué, entraînant la nécrose des tissus sur lesquels se forment de nouvelles acervules.

1.2.2.1. La germination des conidies

La germination des conidies de *Colletotrichum spp.* est relativement rapide dans les conditions favorables du milieu. Chez de nombreuses espèces, elle peut survenir 24 heures après le contact des conidies avec les tissus de la plante hôte. C'est notamment le cas de *C. gloeosporioides* sur les avocats (Binyamini et Schiffmann-Nadel, 1972) et sur les citrus (Fagan, 1970). La germination des conidies est favorisée par des humidités relatives proches de la saturation (Gupta et Pathak, 1990 ; Goos et Tschirsch, 1962) et par des températures optimales pouvant être estimées entre 20 et 22°C pour *C. kahawae* (Muller, 1980 ; Masaba et Waller, 1992). Toutefois, elle n'est déclenchée que s'il existe une compatibilité entre le parasite et les organes concernés par l'infection. De plus, elle peut par exemple être induite par la couche cireuse du péricarpe des fruits tel que signalé par Kolattukudy *et al.* (1995) pour le pathosystème *C. gloeosporioides* / *Persea americana*.

1.2.2.2. La formation des appressoria

Les appressoria sont des structures infectieuses qui assurent l'adhésion de certains champignons pathogènes à la surface des plantes hôtes et leur pénétration dans les organes contaminés (Emmet et Parbery, 1975; Young et Kauss, 1984; Muruganandam *et al.*, 1991). La formation des appressoria débute par gonflement apical des tubes germinatifs des conidies dont les parois cellulaires s'épaississent et se mélanisent progressivement par la suite. Lorsque les appressoria arrivent à maturité, les conidies à partir desquelles ils sont issus se vident et dégénèrent (Emmet et Parbery, 1975). Ils sont surtout formés sur des substrats solides et hydrophobes. Leur degré de mélanisation est fonction de la solidité et de l'hydrophobicité de ces substrats (Estrada *et al.*, 2000). La mélanine leur assure la rigidité nécessaire pour supporter la pression mécanique des cellules des plantes hôtes, car ils mettent en jeu une importante force hydrostatique pour traverser la cuticule des tissus épidermiques des organes hôtes (Wolkow *et al.*, 1983; Coates *et al.*, 1993). Les appressoria de *Colletotrichum sp.* sont de forme lobée et sont séparés des tubes germinatifs des conidies par une cloison (Emmet et Parbery, 1975). Leur développement est favorisé par des humidités relatives saturantes (Estrada *et al.* 1993) et par des températures optimales variables suivant les espèces. Les appressoria de certains *Colletotrichum spp.* peuvent rester dormants pendant plusieurs mois en raison des conditions physiologiques imposées par la plante hôte. Il s'agit du phénomène de quiescence généralement observé dans le cas des anthracnoses post-récoltes

des fruits climactériques (Swinburne, 1983 ; Jeffries *et al.*, 1990 ; Coates, *et al.*, 1993; Arauz, 2000). Toutefois, ce phénomène n'a pas encore été décrit dans le cadre de l'antracnose des baies du caféier arabica.

1.2.2.3. La pénétration

Le point de contact entre les appressoria et les tissus hôtes constitue le site de pénétration de *Colletotrichum spp.* dans les organes contaminés. Il s'agit d'une zone privilégiée où la pression hydrostatique des appressoria et la dégradation enzymatique des parois cellulaires favorisent la pénétration des hyphes d'infection dans les cellules hôtes (Emmet et Parbery, 1975; Coates *et al.*, 1993; Prusky et Keen, 1993 ; Chen *et al.*, 2004). La pénétration des *Colletotrichum spp.* dans ces cellules peut aussi survenir via des blessures ou des orifices naturels (ex. les stomates) des tissus épidermiques des organes contaminés. Dans ce cas, les tubes germinatifs des conidies s'établissent directement dans les cellules hôtes, sans se différencier au préalable en appressoria (Wolkow *et al.*, 1983; Latunde-Dada *et al.*, 1999).

1.2.2.4. La colonisation

Elle est caractérisée par l'invasion des tissus de la plante hôte par les hyphes d'infection qui sécrètent des enzymes comme les polygalacturonases et la pectine lyase, provoquant ainsi la mort des cellules infectées (Bailey *et al.*, 1992). Il en résulte des tissus nécrosés sur lesquels de nouvelles fructifications de l'agent pathogène apparaissent lors de la phase terminale du processus infectieux (Bailey *et al.*, 1992). Pour la plupart des *Colletotrichum sp.*, cette phase nécrotrophique est précédée par une phase biotrophique au cours de laquelle le parasite s'installe à l'intérieur des cellules hôtes sans les détruire. Il s'agit du comportement typique des espèces de *Colletotrichum* telles que *C. kahawae* qui sont dites hémibiotrophes (Bailey *et al.*, 1992). D'autres espèces de *Colletotrichum* ne s'établissent pas directement à l'intérieur des cellules hôtes au début de l'infection, mais plutôt dans les parois cellulaires qu'elles dégradent progressivement par la suite. Dans ce cas la croissance du parasite se fait sous la cuticule des cellules de la plante hôte. C'est le cas de *C. capsici* sur le cotonnier ou de *C. gloeosporioides* sur le papayer tel que rapporté respectivement par Roberts et Snow en 1984 et par Chau et Alvarez en 1983 (Bailey *et al.*, 1992).

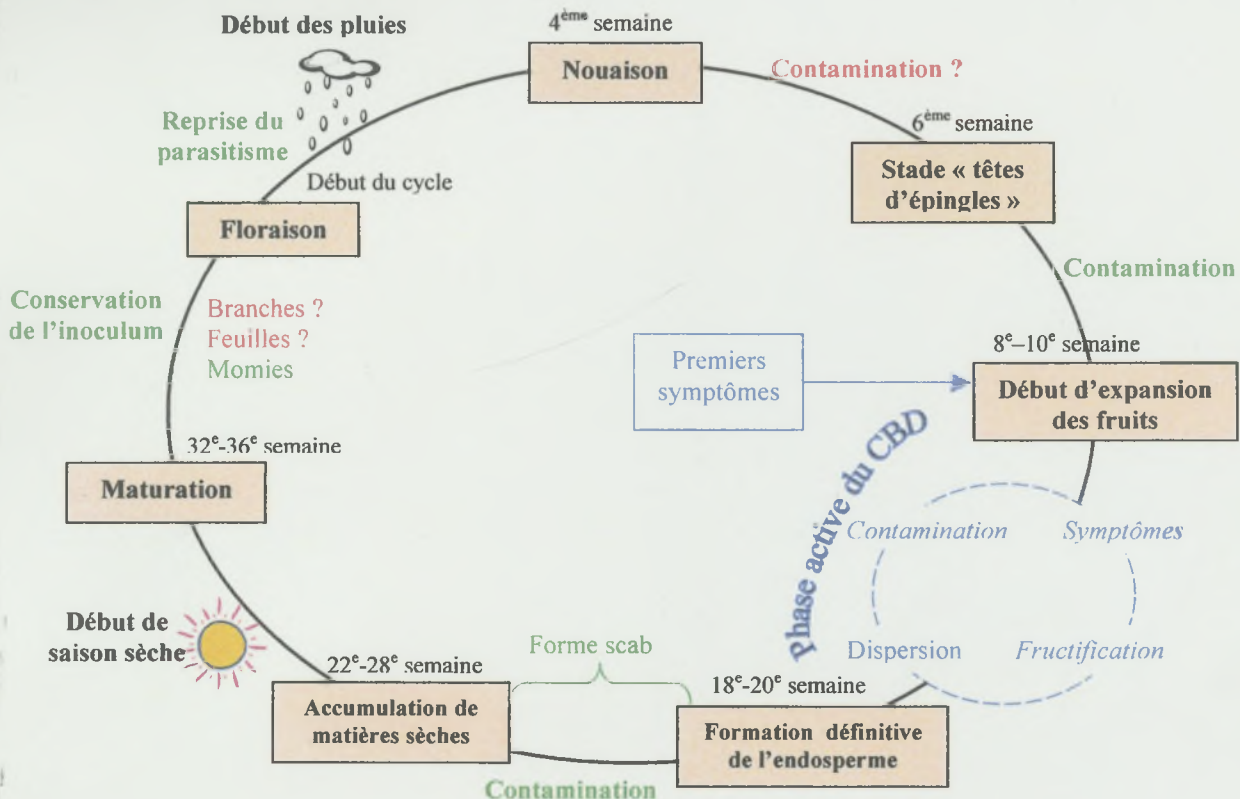


Photo. 1.2. *Baies infectées par le CBD*



Photo 1.3. *Forme Scab de la maladie*

I.2.3. - Epidémiologie de l'antracnose des baies du caféier arabica

Figure 1.5. Cycle annuel de développement de l'antracnose des baies (*C. kahawae*)

Les modalités de conservation de *C. kahawae* en l'absence de baies après la récolte sont encore mal connues. Cependant, l'écorce des rameaux, les coussinets floraux et les baies momifiées sont considérés comme les sources d'inoculum primaire de la maladie (Nutman et Roberts, 1960; Muller, 1980 ; Van Der Graaff, 1992). L'agent pathogène y survivrait pendant la saison sèche (Novembre-Mars) et ne reprendrait son activité parasitaire qu'en début de saison de pluie (Figure 1.5). Les premières contaminations des fruits surviennent après la nouaison, vers la 6^{ème} semaine après la floraison, lorsque les fruits sont au stade « tête d'aiguille ». Les symptômes de la maladie commencent à apparaître vers la 8^{ème} semaine après la floraison, au stade d'expansion des fruits (photo 1.2). Ils consistent en des tâches nécrotiques sombres et déprimées présentant parfois des acervules de couleur orangée. La plupart des baies infectées chutent prématurément mais, celles qui restent accrochées sur les branches constituent les sources principales d'inoculum secondaire à partir desquelles de nouvelles conidies de *C. kahawae* vont se disperser pour contaminer d'autres baies saines. Il en résulte plusieurs cycles de développement de l'agent pathogène jusqu'au début de la

formation de l'endocarpe (20^{ème} semaine). La maladie est très active entre la 8^{ème} et la 20^{ème} semaine après la floraison, en raison de la présence des tissus hôtes réceptifs et des conditions climatiques hautement favorables pour le développement de *C. kahawae* (pluies, températures et humidité). Les conidies sont principalement dispersées par la pluie. Elles sont transportées par les gouttelettes d'eau engendrées par l'impact de la pluie sur les baies infectées. Il s'agit du phénomène de « *splashing* » qui peut entraîner la dispersion des conidies de certains champignons comme *Mycocentrospora acerina*, parasite du cumin, à une distance d'environ 6 mètres de la source d'inoculum (Evenhuis *et al.*, 1997). La plupart des conidies de *C. kahawae* peuvent être efficacement dispersées par une pluie optimale de 10mm ; cependant, de fortes pluies entraînent plutôt leur lessivage, de la canopée des caféiers vers le sol (Waller, 1972). Au delà de la 20^{ème} semaine après la floraison, les baies deviennent peu sensibles à la maladie (Muller, 1980 ; Van Der Graaff, 1992). En général, les contaminations qui surviennent à ce stade de développement des baies évoluent en lésions superficielles non dommageables pour les graines : c'est la forme dite « *Scab* » de la maladie (photo 1.3) (Muller, 1980, Masaba et Waller, 1992).

L'anthracnose des baies est pratiquement inexistante dans les plantations situées en deçà de 1000 mètres d'altitude. Au contraire, elle est très sévère dans celles situées à des altitudes supérieures à 1600 mètres (Muller, 1980 ; Van der Graaff, 1992 ; Waller *et al.*, 1993). Elle est généralement contrôlée par des traitements fongicides qui nécessitent 7 à 8 passages annuels. De plus, les variétés tolérantes telles que la Java au Cameroun (Bouharmont, 1992) et le Riuru11 au Kenya (Van Der Vossen, 1976) permettent de réduire significativement les pertes dues à cette maladie.

CHAPITRE 2 :

PROBLÉMATIQUE

2.1. Contexte

Les épidémies dues aux champignons du genre *Colletotrichum spp.* sont très fréquentes sur les cultures pérennes en milieu tropical. Elles peuvent être occasionnées par des agents pathogènes ubiquistes comme *C. gloeosporioides* sur manguier (Arauz, 2000 ; Fitzell, 1981 ; Fitzell et Peack, 1984) ou sur Citrus (Denham et Waller, 1981), qui attaque tous les organes aériens de ces espèces. Dans le cas de ces maladies, des tissus réceptifs à l'agent pathogène sont présents tout au long de l'année sur la plante hôte. Pour d'autres anthracnoses, l'agent pathogène n'attaque que les organes réceptifs à un certain stade de leur développement et les épidémies ne se développent que pendant une période courte du cycle annuel de la plante. C'est le cas de l'anthracnose des baies du caféier arabica ou *Coffee Berry Disease* (CBD) due à *Colletotrichum kahawae* Waller & Bridge (Waller *et al.*, 1993). Dans ce type d'épidémies, l'absence d'organes réceptifs à l'agent pathogène pendant une longue période du cycle phénologique de la plante hôte, amène à s'interroger sur l'origine de l'inoculum primaire au début du cycle épidémique suivant. De plus, la culture du café nécessite la mise en œuvre d'opérations agricoles dont certaines comme la taille d'entretien, peuvent entraîner l'élimination de nombreuses sources potentielles d'inoculum primaire. Des enquêtes conduites dans les plantations familiales au Malawi ont révélé que ces pratiques agricoles permettent de réduire le taux de pertes dues au CBD (Hillocks *et al.*, 1999 ; Phiri *et al.*, 2001). Toutefois, ce résultat n'a pas encore été confirmé expérimentalement.

Le développement des anthracnoses dépend des facteurs climatiques tels que la pluie, les températures et l'humidité. La pluie est l'agent principal de dispersion des conidies de *Colletotrichum sp.* (Griffiths et Waller, 1971 ; Guyot *et al.*, 2001 ; Ntahimpera *et al.*, 1999). La germination des conidies et la croissance mycélienne nécessitent des températures optimales variables suivant les pathosystèmes ; celles-ci sont par exemple estimées à 25°C pour *C. gloeosporioides* sur les Citrus (Denham et Waller, 1981), à 29-32°C pour *C. musae* sur les bananes (de Lapeyre de Bellaire, 1999), à 23-27,7°C pour *C. acutatum* sur les fraises (Leandro *et al.*, 2003), à 20-22°C pour *C. kahawae* sur le café (Muller, 1980 ; Van der Graaff, 1992). La formation des appressoria est favorisée par des températures optimales et des taux d'humidité proches de la saturation (Bathia et Munkvold, 2002 ; Estrada *et al.*, 1993 ; Gupta et Pathak, 1990). Ces facteurs climatiques prépondérants pourraient être utilisés pour la définition de modèles de prévision des pertes dues aux maladies.

2.2. Hypothèses de recherche

L'importance des facteurs climatiques dans le déroulement des épidémies des maladies dues à *Colletotrichum sp.* est unanimement reconnue (Griffiths et Waller, 1971; Waller, 1972 ; Muller, 1980; Madden *et al.*, 1996; de Lapeyre *et al.*, 2000). Toute variation de ces facteurs en saison pluvieuse pourrait avoir une incidence sur le développement de *C. kahawae* et sur la physiologie des baies de café. Par conséquent, le cycle épidémique du CBD pourrait en être affecté, en particulier certains éléments du cycle de base de la maladie tels que la contamination des baies en début de campagne et la période d'incubation de la maladie. L'épidémie ne peut débuter que lorsque ces facteurs climatiques permettent à l'inoculum primaire d'initier des infections sur les baies nouvellement formées. Dans le cas spécifique du CBD, les baies momifiées, les bourrelets floraux et l'écorce des rameaux sont considérés comme des sources potentielles d'inoculum primaire (Muller, 1980 ; Van der Graaff, 1992). Toutefois, ces sources d'inoculum n'ont pas encore été formellement confirmées. L'hypothèse d'un inoculum primaire provenant des rameaux semble difficilement acceptable, compte tenu de la grande spécificité de *C. kahawae* vis-à-vis des baies vertes (Waller *et al.*, 1993). En revanche, les baies momifiées apparaissent vraisemblablement comme la principale source d'inoculum susceptible de déclencher la maladie en début de campagne. Dans ce cas, leur suppression complète, immédiatement après la dernière récolte, pourrait conduire à une réduction drastique du niveau de maladie lors de la saison de fructification suivante.

Les études épidémiologiques effectuées sur le CBD au Cameroun, ont montré que la période de sensibilité des baies à cette maladie s'étend de la 8^{ème} à la 18^{ème} semaine après la floraison (Muller, 1980). Toutefois, ces études ne permettent qu'une description globale de la sensibilité des baies à l'échelle d'une localité car elles ne prennent pas en compte la diversité micro-environnementale pouvant exister au sein des parcelles. Tous les caféiers ne présentent pas de symptômes de CBD au début de l'épidémie. De plus, dans une plantation, le niveau de la maladie peut varier d'un caféier à un autre pour les mêmes dates d'observations. Il en est de même pour les branches à l'échelle d'un caféier. L'étude de la propagation spatio-temporelle de la maladie au sein de la plantation et à l'échelle de l'arbre pourrait permettre de déterminer les raisons d'une telle variabilité de l'expression de la maladie au sein des plantations. Cette étude peut également aider à identifier d'éventuels foyers d'infection et contribuer ainsi à la mise en place d'une approche plus raisonnée de la lutte contre le CBD.

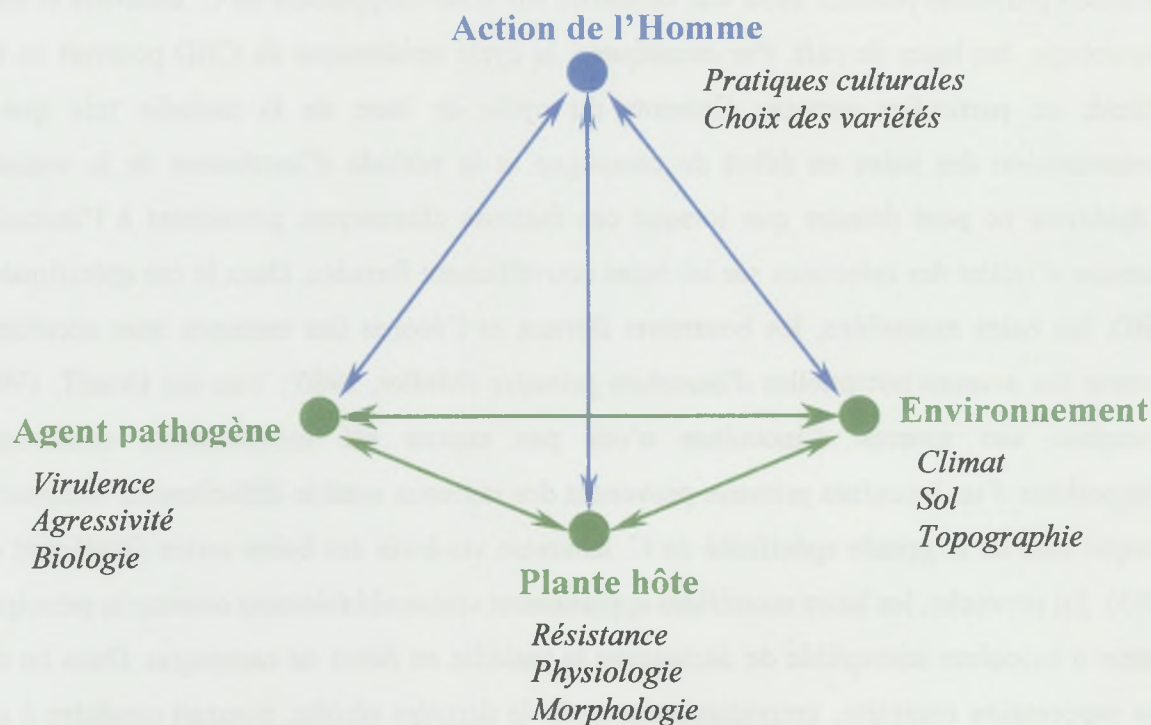


Figure 2.1. *Tétraèdre épidémiologique. La partie en vert représente l'interaction plante-parasite-environnement. La partie en bleu symbolise l'effet de l'action de l'homme sur le développement de la maladie. (Zadocks et Schein, 1979)*

Dans les petites exploitations familiales, le caféier est cultivé en association avec les cultures vivrières telles que le maïs, le macabo (*Xanthosoma spp.*), les bananiers, les pommes de terre, le haricot, etc... et/ou avec les arbres fruitiers comme le manguier, l'avocatier, le safoutier (*Dacryodes edulis*), l'aiélé ou "fruits noirs" (*Canarium schweinfurtii*), le kolatier, etc... Ces associations culturales peuvent créer des conditions micro-environnementales qui influent sur le développement de la maladie. Celles-ci pourraient constituer de bons indicateurs des préférences micro-climatiques de l'agent pathogène et leur identification pourrait permettre de définir des stratégies de lutte adaptées aux contraintes des paysans.

2.3. Objectifs et plan de la thèse

Ce travail porte essentiellement sur l'étude des interactions entre les éléments du système épidémiologique constitué par *Coffea arabica*, *Colletotrichum kahawae*, le climat et les pratiques culturales des caféiculteurs, suivant le principe du tétraèdre épidémiologique de Zadocks et Schein (1979) (figure 2.1). Le fonctionnement de ce système est étroitement lié aux facteurs physiques et biologiques qui déterminent le déroulement des épidémies de CBD. Nous nous proposons d'identifier ces facteurs à l'aide d'expérimentations spécifiques conduites pendant plusieurs années successives, dans différents agro-écosystèmes. En fonction de leurs objectifs, ces expérimentations seront regroupées en cinq chapitres principaux faisant suite à un premier chapitre portant sur la synthèse bibliographique et à un deuxième chapitre constitué par le présent exposé :

- a) Le chapitre 3 sera consacré à **la dynamique spatiale de l'anthracnose des baies à l'échelle de la parcelle**. Il a pour objectif de caractériser la progression temporelle des épidémies de CBD et d'identifier d'éventuels foyers d'infection de la maladie au sein des caféières. Au cours de la présente étude, nous effectuerons une description du développement spatio-temporel de la maladie qui nous permettra d'émettre quelques hypothèses sur la distribution de la maladie au sein de la parcelle.
- b) Le chapitre 4 traitera de **l'incidence des conditions micro-environnementales sur le développement de l'anthracnose des baies du caféier arabica**. Il permettra d'évaluer les pertes dues au CBD dans différentes conditions agro-écologiques et d'identifier les paramètres biotiques ou abiotiques pouvant avoir un effet sur le développement de cette maladie.

c) Le chapitre 5 traitera de l'**incidence des facteurs climatiques sur le développement du CBD**. Il a pour but de préciser l'importance de quelques déterminants climatiques sur l'expression de la maladie. Il permettra de déterminer les relations existant entre les températures journalières, les pluies et la sévérité de la maladie.

d) Le chapitre 6 sera consacré au **rôle spécifique de la pluie dans le développement du CBD**. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'expression de la maladie en l'absence de pluies et de déterminer l'importance de l'inoculum primaire sur le niveau d'infection des baies. La dispersion des conidies de l'agent pathogène sera également discutée dans ce chapitre. Son impact sur le niveau de contamination des baies sera évalué pendant deux cycles épidémiques successifs.

e) Le chapitre 7 sera dédié à l'**analyse de l'effet de l'ombrage sur le développement du CBD à l'aide d'un écran artificiel**. Cette étude permettra de déterminer l'impact spécifique de l'ombrage sur le niveau d'infection des baies au champ et sur leur sensibilité intrinsèque vis-à-vis du CBD, au cours du temps.

CHAPITRE 3 :

DYNAMIQUE SPATIALE DE L'ANTHRACNOSE DES BAIES À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

3.1. Introduction

Les conditions climatiques favorables au développement de *C. kahawae* sont surtout rencontrées dans des régions de hautes altitudes (> 1600 mètres) où les caféières subissent une forte pression infectieuse. A l'instar de la zone d'arabica culture du Cameroun, certaines de ces régions présentent un climat caractérisé par une saison sèche de 4 à 5 mois (Novembre – Mars) et une saison des pluies à régime monomodal, de 7 à 8 mois (Mars-Octobre). Ce climat particulier aux régions d'altitudes tropicales favorise une floraison synchrone des plants, déclenchée par les premiers épisodes pluvieux, en mi-Mars. Le développement des fruits se déroule sur une saison de 6 à 7 mois. Après la récolte en début de saison sèche, l'absence des baies pendant une période de cinq mois pose le problème de la conservation de l'inoculum et des modalités de démarrage des épidémies.

En l'absence de traitements phytosanitaires, les pertes due à *C. kahawae* peuvent atteindre 90% dans certaines plantations paysannes (Bieysse *et al.*, 2002). Trois principales voies sont explorées pour lutter contre cette maladie : la lutte génétique (Bouharmont, 1992), la lutte agronomique (irrigation précoce et récolte sanitaire) (Muller, 1980) et le contrôle chimique (Berry *et al.*, 1991). Ces différentes méthodes de contrôle pourraient cependant être utilisées plus efficacement dans le cadre d'une stratégie de lutte intégrée applicable par les producteurs de café arabica. Cependant, une telle approche exige au préalable, la connaissance des interactions hôte/parasite/environnement qui régissent le développement de la maladie. C'est ainsi qu'un suivi spatio-temporel de la maladie a été réalisé afin de mieux comprendre les modalités de développement de l'épidémie, dans une région d'altitude, où la pression de la maladie est forte. Cette étude a été conduite dans deux sites aux conditions agro-écologiques contrastées. Elle permet d'analyser la dynamique spatiale de la maladie au sein des parcelles et d'identifier le type de dispersion afin d'aider à optimiser les différentes méthodes de lutte.



Photo 3.1. *Baies infectées marquées lors des observations*



Photo 3.2. *Marquage des baies infectées lors des observations.*
(M. Victor LEKOMBOU)

3.2. Matériel et méthodes

3.2.1. Caractérisation des parcelles

Nos observations ont été conduites dans deux plantations paysannes, à Bafou (1820 mètres) et à Santa (1750 mètres), constituées de caféiers arabica de la variété *Jamaïque*, sensibles au CBD. Ces caféiers, disposés à des écartements de 3m x 2m50, ont subi chaque année une taille d'entretien dont le but est de supprimer les branches mortes, les « gourmands » et les baies momifiées. Ils ont été fertilisés après chaque nouaison avec un engrais minéral (N-P-K : 20-10-10) à une dose de 200 g/pied. Deux désherbages chimiques annuels ont été effectués dans chacune des plantations avec le Glyphosate (Round-Up 360) à une dose de 2,4l/ha. Dans chaque site, une parcelle homogène cultivée sans ombrage et sans association avec d'autres plantes a été choisie. Ces parcelles d'environ 1000m², étaient constituées de 58 caféiers à Santa, et de 67 à Bafou. Chaque caféier a été repéré dans l'espace par ses coordonnées et par un numéro d'identification. Les caféiers de Santa, âgés d'une cinquantaine d'années, ont été conduits en taille à tête écimée. Ils présentaient une architecture en forme de parapluie, la canopée formant un plateau. Par contre, les caféiers de Bafou, âgés d'une vingtaine d'années et conduits en taille unicaule, présentaient un port pyramidal. Cette étude a été menée sur les mêmes arbres pendant deux années successives : de 2003 à 2004 à Santa et de 2004 à 2005 à Bafou. Les baies du caféier apparaissent sur les rameaux de l'année où elles sont disposées en glomérules séparées par un entre-nœud de 3 à 4 centimètres. Leur cycle de développement, de la nouaison à la récolte, s'étend sur une période de 28 à 32 semaines.

3.2.2. Observations et évaluation des pertes dues à la maladie

Trois rameaux plagiotropes, disposés à la partie haute, médiane et basse des caféiers, ont été marqués dès la deuxième semaine après la nouaison, au stade "*tête d'épingle*". Les données suivantes ont été collectées pour chaque rameau : (i) – le nombre total de baies (ii) – le nombre de nouvelles baies malades et (iii) – le nombre d'anciennes baies malades. Chaque nouvelle baie malade était marquée par une étiquette afin d'éviter de la comptabiliser à nouveau les semaines suivantes (photo 3.1 et 3.2). Chaque année, ces observations ont systématiquement débuté à partir de la 6^{ème} semaine après la floraison pour s'achever vers la 25^{ème} semaine. Elles nous ont permis de calculer chaque semaine, le pourcentage cumulé de baies malades (**Pmal**) par arbre d'après la formule suivante :

$$P_{mal} = \frac{\sum_{n=25}^1 Nbm_n}{TotB_1} * 100$$

Où

$(\sum Nbm_n)$ = somme des nouvelles baies malades de la première à la $n^{ième}$ observation et
TotB₁ = nombre total de baies comptabilisées à la première observation.

3.2.3. Analyses statistiques

Le modèle linéaire général a été utilisé pour effectuer l'analyse de variance du taux de baies infectées afin de déterminer l'importance de la maladie en fonction des étages des caféiers, durant les deux années d'expérimentation. Chaque caféier est considéré comme une unité expérimentale ; le nombre de répétitions correspond ainsi au nombre d'individus identifiés dans la parcelle (58 à Santa et 67 à Bafou). Toutes les données ont été transformées en $\arcsin\sqrt{x}$ pour se conformer aux conditions d'application de l'analyse de la variance. Les cartes descriptives de la répartition spatiale de la maladie ont également été effectuées à partir des pourcentages cumulés de baies infectées.

Une recherche des meilleurs modèles de régressions non linéaires a été entreprise pour modéliser le développement de la maladie avec le temps. Le choix des modèles permettant le meilleur ajustement de la progression temporelle de la maladie a été effectué sur la base de la plus petite erreur standard (S) et du plus grand coefficient de détermination (R^2). Les régressions logistiques ont été définies par la formule : $Y=K/[1+B\exp(-rt)]$, avec Y représentant le pourcentage cumulé de baies infectées et t le nombre de semaines après la floraison. Les coefficients K , r et B indiquent respectivement l'asymptote (niveau maximal de la maladie), le taux d'accroissement et la constante du modèle (Madden et al., 2000). Le taux de variation du niveau d'infection Y au temps t est déterminé par la dérivée $Y'(t)=[rKB\exp(-rt)]/[(1+B\exp(-rt))^2]$ dans laquelle $B = (K-Y_0)/Y_0$, Y_0 étant le niveau initial d'infection (Madden et al., 2004). La vitesse maximale de la maladie et la durée de sa phase exponentielle ont été déterminées par les formules utilisées par Berry et Cilas (1994) pour modéliser la croissance des cabosses de cacaoyers : $Kr/4$ pour la vitesse maximale de progression de la maladie et $\ln(B)/r$ pour la durée de la phase exponentielle.

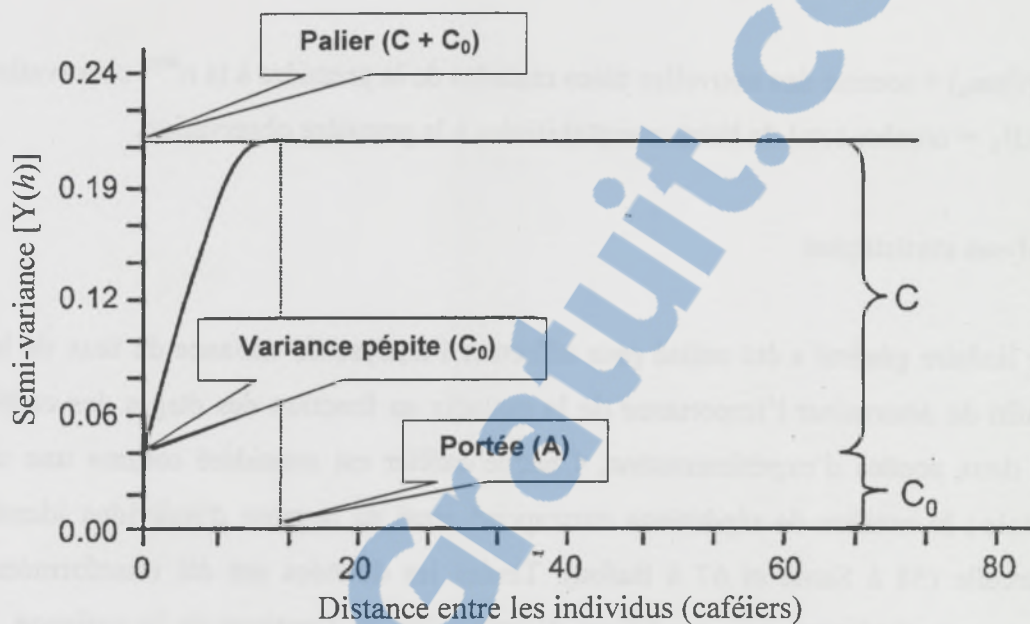


Figure 3.1. *Caractéristiques d'un variogramme*

Enfin, les corrélations spatiales entre les caféiers ont été déterminées par l'analyse des semi-variogrammes dont le principe est de mesurer la variabilité qui existe en moyenne entre les points z_i et z_{i+h} distants de h au sein d'une parcelle. Statistiquement, la semi-variance est une auto-corrélation définie par la fonction :

$$Y(h) = [1/2 N(h)] \sum [z_i - z_{i+h}]^2 \text{ (Anonyme, 2004)}$$

Où $Y(h)$, la semi-variance des plants distants de h est la moitié de la variance moyenne du pourcentage de baies infectées entre tous les couples N de caféiers distants de h . z_i est le pourcentage de baies infectées du plant situé au point i et z_{i+h} est celui du plant situé au point $i+h$. Les données ont été analysées suivant les modèles de semi-variogrammes isotropes afin de déterminer la dépendance spatiale multidirectionnelles entre les caféiers. Ces modèles pouvant présenter une forme sphérique, gaussienne ou exponentielle sont décrites par trois principaux paramètres (figure 3.1) : (i) la portée (A) qui est la distance limite à laquelle les caféiers sont spatialement dépendants, (ii) l'ordonnée à l'origine (C_0) ou variance « pépité » qui indique la discontinuité du variogramme à la distance zéro, et (iii) le palier ($C+C_0$) qui est l'asymptote du modèle. La somme des carrés résiduelles (RSS), le coefficient de détermination (R^2) et le rapport $C/(C_0+C)$ constituent les trois mesures statistiques qui permettent d'apprécier la validité et la précision des variogrammes (Anonyme, 2004). La RSS indique la précision du modèle par rapport au variogramme des données. Le modèle est d'autant plus précis que les sommes des carrés sont réduites. Le coefficient R^2 indique comment de modèle ajuste le variogramme des données. Mais, cette mesure ne permet pas d'évaluer le modèle de manière aussi précise et robuste que celle des sommes des carrés résiduelles. Le rapport $C/(C_0+C)$ mesure la proportion de la variance (C_0+C) de l'échantillon qui est expliquée par C , la variance structurée spatialement. Cette valeur sera égale à 1 pour des variogrammes ne présentant pas de variance « pépité », autrement dit, lorsque la courbe passe par l'origine. Elle sera égale à 0 lorsqu'il n'existe aucune dépendance spatiale entre les individus à une distance donnée.

Le *Krigeage* a été effectué afin de localiser les foyers d'infections dans la parcelle, chaque fois que les variogrammes indiquaient l'existence d'une corrélation spatiale entre les caféiers. Le *Krigeage* est une technique d'interpolation du poids des plus proches voisins dans la structure des agrégats à un point donné de la parcelle (Anonyme, 2004).

L'analyse de variances et les cartes descriptives de la répartition spatiale de la maladie ont été effectuées avec le logiciel **S.A.S** (Statistical Analysis System). Celle des régressions non linéaires a été réalisée à l'aide de **CURXPT** (Curve Expert). L'analyse des semi-variogrammes et les *krigeages* ont été effectués avec **GS⁺** (Geostatistics).

3.3. Résultats

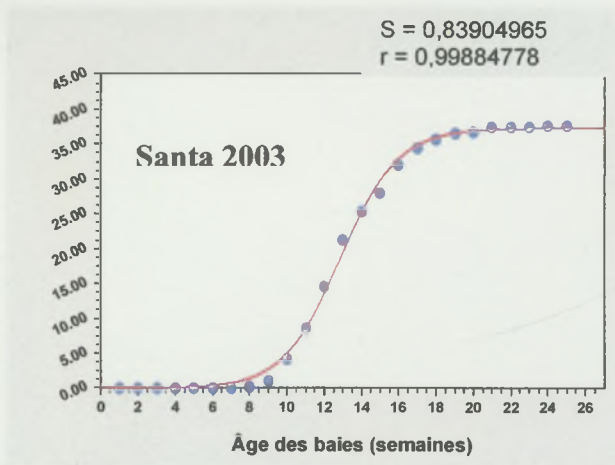
3.3.1. Incidence du CBD en fonction de la position des branches sur le caféier

A Santa, les dégâts occasionnés par l'antracnose des baies ont été évalués chaque année, à environ 40% de baies infectées (Figures 3.2). Par contre à Bafou, ce taux d'infection varie très significativement ($p < .0001$) d'une année à une autre. Il a été estimé à environ 30% de baies malades en 2004 et à 20% en 2005 (Figures 3.3). Nos résultats n'ont pas permis de déceler de différences entre les étages des caféiers à Santa (Tableau 3.1) ; en revanche, ils ont mis en évidence la présence d'une interaction significative entre les étages des caféiers et les années de production à Bafou. En 2004, le niveau d'infection le plus élevé a été observé sur les étages supérieurs des caféiers. Le taux de maladie a été constant sur toutes les branches en 2005 (Tableau 3.1).

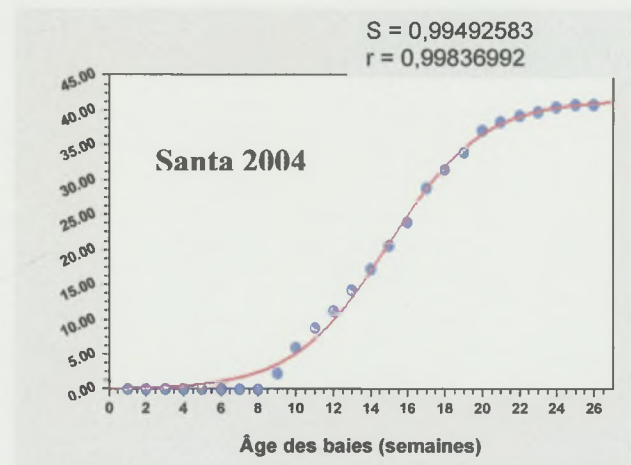
L'effectif initial de baies varie chaque année, quel que soit le site. Il était relativement élevé en 2004 dans les deux sites, avec une moyenne de 48 baies par branche à Bafou et de 66 baies à Santa. Le nombre initial de baies était peu élevé en 2003 à Santa et en 2005 à Bafou (Tableau 3.1).

Tableau 3.1. Effectif des baies en début de campagne et taux de maladie dans les deux sites, en fonction des étages des années d'observations.

Années	Branches	BAFOU		SANTA	
		Nombre total de baies	% de baies infectées	Nombre total de baies	% de baies infectées
2003	haute	-	-	29,30 a	43,04 a
	médiane			32,51 a	35,87 a
	basse			29,19 a	33,21 a
2004	haute	50,14 a	33,71 a	71,35 b	42,46 a
	médiane	48,09 a	27,32 b	64,31 b	38,95 a
	basse	47,33 a	22,88 b	27,19 c	37,28 a
2005	haute	26,07 b	15,24 c	-	-
	médiane	23,61 b	19,72 c		
	basse	18,93 b	17,65 c		

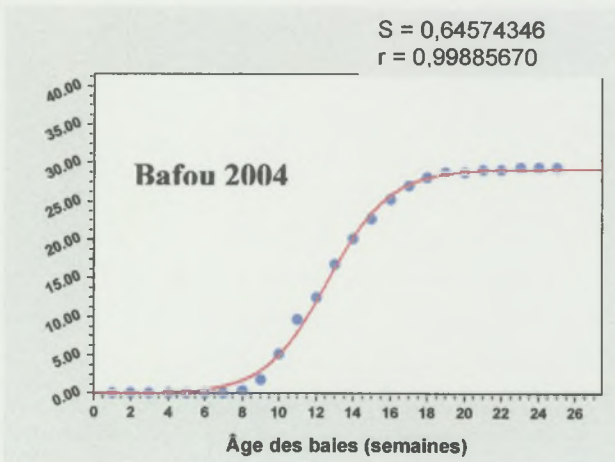


a) - 2003

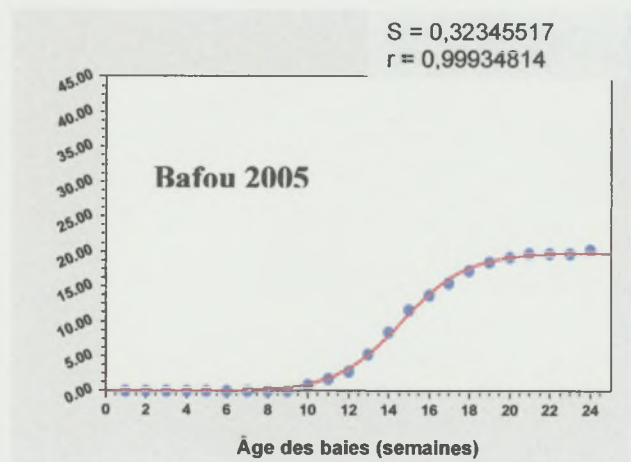


b) - 2004

Figures 3.2. Courbes d'ajustements logistiques de la progression temporelle du CBD à SANTA
(axe y = % baies infectées ; • = courbe réelle, — courbe théorique)



a) - 2004



b) - 2005

Figures 3.3. Courbes d'ajustements logistiques de la progression temporelle du CBD à BAFOU
(axe y = % baies infectées ; • = courbe réelle, — courbe théorique)

3.3.2. Dynamique spatio-temporelle de la maladie

3.3.2.1. Dynamique temporelle

Les meilleurs ajustements de la progression temporelle de la maladie ont été obtenus avec le modèle logistique. A Santa, l'infection a rapidement progressé entre la 10^{ème} et 20^{ème} semaine après la floraison (Figures 3.2 a et b). La vitesse maximale de cette progression est estimée à environ 6% de nouvelles baies malades par semaine en 2003 et à 5% en 2004 (Tableau 3.2). Celle-ci a été plus lente à Bafou où nous avons enregistré des vitesses maximales de l'ordre de 4% en 2004 et 3% en 2005.

Tableau 3.2. Caractéristiques des épidémies de CBD observées dans les deux sites

Sites	années	Paramètres du modèle logistique			Pentes ¹ (%)	Durée ² (semaines)
		<i>K</i>	<i>B</i>	<i>r</i>		
SANTA	2003	37,32	4050,02	0,65	6,03	13
	2004	41,56	351,39	0,39	4,81	15
BAFOU	2004	29,22	1805,58	0,60	4,35	13
	2005	19,88	372,49	0,61	3,06	10

¹ pentes au point d'inflexion ; ² durée de la phase exponentielle

La durée de la phase exponentielle de la maladie a été estimée à 13 et 15 semaines à Santa ; elle varie entre 10 et 13 semaines à Bafou (tableau 3.3). Le pourcentage cumulé de baies infectées pendant la phase asymptotique de la maladie est plus important et plus stable à Santa qu'à Bafou, quelle que soit l'année considérée. A Santa, cette période de stabilisation de la maladie a été observée vers la 20^{ème} semaine en 2003 et vers la 25^{ème} semaine en 2004, (Figures 3.2 a et b). A Bafou, elle est survenue vers la 20^{ème} semaine pour les deux années (Figures 3.3 a et b).

3.3.2.2 – Dynamique spatiale aux différentes étapes de l'épidémie.

Au démarrage de l'épidémie, les symptômes ont été observés sur des caféiers isolés ou disposés en petits groupes à certains endroits de la parcelle (figures 3.4 a et b). A Santa,

l'infection a débuté pendant deux années successives, aux mêmes endroits de la parcelle
(figures 3.5 a et b).

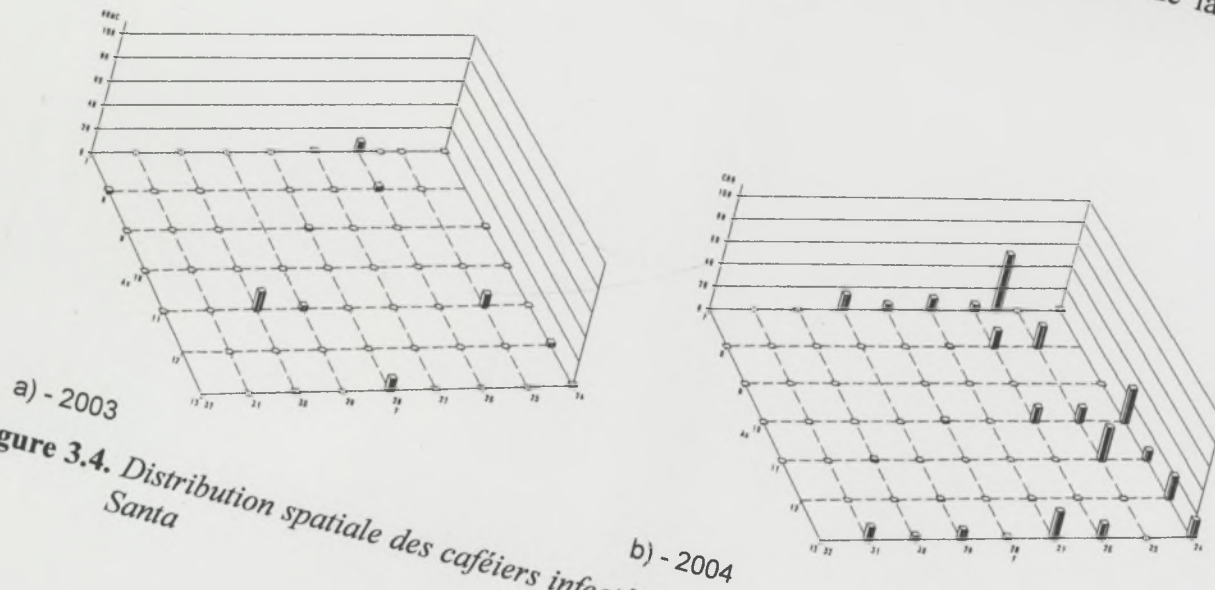


Figure 3.4. Distribution spatiale des caféiers infectés à la 10^{ème} semaine après la floraison à Santa

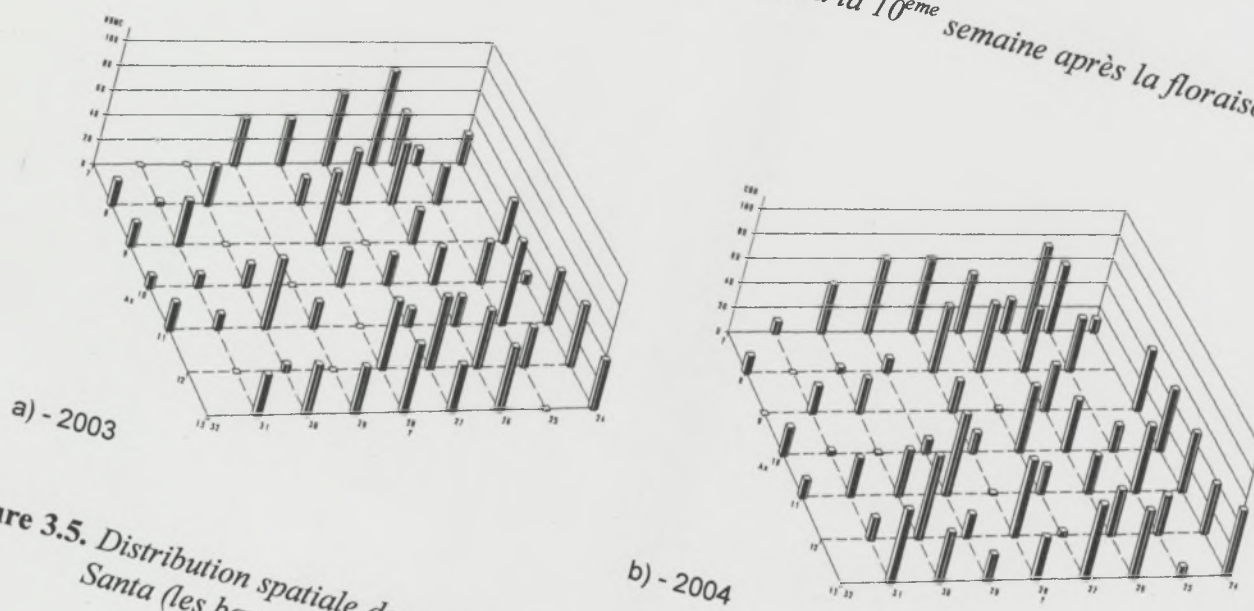


Figure 3.5. Distribution spatiale des caféiers infectés à la 20^{ème} semaine après la floraison à Santa (les barres représentent le pourcentage cumulé des baies infectées)

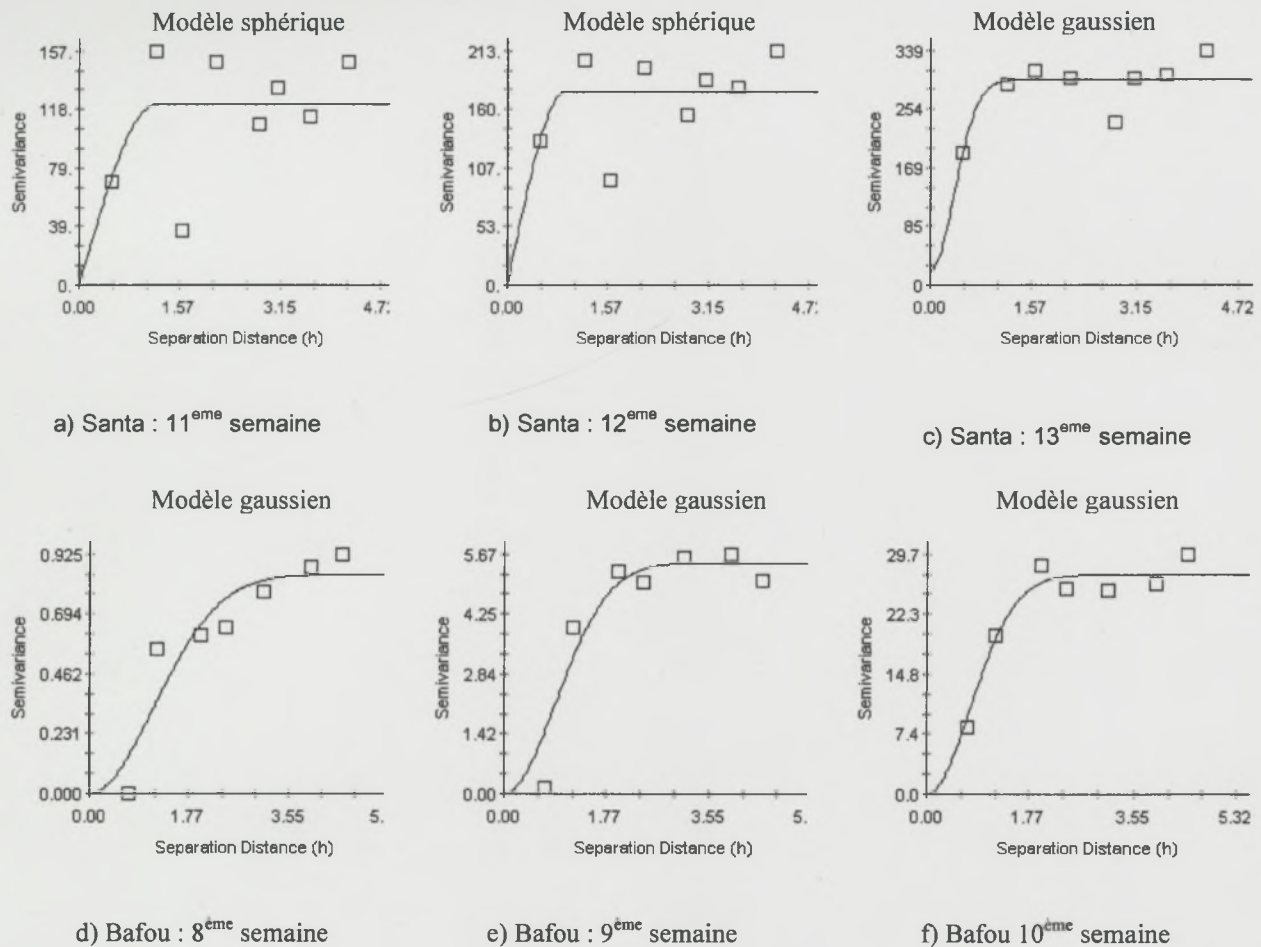


Figure 3.6. Semi-variogrammes ayant indiqué les corrélations spatiales lors de la première année d'expérimentation (2003 à Santa et 2004 à Bafou).

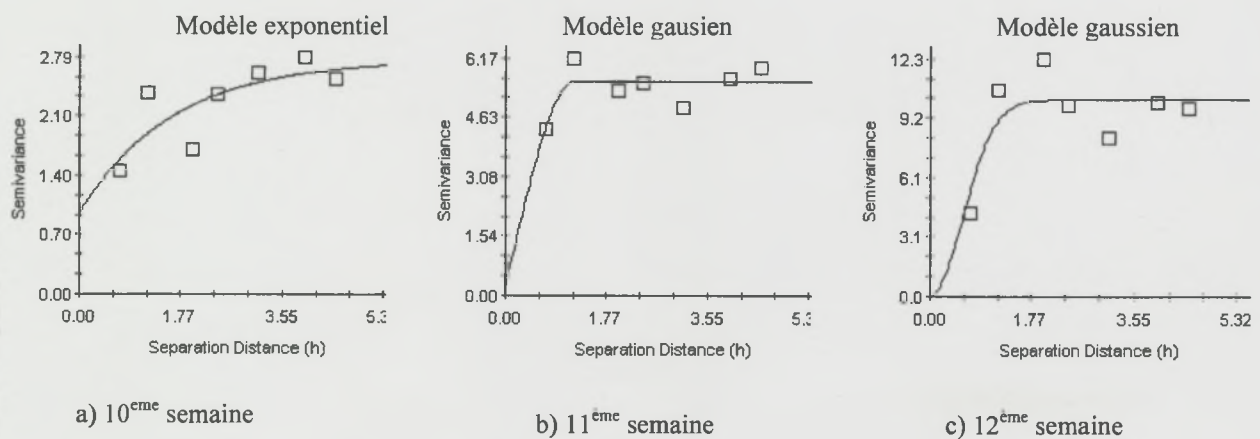


Figure 3.7. Semi-variogrammes obtenus à la deuxième année d'expérimentation (2005) à Bafou. (l'allure des courbes suivantes est similaire à celle de la 12^{ème} semaine)

Les semi-variogrammes obtenus à l'issue de nos analyses sont de type isotrope. Ils montrent ainsi que le CBD ne s'est pas développé suivant une direction privilégiée. Lors de la première année d'observations (2003 à Santa et 2004 à Bafou), ils ont permis la mise en évidence d'un « effet pépité pur » au démarrage de la maladie et au delà de la 10^{ème} à Bafou et de la 13^{ème} semaine à Santa. Cet effet indique qu'il n'existe aucune dépendance spatiale entre les caféiers aux dates considérées, quelle que soit la distance qui les sépare. Ils sont spatialement corrélés de la 8^{ème} à la 10^{ème} semaine à Bafou et de la 11^{ème} à la 13^{ème} semaine à Santa, ce qui est une indication de la progression en foyers de l'infection à ce stade de développement des baies. Dans les deux sites, la portée diminue avec le temps et le pallier augmente. A Santa, la portée des variogrammes a été estimée entre 2,64 mètres et 3,6 mètres, signifiant ainsi que les corrélations spatiales peuvent seulement être observées entre les voisins immédiats (caféiers adjacents). A Bafou, les variogrammes ont présenté des portées plus longues dont la plus importante a été estimée à 8,37 mètres. De plus, les semi-variogrammes sont de forme sphérique à Santa (figures 3.6 a, b et c) et gaussienne à Bafou (figures 3.6 d, e et f). Ces courbes confirment que la propagation du CBD se fait de proche en proche à Santa et qu'elle peut en revanche s'étendre sur des caféiers distants de plus de deux unités à Bafou.

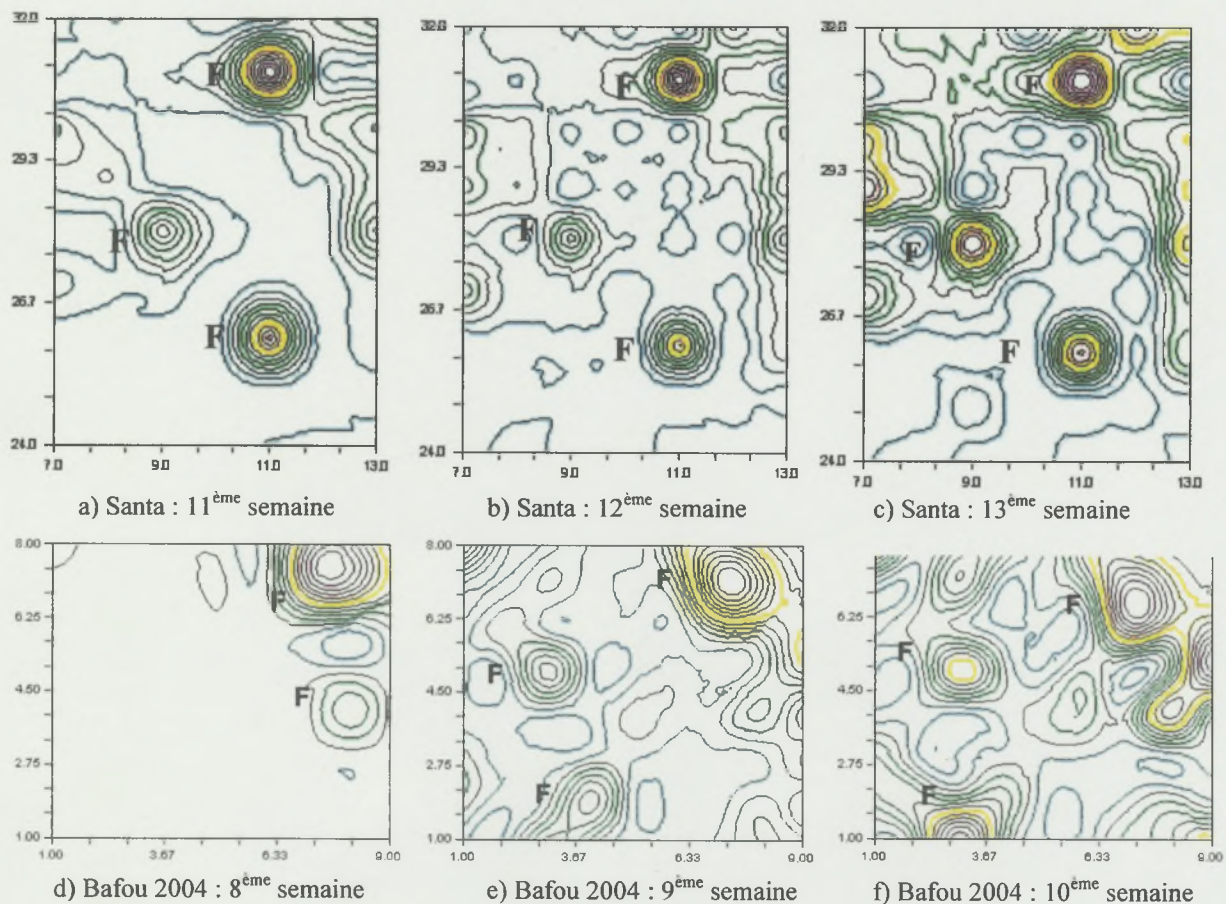


Figure 3.8. Cartes de dispersion focale du CBD dans les deux sites lors de la première année d'expérimentation (2003 à Santa et 2004 à Bafou) (F = présence d'un foyer d'infection)

Les cartes obtenues par *krigeage* (figures 3.8) nous ont permis d'identifier les différents foyers d'infection révélés par ces semi-variogrammes. Toutefois, l'analyse des données obtenues à Santa a révélé d'importantes erreurs résiduelles (RSS) et de faibles coefficients de détermination (R^2). A l'inverse, elle a mis en évidence de très faibles erreurs résiduelles et des coefficients de détermination élevés ($R^2 > 0,80$) à Bafou (Tableau 3.3).

Tableau 3.3. Caractéristiques des semi-variogrammes obtenus à Santa (2003 et 2004) et à Bafou (2004 et 2005)

Sites	Années	Age des baies (sem)	Portée (A)	Pallier (C_0+C)	$C/(C_0+C)$	RSS	R^2	Modèle
Santa	2003	06 à 08	-	-	-	-	-	Pas de baies infectées
		09 à 10	-	-	0	-	-	Effet pépité pur
		11	3,60	121,1	0,999	10447	0,18	Sphérique
		12	2,73	176,0	0,999	9658	0,16	Sphérique
		13	2,64	296,3	0,934	5943	0,62	Gaussien
		14 à 26	-	-	0	-	-	Effet pépité pur
	2004	06 à 08	-	-	-	-	-	Pas de baies infectées
		09 à 26	-	-	0	-	0,43	Effet pépité pur
Bafou	2004	06 à 07	-	-	-	-	-	Pas de baies infectées
		08	8,37	0,944	0,999	0,11	0,84	Gaussien
		09	6,69	5,876	0,998	2,63	0,92	Gaussien
		10	5,55	27,24	1	21,9	0,93	Gaussien
		11 à 25	-	-	0	-	0,80	Effet pépité pur
	2005	06 à 09	-	-	-	-	-	Pas de baies infectées
		10	11,97	2,59	0,624	0,62	0,54	Exponentiel
		11	4,35	5,674	0,998	2,08	0,81	Gaussien
		12 à 24	3,57	10,91	0,999	-	0,80	Gaussien

Au cours de la deuxième année d'expérimentation (2004 à Santa et 2005 à Bafou), les foyers d'infection n'ont pas été mis en évidence à Santa, contrairement à Bafou où ils ont été observés de la 10^{ème} à la 24^{ème} semaine. Toutefois les foyers obtenus à Bafou en 2005 sont tributaires d'un biais expérimental engendré par une dizaine de caféiers qui étaient dépourvus

de baies. Dans ce site, le semi-variogramme a présenté une grande diversité morphologique au cours du temps. Il a été de forme exponentielle à la 10^{ème} semaine, avec une forte discontinuité à l'origine (figure 3.7a), suggérant ainsi l'existence d'une importante irrégularité du niveau des infections au moment de l'apparition des premiers symptômes. Il est gaussien entre la 11^{ème} et la 24^{ème} semaine (figure 3.7b et c). Les foyers d'infection observés sont indiqués dans les cartes des figure 3.9 a, b et c. Sur les deux années successives d'observations, un foyer situé au même emplacement est détecté sur le site de Bafou.

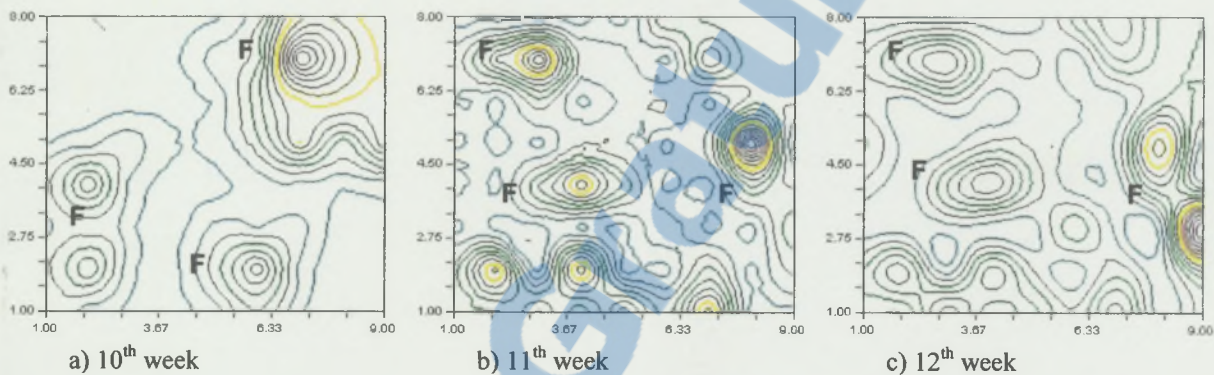


Figure 3.9. Cartes de dispersion focale du CBD à la deuxième année d'expérimentation (2005) à Bafou (**F** = présence d'un foyer d'infection)

3.4. Discussion

Dans les deux sites, les meilleurs ajustements de la progression temporelle du CBD ont été obtenus avec le modèle logistique ($r \approx 0,998$). Les régressions logistiques sont très indiquées pour modéliser l'évolution temporelle des épidémies polycycliques au cours desquelles l'inoculum secondaire favorise un développement exponentiel de la maladie. Elles conviennent surtout aux pathosystèmes dans lesquels les nouveaux organes sains sont progressivement contaminés pendant leur croissance, jusqu'à la période de leur moindre réceptivité face aux agressions de l'agent pathogène (Rapilly, 1991 ; Sache, 2003 ; Zadocks, 1979). Ce modèle a été utilisé pour expliquer l'évolution temporelle de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer due à *Phytophthora megakarya* (Berry et Cilas, 1994). Parfois, la progression des épidémies peut être mieux ajustée par les paramètres physiologiques des organes hôtes. C'est le cas des ajustements logistiques des épidémies de l'oïdium du pêcher, due à *Podosphaera leucotricha* (Ellis & Everh.) E. S. Salmon, obtenus à partir des paramètres de croissance des fruits (Furman *et al.*, 2003). A Santa, la vitesse maximale de la progression de la maladie varie chaque année, probablement en raison des variations climatiques, de la pression infectieuse de l'agent pathogène et de la réceptivité des fruits pendant leur croissance. Mais le niveau final d'infection reste sensiblement le même pendant les deux années. Les paramètres du modèle (K , B et r) varient en fonction des sites et des années (tableau 3.2). Ils confirmeraient ainsi l'hypothèse d'une grande influence des fluctuations des paramètres climatiques (pluies, températures, vent, etc.), essentiellement aléatoires, sur la progression temporelle du CBD.

Diverses méthodes d'analyses spatiales ont été utilisées par de nombreux auteurs pour étudier la régionalisation des maladies au sein des parcelles (Cilas et Lecoustre ; 1988 ; Van de Lande et Zadocks, 1999 ; Van Leewen *et al.*, 2000 ; Charest *et al.*, 2002 ; Ndoumbè Nkeng, 2002 ; Turecheck et Madden, 2003 ; Van Maanen et Xu, 2003). Ces méthodes varient suivant les pathosystèmes ; cependant, elles ont toutes pour principe de déterminer les corrélations spatiales pouvant exister entre les plants au sein de la parcelle (Anonyme, 2004 ; Van Maanen et Xu, 2003). L'étude des semi-variogrammes effectuée à l'aide d'analyses géostatistiques nous a permis d'identifier les foyers d'infection de l'antracnose des baies du caféier arabica. Sache (2003) définit le foyer comme « le premier point d'inoculation caractérisé par une quantité de maladie très supérieure à celle observée sur les plantes environnantes ». Ces foyers ont été observés dans les deux sites, à la première année d'observations (2003 à Santa

et 2004 à Bafou). Ils sont apparus une à deux semaines après les premiers symptômes et se sont estompés pendant la phase exponentielle de la maladie, précisément au moment de sa progression maximale. Pendant la deuxième année d'expérimentation les foyers d'infection n'ont pas été observés à Santa, contrairement à Bafou où ils ont persisté du démarrage de la maladie jusqu'à la fin des observations. Ces résultats traduisent le caractère non permanent des foyers d'infection du CBD d'une année à l'autre dans les parcelles étudiées. Dans le cas des maladies disséminées sur des grandes distances comme les rouilles (Avelino *et al.*, 2004 ; Muller, 1980), les foyers peuvent être dus à un allo-inoculum. Dans le cas des maladies de plantes annuelles, les foyers peuvent survenir à partir des résidus de récolte contaminés par l'agent pathogène. Dans le cas des maladies à faible dispersion comme les antracnoses, en particulier sur les plantes pérennes, les foyers primaires d'infections ne sont généralement pas dus à un allo-inoculum. L'émergence de la maladie est due à un inoculum primaire conservé sur la parcelle, soit dans les tissus d'organes apparemment sains, soit sur les tissus d'organes morts tels que les feuilles et les branches mortes ou les fruits momifiés. Tous les foyers révélés par les semi-variogrammes ont été localisés de façon précise dans les parcelles à l'aide des *krigeages* (Figures 3.8 et 3.9). Ils peuvent soit provenir d'une distribution hétérogène de l'inoculum initial dans la parcelle, soit apparaître à la suite des conditions microclimatiques hautement favorables dans des zones privilégiées des parcelles. Il est possible, pour diverses raisons, que ces microclimats surviennent préférentiellement pendant plusieurs années dans certaines parties des parcelles. Dans ce cas, ils entraîneraient l'apparition répétitive des foyers d'infection aux mêmes endroits des caféières tel que observé pendant les deux années d'expérimentation à Bafou. Après la récolte, lorsque les baies ne sont plus présentes sur les caféiers, l'agent pathogène se maintient dans les tissus non concernés par l'infection (Gibbs, 1969 ; Muller, 1980). Au début de la campagne suivante, ces tissus constituent des sources potentielles d'auto-inoculum susceptibles d'occasionner de nouvelles infections sur chaque plant de la parcelle. La progression en foyers de la maladie serait ainsi le fait de l'effet conjugué, au sein d'un microclimat particulier de la parcelle, de l'auto-contamination des plants et de la dispersion latérale des conidies issues des infections préexistantes. Les foyers d'infection s'estompent rapidement car sur les plantes ligneuses, la dissémination des maladies à faible dispersion est plus rapide à l'échelle de l'arbre qu'au sein de la parcelle. Cette observation a été faite dans le cas des infections de *Monilinia fructigena* (Aderh.& Ruhl.) Honey sur le pommier (Van Leeuwen *et al.*, 2000) ou de celles de *Phytophthora megakarya* sur le cacaoyer (Ndoumbè Nkeng, 2002).

L'isotropie des semi-variogrammes obtenus dans notre étude montre que les foyers d'infection du CBD n'apparaissent pas suivant une direction privilégiée au sein des parcelles. Ce résultat indique le caractère aléatoire de la dissémination de cette maladie. Les semi-variogrammes sphériques observés à Santa nous ont montré que la contamination se faisait entre caféiers proches au sein de la parcelle ; ce qui restreignait les foyers d'infection à un petit nombre de plants. Par contre, ceux de forme gaussienne obtenus majoritairement à Bafou ont révélé des corrélations spatiales entre les caféiers distants de plus de deux unités. Cet intervalle correspondant concrètement à une distance comprise entre 6 et 9 mètres entre les arbres, est une indication que les foyers de ce site s'étendaient à un plus grand nombre d'individus par rapport à ceux observés à Santa. Au vue des foyers principaux obtenus en 2004 à Bafou (Figures 3.8 d, e et f), la progression spatiale de la maladie peut être estimée à une unité par semaine, ce qui correspond à environ 2,50 ou 3 mètres par semaine.

Dans plusieurs pays où la maladie est présente, il a été signalé que la sévérité de l'infection augmente en fonction de l'altitude, le CBD étant favorisé par les températures fraîches (Griffiths et Waller, 1971 ; Muller, 1980 ; Phiri *et al.*, 2001). Toutefois dans notre étude, le développement de la maladie est moins important dans le site situé à l'altitude la plus élevée. Il est probable que cette variation de sévérité provienne d'une pluviométrie différente d'un site à l'autre. En effet, dans les pathosystèmes où la propagation de l'agent pathogène survient majoritairement par le phénomène de *splashing*, l'intensité de la pluie provoque une bonne dispersion de l'inoculum sur la plante hôte : c'est le cas de *Botryosphaeria dothidea* sur le pistachier (Ahimera *et al.*, 2004). A Santa, le niveau d'infection est homogène sur toutes les branches des caféiers, quelle que soit l'année d'observations. Au contraire à Bafou, en 2004, les branches des caféiers ont été attaquées suivant un gradient de sévérité ascendant. Les conidies sont généralement dispersées du haut vers le bas des arbres (Agostini *et al.*, 1993 ; Waller, 1972) parce qu'elles sont transportées par gravité par les gouttes d'eau. La maladie aurait donc due être plus importante sur les branches basses des caféiers comme dans le cas des Citrus où la sévérité des infections liées à *C. gloeosporioides* évolue suivant un gradient descendant (Agostini *et al.*, 1993). Mais, il est probable que la dissémination de *C. kahawae* par la pluie soit peu efficace sur les baies des étages inférieurs en raison d'un possible effet barrière des branches de la canopée. Par ailleurs, l'infection étant plus sévère sur les fruits des branches hautes par rapport à celles des étages inférieurs, il apparaît évident que les caféiers en forme de parapluie de Santa, dont la majeure partie des cerises est concentrée vers la canopée, soient plus attaqués par le CBD que ceux de Bafou. Le rôle de l'architecture des

caféiers sur le développement du CBD est mal connu. Une telle étude nous semble nécessaire pour évaluer la distribution spatiale de la maladie à l'échelle du caféier et pour préciser l'impact spécifique des pluies sur cette distribution.

En conclusion, la progression spatiale du CBD se fait à partir des foyers d'infection dont l'étendue et la régularité dépendent de facteurs encore mal connus. Ces foyers apparaissent une ou deux semaines après le début de la maladie et s'estompent lors de la phase exponentielle de la maladie, peu avant le changement de concavité de la courbe. Ces résultats suggèrent que les suivis épidémiologiques du CBD ciblés sur les foyers récurrents peuvent fournir d'importantes informations sur la survie de l'agent pathogène, ce qui permettrait d'améliorer les méthodes de lutte contre cette maladie. Toutefois, cela nécessiterait au préalable, une identification précoce de ces foyers. De plus, les courbes de progression de l'épidémie montrent que les fruits devraient être protégés contre le CBD avant la 8^{ème} semaine après la floraison.

CHAPITRE 4 :

INCIDENCE DES CONDITIONS MICRO-ENVIRONNEMENTALES SUR LE DÉVELOPPEMENT DE LA MALADIE

4.1. Introduction

Les techniques agricoles mises en œuvre dans tous les systèmes de culture visent à optimiser les conditions de développement des plantes cultivées, à favoriser l'expression de leur potentiel de production et à limiter la pression des parasites. Certaines pratiques culturales (rotations culturales, gestion des résidus de récolte, choix des dates de semis) sont préconisées contre certaines maladies des céréales comme la cercosporiose du maïs due à *Cercospora zea-maydis* (Bathia et Munkvold, 2002) ou contre celles de cultures maraîchères comme la rouille blanche des épinards due à *Albugo occidentalis* Wilson (Sullivan *et al.*, 2002). La taille est une opération agricole couramment pratiquée dans la culture des plantes pérennes. Elle permet le modelage de l'architecture des arbres, le renouvellement de leur appareil assimilateur et la stimulation des nouveaux organes reproducteurs. Elle est aussi recommandée pour le contrôle de nombreuses maladies telles que celles dues à *Venturia inaequalis* sur pommiers (Holb, 2005), *Fusicoccum sp.* (anamorphe de *Botryosphaeria dothidea*) sur pistachiers (Mila *et al.*, 2005), *Erwinia amylovora* sur poiriers (Shtienberg *et al.*, 2003) ou *Guignardia bidwellii* sur vignes (Hoffman *et al.*, 2004). Sur le caféier, la taille est diversement appliquée dans les petites plantations familiales de la région des hauts plateaux de l'Ouest Cameroun. Elle est généralement effectuée pendant l'inter-campagne, qui correspond à la période de saison sèche. De plus, elle est parfois mise en œuvre concomitamment avec d'autres pratiques culturales telles que l'association avec des plantes fruitières (manguiers, goyaviers, kolatiers, bananiers, etc.) et la culture intercalaire de plantes vivrières basses (haricot, pommes de terre, maïs, etc). Ces différentes pratiques agricoles modifient les conditions micro-environnementales et peuvent avoir une incidence sur la croissance et la dispersion de *C. kahawae*. La présente étude a pour objectif de déterminer l'effet de ces pratiques agricoles sur le développement du CBD et de préciser l'importance des facteurs comme l'ombrage sur les pertes dues à cette maladie. Elle a été conduite pendant quatre années successives, de 2002 à 2005, dans une plantation paysanne située dans une région de forte incidence du CBD au Cameroun.

4.2. Matériel et méthodes

4.2.1. Matériel végétal

Les parcelles expérimentales sont situées dans une plantation paysanne du Nord-Ouest du Cameroun à Santa (1750 m), une localité située dans une région de forte incidence de CBD. Cette plantation était constituée des plants de *Coffea arabica* var. Jamaïque, très sensibles à la maladie et conduits en tige unique écimée. Elle était divisée en deux parcelles dont l'une était conduite suivant un itinéraire technique intensif et l'autre suivant un itinéraire technique traditionnel. Chaque parcelle était constituée d'environ 100 caféiers vigoureux et productifs dont 50 étaient situés sous l'ombrage d'arbres fruitiers divers (manguiers, avocatiers, kolatiers) et les 50 autres en plein soleil.

La conduite des caféiers suivant l'itinéraire technique intensif nécessitait chaque année, les principales opérations agricoles suivantes : (1) une taille d'entretien qui consistait à supprimer les branches mortes et les baies momifiées en fin de campagne, (2) deux applications d'engrais minéral (N-P-K : 20-10-10) à une dose de 200g/pied ; la première application était effectuée après la nouaison et la deuxième en mi-campagne (3) deux désherbages chimiques par la pulvérisation du Glyphosate (Round-Up 360) à une dose de 2,4 l/ha. Les caféiers de cette parcelle n'ont pas été associés aux cultures vivrières pendant toute la durée de l'expérimentation. L'itinéraire technique traditionnel variait en fonction de la culture vivrière associée aux caféiers (haricot ou pommes de terre). Il était en général caractérisé par deux désherbages manuels effectués lors du sarclage et du buttage de la culture associée et par une fertilisation organique irrégulière et hétérogène. Cette fertilisation a consisté en un apport de déchets domestiques et de fumure d'animaux d'élevage (porcs et volailles) dans les parcelles. Toutefois, une légère fertilisation minérale (N-P-K : 20-10-10) était effectuée lorsque les pommes de terre constituaient la culture associée. Chaque caféier était repéré par un numéro d'identification spécifique pendant les quatre années successives d'observations.

Trois rameaux plagiotropes ont été marqués à la partie haute, médiane et basse de chacun de ces caféiers, dès que les fruits ont atteints le stade « tête d'épingle », précisément à la 6^{ème} semaine après la floraison. Afin de mesurer la cinétique de la maladie sur le rameau, la partie feuillée de chaque rameau a été distinguée de celle dépourvue de feuilles pendant les deux dernières années d'expérimentation (2004 et 2005).

4.2.2. Dispositif expérimental et observations

Deux principaux facteurs ont été pris en compte : le mode de conduite des caféières (intensif et traditionnel) et le type d'éclaircissement des caféiers (ombre et soleil). L'étude de ces facteurs a été conduite suivant un dispositif complètement randomisé de 50 répétitions dans lequel la parcelle expérimentale est représentée par un seul caféier. Les observations hebdomadaires ont été effectuées sur trois rameaux à différents étages de chaque caféier (haut, médian et bas). A partir de la troisième année d'expérimentation, ces observations ont été réalisées en différenciant la zone feuillée de chaque rameau de la zone non feuillée. Toutes les observations ont été effectuées à partir de la 6^{ème} semaine après la floraison jusqu'à la 25^{ème} semaine. Elles ont consisté au comptage : (a) du nombre total de baies (**Btot**), (b) du nombre de nouvelles baies infectées (**Bmal**), marquées par de petites étiquettes, (c) du nombre de baies anciennement infectées (**Bmarq**).

4.2.3. Evaluation des pertes et analyses statistiques

Pour chaque caféier étudié, les différentes pertes de récolte ont été estimées par :

a) le pourcentage des pertes totales (**Ptot**) qui exprime l'ensemble des pertes dues au CBD ou non, enregistrées au cours d'une année. Il est calculé par la formule :

$$P_{tot} = \frac{B_{tot_1} - (B_{tot_n} - B_{maq_n} - B_{mal_n})}{B_{tot_1}} * 100$$

Où

Btot₁ désigne nombre total des baies à la première observation et l'expression (**Btot_n - Bmaq_n - Bmal_n**) le nombre de baies saines à la dernière semaine d'observations. Les termes **Btot_n**, **Bmaq_n** et **Bmal_n** représentent respectivement le nombre total de baies, le nombre total d'anciennes baies malades et le nombre total de nouvelles baies infectées, à la dernière observation.

b) le pourcentage de baies malades (**Pmal**) qui est le rapport entre la somme des nouvelles baies malades comptabilisées pendant toutes les semaines d'observations ($\sum \mathbf{Bmal}_{1-n}$) et le nombre initial de baies (**Btot₁**).

$$\mathbf{Pmal} = \frac{\sum \mathbf{Bmal}_{1-n}}{\mathbf{Btot}_1} * 100$$

c) Le pourcentage des pertes non dues au CBD (**Pchutes**) qui est exprimé par la différence entre les pertes totales et les pertes dues au CBD (**Ppert-Pmal**). Ces pertes étant principalement dues aux chutes de baies apparemment saines seront considérées comme des « chutes physiologiques ».

Le pourcentage de baies malades et le pourcentage de chutes physiologiques ont été transformés en $\arcsin \sqrt{x}$ afin de se conformer aux conditions d'application de l'analyse de la variance. L'analyse de variance a été effectuée avec la procédure **GLM** (General Linear Model) de la version 9.1 du logiciel **S.A.S** (Statistical Analysis System) et la comparaison des moyennes entre les facteurs étudiés a été effectuée avec le test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5%.

4.3. Résultats

Tableau 4.1. Analyses de la variance des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction des pratiques culturales (2002 – 2005).

Source	DF	Pertes dues au CBD		Chutes physiologiques	
		Test F	Pr > F	Test F	Pr > F
Années	3	24,73	<0,0001	9,05	<0,0001
Etages des caféiers	2	1,14	0,3211	1,64	0,1935
Itinéraires techniques	1	60,82	<0,0001	1,19	0,2764
Ombrage	1	134,20	<0,0001	79,64	<0,0001
Ombrage x Itinéraires tech.	1	0,76	0,3831	0,45	0,5005
Année x Itinéraires tech.	3	2,84	0,0364	23,53	<0,0001
Année x Ombrage	3	15,76	<0,0001	16,45	<0,0001
Erreur	2175	-	-	-	-

4.3.1. Evaluation des pertes annuelles de récoltes

Les pertes dues à l'anthracnose et celles dues aux chutes physiologiques des fruits varient de façon hautement significative ($P < 0,0001$) d'une année d'observations à l'autre (tableau 4.1). La maladie a été très sévère pendant l'année 2005 avec plus de 50% de baies infectées en moyenne, contre 40% environ en 2002 et 45% en 2003. Le niveau d'infection le moins élevé a été obtenu en 2004 avec environ 35% de baies malades (tableau 4.2). Mais la proportion des baies attaquées par le CBD est toujours plus élevée que celle des chutes physiologiques, quelle que soit l'année d'observations (tableau 4.3). Quelques soient les années, les pertes dues aux chutes physiologiques de fruits sont toujours inférieures aux pertes dues au CBD. Elles ont progressivement diminué au cours des quatre années d'expérimentation. Le taux de chutes physiologiques le plus élevé, estimé à plus de 30% de baies, a été observé à la première année d'expérimentation (2002). Ces chutes ont légèrement régressé au cours des trois années suivantes. Le taux de chutes physiologiques le plus bas d'environ 25% de baies a été enregistré à la dernière année d'expérimentation (2005).

Tableau 4.2. Pertes annuelles dues au CBD et aux chutes physiologiques

Années	Nbre de branches observées	% Pertes dues au CBD	% Pertes dues aux chutes physio.
2002	600	40,12 c	34,67 a
2003	435	44,08 b	31,81 b
2004	575	36,46 d	29,04 c
2005	443	53,55 a	25,46 d

4.3.2. Impact des itinéraires techniques sur le niveau d'infection du CBD

Tableau 4.3. Moyennes des différentes pertes annuelles en fonction des itinéraires techniques

Années	Itinéraires techniques	Nbre de branches observées	% Pertes dues au CBD	% Pertes dues aux chutes physio.
2002	Traditionnel	300	43,92 a	37,12 a
	intensif	300	36,31 b	32,22 b
2003	Traditionnel	215	50,62 a	28,22 b
	Intensif	220	37,69 b	35,32 a
2004	Traditionnel	300	39,58 a	24,75 b
	Intensif	275	33,06 b	33,71 a
2005	Traditionnel	277	51,57 a	25,22 b
	Intensif	166	56,86 a	25,60 a
Moyennes générales	Traditionnel	1092	45,99 a	29,02 a
	Intensif	961	39,24 b	31,92 a

L'analyse globale des données recueillies pendant les quatre années d'expérimentation a montré que le niveau d'infection du CBD différait significativement ($<0,0001$) en fonction des itinéraires techniques (tableau 4.1). Les plants en conduite traditionnelle ont été plus attaqués que ceux conduits suivant un itinéraire technique intensif (tableau 4.3). Cependant,

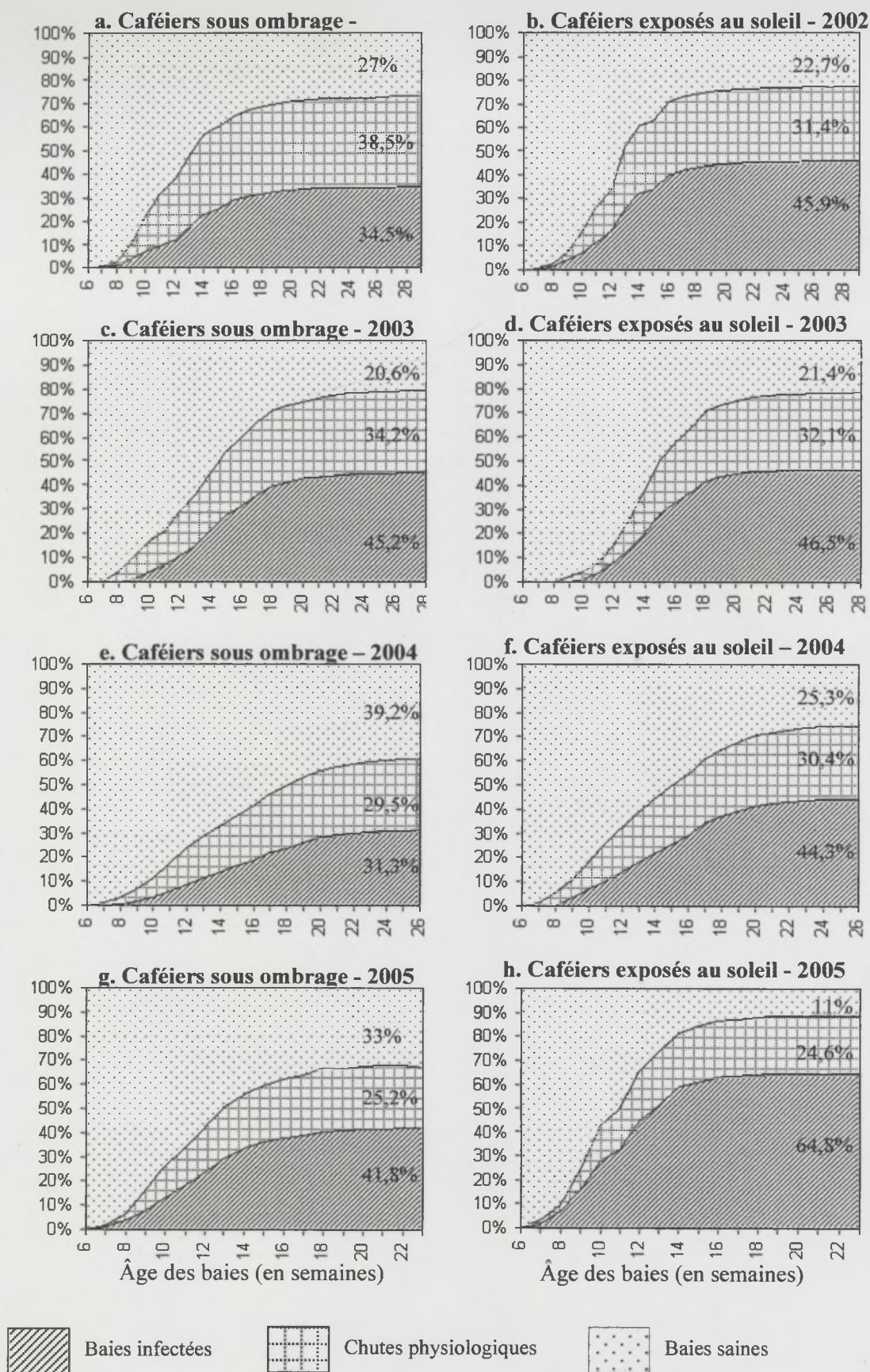
une interaction légèrement significative ($p=0,0365$) a été mise en évidence entre les années d'expérimentation et les itinéraires techniques appliqués aux parcelles. Elle s'est traduite par un niveau de maladie équivalent dans les deux types de parcelles en 2005. Par contre, les observations effectuées de 2002 à 2004 ont toujours révélé une plus grande sévérité de la maladie dans la parcelle traditionnelle par rapport à la parcelle en conduite intensive (Tableau 4.3). Les chutes physiologiques observées sur les caféiers en conduite intensive de 2003 à 2005, étaient plus importantes que celles dénombrées sur les caféiers en conduite traditionnelle. Toutefois, ce résultat est l'inverse de celui obtenu lors de la première année d'expérimentation (tableau 4.3).

4.3.3. Effet des arbres d'ombrage sur le développement de la maladie

Tableau 4.4. Moyennes des pertes annuelles en fonction de l'ombrage des caféiers

Années	Eclairement des caféiers	Nbre de branches observées	% Pertes dues au CBD	% Pertes dues aux chutes physio.
2002	Caféiers à l'ombre	300	33,94 b	38,36 a
	Caféiers au soleil	300	46,29 a	30,98 b
2003	Caféiers à l'ombre	226	42,45 a	33,98 a
	Caféiers au soleil	209	45,84 a	29,46 b
2004	Caféiers à l'ombre	276	29,28 b	29,28 a
	Caféiers au soleil	299	43,09 a	28,82 a
2005	Caféiers à l'ombre	181	39,20 b	26,83 a
	Caféiers au soleil	262	63,47 a	24,51 a
Moyennes générales	Caféiers à l'ombre	983	35,56 b	32,68 a
	Caféiers au soleil	1070	49,52 a	28,50 b

L'intensité de l'anthracnose des baies a fortement été dépendante des conditions d'ombrage des caféiers ($p<0,0001$) (Tableau 4.1). Les caféiers sans ombrage ont été plus attaqués par le CBD que ceux situés sous couvert d'arbres d'ombrage, ceci quel que soit l'itinéraire technique appliqué aux parcelles. Cependant, l'écart entre les niveaux d'infection de ces caféiers a été très variable d'une année à l'autre. Il était non significatif en 2003 et assez



Figures 4.1. Progression temporelle des différentes pertes de récoltes sur les caféiers sous ombrage et en plein soleil de 2002 à 2005

4.3.4. Développement de la maladie en fonction de la position des fruits sur le rameau (années 2004 et 2005)

Tableau 4.5. *Analyse de la variance des pertes dues au CBD et celles dues aux chutes physiologiques en fonction de la position des baies sur les branches (2004-2005)*

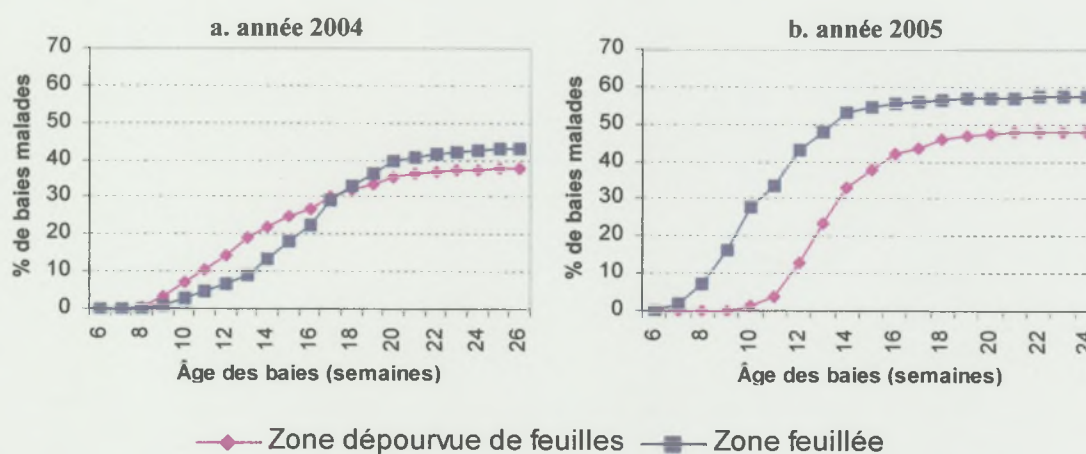
Source	DF	Pertes dues au CBD		Chutes physiologiques	
		Test F	Pr > F	Test F	Pr > F
Années	1	25,37	<0,0001	16,28	<0,0001
Zones des branches	1	5,75	0,0168	0,08	0,7741
Modes de conduite	1	11,24	0,0008	0,29	0,5902
Ombrage	1	110,95	<0,0001	44,65	<0,0001
Zone x année	1	0,02	0,8779	6,91	0,0088
Zone x mode de cond.	1	0,50	0,4800	0,12	0,7255
Zone x ombrage	1	0,00	0,9839	0,12	0,7263
Erreur	646		-	-	-

Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les différents étages des caféiers, ni pour le taux de baies malades ($p=0,3211$), ni pour les chutes physiologiques ($p=0,193$) (tableau 4.1). La position des baies sur la zone feuillée ou non feuillée du rameau a un effet significatif ($p = 0,0168$) sur le taux de pertes dues au CBD. En revanche, elle n'a aucun effet significatif ($p = 0,08$) sur le taux de chutes physiologiques (tableau 4.5). Ainsi, sur un même rameau, les baies de la zone feuillée ont toujours été plus attaquées en fin de campagne par le CBD que celles de la zone non feuillée, ceci indépendamment du mode de conduite des parcelles et de l'ombrage des caféiers (tableau 4.6). En 2004, le CBD est apparu de manière relativement synchrone sur les deux parties des branches, vers la 9^{ème} semaine après la floraison. Les courbes de progression de la maladie ont montré que le taux cumulé de baies infectées de la zone non feuillée était supérieur de la 9^{ème} à la 16^{ème} semaine, puis inférieur de la 18^{ème} à la 26^{ème} semaine, à celui de la zone feuillée (figures 4.2). En 2005, l'infection a été très précoce à la partie feuillée des branches où les premiers symptômes ont été observés dès la 7^{ème} semaine après la floraison. Ils sont survenus trois semaines plus tard sur la partie non feuillée, soit à la 10^{ème} semaine après la floraison. Le pourcentage cumulé de baies malades de la partie feuillée des branches a toujours été supérieure à celles de la partie non feuillée (figures 4.2).

Tableau 4.6. Moyennes des différentes pertes annuelles en fonction des étages
et de la position des fruits sur les branches

Paramètres des branches	Modalités des paramètres	Nbre de branches observées	% Pertes dues au CBD	% Pertes dues aux chutes physio.
Etages des caféiers	Branches hautes	694	43,84 a	29,85 a
	Branches médianes	684	43,51 a	30,88 a
	Branches basses	694	41,11 a	30,77 a
Zone des branches*	Zone non feuillée	311	39,69 b	32,46 a
	Zone feuillée	343	46,08 a	32,33 a

* moyennes calculées à partir des données des années 2004 et 2005.



Figures 4.2. Pourcentages cumulés de baies infectées suivant leur position sur les branches

4.4. Discussion

Nos résultats indiquent que certaines modifications environnementales liées aux opérations agricoles ont une incidence sur le développement de la maladie. Les pertes dues au CBD sont significativement plus élevées sur les caféiers en conduite traditionnelle que sur les caféiers en conduite intensive. Chaque année, les baies momifiées et les branches mortes ont systématiquement été supprimées en fin de campagne, sur tous les caféiers des parcelles conduites selon l'itinéraire technique intensif. La suppression de ces organes contribue à réduire des sources potentielles d'inoculum primaire présentes au démarrage de la maladie, l'agent pathogène étant supposé être hébergé par les baies momifiées et par les rameaux en inter-campagne (Nutman et Roberts, 1960 ; Gibbs, 1969 ; Muller, 1980). En dernière année d'expérimentation (2005), le niveau d'anthracnose a été le même pour les deux types d'itinéraires techniques, avec en moyenne 53% de baies infectées. Cependant, entre 2002 et 2004, les caféiers en conduite intensive ont été moins attaqués que ceux en conduite traditionnelle. Ils ont présenté un taux de maladie régressif de 36 à 33% de baies infectées pendant ces trois premières années d'expérimentation. Ce taux de maladie reste néanmoins relativement élevé, malgré la réduction des sources d'inoculum initial du fait de la taille d'entretien et de la suppression des momies. Il traduirait ainsi les limites de la seule réalisation de ces opérations agricoles pour un contrôle efficace du CBD. Celles-ci pourraient être plus performantes en association avec d'autres pratiques agricoles défavorables au développement du parasite. La taille a par exemple été mise à contribution pour améliorer substantiellement l'efficacité des traitements chimiques des poiriers contre le feu bactérien dû à *Erwinia amylovora* (Shtienberg *et al*, 2003). Les caféiers des parcelles conduites en mode intensif n'ont pas été associés aux cultures vivrières, contrairement à ceux des parcelles conduites en mode traditionnel. Cette pratique agricole soumet les caféiers à la concurrence des autres espèces végétales cultivées vis-à-vis de divers éléments nutritifs du sol. Elle les expose aussi à un stress physiologique, en raison des opérations d'entretien (sarclage et buttage) des plantes associées, qui restent particulièrement dommageables pour leur système racinaire. Les effets des facteurs édaphiques sur le développement de l'anthracnose des baies du caféier sont encore très mal connus. La fertilisation peut avoir un rôle non négligeable sur l'expression des maladies. Il a été rapporté que l'excès de fertilisants azotés peut favoriser les infections de *Alternaria alternata* dans certaines plantations de citrus en Floride (Timmer *et al.*, 2000).

Nos résultats ont clairement mis en évidence l'effet hautement significatif de l'ombrage sur la sévérité de la maladie. Le pourcentage des baies malades a nettement été plus élevé sur les caféiers exposés au soleil que ceux situés sous ombrage. Toutefois, l'effet de l'ombrage sur le développement de la maladie a fortement varié suivant les années. Il a considérablement réduit le taux de baies infectées en 2004 et en 2005, qui correspondent respectivement aux années de plus faibles et de plus fortes infections. Les plantes d'ombrage créent des conditions micro-climatiques qui contribuent à retarder la maturation des fruits (Vaast *et al.*, 2006). L'influence de ces plantes sur la physiologie des caféiers pourrait se traduire par un décalage de la période de sensibilité des baies par rapport à celle de grande pression parasitaire. Par ailleurs, des résultats assez contradictoires concernant l'effet des plantes d'ombrage sur l'incidence du CBD ont été rapportés par Phiri *et al.* (2001), à l'issue d'une enquête réalisée dans les plantations paysannes du Malawi. Ces auteurs ont estimé que l'ombrage n'avait aucun effet significatif sur l'incidence du CBD. Pourtant, dans la même étude, ils ont observé que les caféiers en association culturale avec les bananiers étaient moins infectés que les caféiers en culture pure. Pour expliquer ce résultat, ils ont évoqué l'éventualité d'un effet « barrière physique » des bananiers par rapport à la propagation du parasite. Cette hypothèse nous semble généralisable à toutes les plantes d'ombrage du caféier (bananiers, arbres fruitiers, légumineuses, etc.). L'effet des plantes d'ombrage consisterait à modifier certains paramètres pluviométriques pouvant influencer la dispersion des conidies. La canopée de ces plantes pourrait intercepter certaines gouttes de pluie, dévier d'autres de leur trajectoire ou réduire la vitesse de celles qui atteignent finalement les caféiers. Parfois, les gouttes de pluie qui tombent sur les caféiers, via le feuillage des plantes d'ombrage, pourraient ne pas être suffisamment énergiques pour libérer et disperser les conidies de l'agent pathogène. Lovell *et al.* (2002) ont montré que l'énergie cinétique des gouttes de pluie était un facteur déterminant dans le phénomène de dispersion d'agents pathogènes. Sur les plantes pérennes, la sévérité des infections est très souvent positivement corrélée à la pluviométrie. C'est le cas des citrus pour les infections de *Diaporthe citri* (Agostini *et al.*, 2003) et celles de *Alternaria alternata* (Timmer *et al.*, 2000) ; c'est aussi le cas des pêchers pour les infections de *Taphrina deformans* (Rossi *et al.*, 2006).

L'intensité de l'anthracnose des baies ne varie pas significativement en fonction des étages des caféiers. Ce résultat serait dû à l'étroite proximité des étages, du fait de l'architecture en forme de parapluie des caféiers étudiés. En effet, la majorité des branches fructifères était située vers la canopée des caféiers ; ce qui a orienté le choix des branches étudiées vers cette

partie des arbres. Il en a résulté des taux d'infection statistiquement homogènes, quel que soit l'étage du caféier (tableau 4.6). Toutefois, un gradient ascendant de sévérité de la maladie a été clairement mis en évidence lors des études épidémiologiques menées sur des caféiers présentant des étages distants les uns des autres (Mouen Bedimo *et al.*, 2006 : publication en cours).

A l'échelle de la branche, les infections dues au CBD se sont révélées plus importantes sur la partie feuillée. La partie non feuillée des branches, proche du tronc, semble être moins exposée aux facteurs de dispersion de la maladie (pluie, vent) que la partie feuillée. Logiquement, les premières baies infectées auraient dues apparaître sur la partie non feuillée des branches, la plus proche du vieux bois ayant précédemment été en contact avec l'agent pathogène. Nos résultats montrent que la maladie ne débute pas spécifiquement sur une zone donnée des branches. En 2004, elle a commencé simultanément sur les deux parties des branches. Mais en 2005, les premiers symptômes sont apparus sur la partie feuillée, trois semaines avant ceux observés sur la partie dépourvue de feuilles (figures 2). Ce résultat indique que l'inoculum primaire serait aléatoirement distribué au sein des caféiers.

D'importantes variations d'intensité de la maladie sont observées entre les différentes années. Le taux de maladie a été stable lors des deux premières années d'observations. Il a diminué à la troisième année avant d'augmenter grandement à la quatrième année. Cette évolution oscillatoire de la maladie serait principalement due aux variations annuelles des facteurs climatiques qui influent sur le développement de *C. kahawae* et sur la physiologie du caféier. La température et l'humidité relative sont des facteurs hautement déterminants pour la croissance des *Colletotrichum spp.* La germination de leurs conidies, l'élongation des tubes germinatifs et la formation des appressoria sont favorisées par des humidités relatives proches de la saturation (Goos et Tschirsch, 1962; Gupta et Pathak, 1990; Leandro *et al.*, 2003). Ces conidies peuvent aussi perdre leur viabilité lorsqu'elles sont exposées à de longues périodes sèches (Denham et Waller, 1981 ; Estrada *et al.*, 1993). Par ailleurs, la pluie qui est le principal facteur de dispersion des propagules de *C. kahawae* (Griffiths et Waller, 1971 ; Waller, 1972 ; Muller, 1980 ; Masaba et Waller, 1992) est aussi sujet à d'importantes variations d'une année à l'autre. Les baies du caféier arabica sont très sensibles au CBD pendant leur période d'expansion qui va de la 10^{ème} à la 20^{ème} semaine après la floraison (Muller, 1980 ; Van der Graff, 1992 ; Cannell, 1987). Mais, il importe que les conditions climatiques favorables au développement de *C. kahawae*, surviennent au cours de cette phase

critique du cycle phénologique du caféier, pour que le maximum de baies soient attaquées. Les fluctuations climatiques auraient une forte incidence sur le développement des maladies lorsque les organes hôtes deviennent très réceptifs vis-à-vis du parasite. C'est le cas de la température et de l'humidité relative pour les infections de *Fusarium sp.* sur le blé pendant l'anthèse (Xu, 2003) ou pour les infections de *Phomopsis amygdali* sur le pêcher, pendant la période critique de sensibilité des fruits (Lalancette *et al*, 2003).

Cette étude a montré que les modifications environnementales induites par la pratique de la taille d'entretien, la suppression des baies momifiées et l'association culturale avec les plantes d'ombrage contribuaient à réduire significativement l'intensité de la maladie sur les caféiers. Chacune de ces pratiques agricoles crée des conditions peu favorables au développement du CBD. La taille des caféiers et la suppression des baies momifiées permettent de détruire de nombreuses sources d'inoculum primaire et aident ainsi à diminuer la pression parasitaire en début d'infection. Les plantes d'ombrage quant à elles, constituent une entrave à la dispersion efficace des conidies. Ces résultats révèlent le rôle déterminant de l'action de l'homme sur les interactions complexes existant entre *Coffea arabica*, *Colletotrichum kahawae* et l'environnement. Ils peuvent être exploités dans le cadre d'une stratégie globale de lutte contre le CBD.

CHAPITRE 5 :

INCIDENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR LE DÉVELOPPEMENT DE LA MALADIE

5.1. Introduction

Le climat constitue la composante la plus aléatoire des systèmes épidémiques tels que définis par Zadocks et Shein (1979). En général, le vent et la pluie sont les principaux agents de dissémination des maladies, la température et l'humidité relative en sont les principaux « acteurs ». De ce fait, la variation de ces facteurs climatiques affecte grandement le développement des maladies dont l'intensité augmente ou diminue au cours du temps, en fonction des préférences climatiques des agents pathogènes et de la dynamique des tissus hôtes. Cette action du climat reste cependant dépendante des particularités des situations culturelles dans lesquelles les infections se déroulent. Dans le cas des plantes cultivées sous ombrage, la canopée des arbres dominants peut modifier les paramètres climatiques ayant une incidence sur les affections des plantes basses. Les plantes d'ombrage atténuent les températures, interceptent les pluies et induisent une augmentation de la taille des gouttes de pluie qui tombent sur les plantes basses (Imbach *et al.*, 1989; Caramori *et al.*, 1996 ; Jaramillo-Robledo et Chaves-Córdoba, 1998). Ces deux facteurs climatiques (températures et pluviométrie) seront pris en compte dans cette étude pour essayer de déterminer les raisons de l'importante sévérité du CBD sur les caféiers exposés au soleil par rapport aux caféiers disposés sous ombrage (cf. chapitre 4). Cette étude nous permettra également d'identifier et d'analyser les différentes relations existant entre la maladie et les facteurs climatiques en question. Ce travail s'inscrit dans la suite des résultats présentés au chapitre 4.

5.2. Matériel et méthodes

5.2.1. Dispositif expérimental et observations

Dans la parcelle en conduite traditionnelle de Santa (section 4.2.1), un suivi de la maladie a été effectué pendant deux années consécutives (2004 et 2005) sur cinquante caféiers situés sous ombrage et cinquante caféiers exposés au soleil. Chaque semaine, le taux de nouvelles baies infectées (**T_{nmal}**) a été calculé par la formule :

$$\text{T}_{\text{nmal}} = \frac{\text{N}_{\text{mal}_i}}{\text{B}_{\text{tot}_1}} * 100$$

où

N_{mal_i} = Nombre de nouvelles baies infectées à la semaine i

B_{tot₁} = Nombre total de baies à la première observation

Les relevés journaliers de la quantité de pluie et les minima et maxima de températures à l'ombre et au soleil ont été effectués chaque année. Ces relevés ont été utilisés pour obtenir les paramètres climatiques suivant à chaque semaine d'observation :

- a) la température minimale (**Temp_{min}**) correspond à la température la plus basse observée au cours de la semaine d'observation,
- b) la température maximale (**Temp_{max}**) correspond à la température la plus élevée au cours de la semaine d'observation,
- c) la quantité de pluie (**Q_{pluie}**) est le volume total de pluies tombées au cours de la semaine d'observation,
- d) la fréquence des pluies (**NdJ_{pluie}**) exprime le nombre total de jours pluvieux entre deux observations.

Les données climatiques enregistrées la veille et pendant le jour du comptage de nouvelles baies infectées n'ont pas été prises en compte pour l'estimation des paramètres climatiques de la semaine d'observations en cours. Elles ont plutôt fait partie de l'ensemble des données ayant servi au calcul de ces paramètres à la semaine d'observations suivante.

5.2.2. Analyses statistiques

L'interaction climat/maladie a été mise en évidence par l'analyse des corrélations croisées au seuil de 5%, entre chaque paramètre climatique et le taux de nouvelles baies infectées. Cette analyse permet de décrire les relations décalées dans le temps, entre les variables explicatives et les variables biologiques (Tomassone *et al.*, 1983). Dans la présente étude, les paramètres climatiques ont été décalés par rapport aux taux de nouvelles infections observées entre la 8^{ème} et la 17^{ème} semaine après la floraison, ce qui permet de déterminer l'effet des événements climatiques antérieurs sur la progression de l'épidémie. Sur la base des résultats de l'analyse des corrélations croisées, nous avons effectué un choix de variables climatiques significatives pour étudier l'impact d'une combinaison de plusieurs facteurs sur la sévérité du CBD. Cette étude a été réalisée par l'analyse de régressions multiples progressives au seuil de probabilité de 5%. Pour n ensembles d'observations du taux de nouvelles baies infectées et p paramètres climatiques $x_1, x_2, \dots, x_p$, ce type de régressions est défini par la relation linéaire :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} + \mu_i \quad (\text{Tomassone } et al., 1983)$$

où ($i = 1, 2, \dots, n$), ($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$) et μ_i représentent respectivement les numéros d'observation, les coefficients de régression partiels et le terme aléatoire.

Toutes les analyses des données ont été effectuées par le logiciel **STATISTICA 5.1**. Les corrélogrammes obtenus à la suite de l'analyse des corrélations croisées disposent de bornes d'intervalle de confiance (en pointillés) qui permettent d'identifier les coefficients de corrélation significatifs. Les graphes qui sortent de cet intervalle indiquent des corrélations significatives au seuil de 5%.

5.3. Résultats

5.3.1. Relations entre les facteurs climatiques et la sévérité du CBD

Tableau 5.1. Coefficients de corrélation optimum en fonction des semaines de décalage, entre les taux de baies nouvellement infectées et les paramètres climatiques– Santa 2005

Paramètres climatiques	Ombrage	Année 2004	Année 2005
Températures maximales (Temp _{max})	Caféiers à l'ombre	-0,74 (0)**	-0,39 (0)
	Caféiers au soleil	-0,63 (0)**	-0,87 (0)**
Températures minimales (Temp _{min})	Caféiers à l'ombre	-0,54 (-1)	-0,76 (0)**
	Caféiers au soleil	-0,50 (-1)	-0,68 (0)
Quantité de pluie (Q _{pluie})	Caféiers à l'ombre	0,58 (-3)	0,28 (-3)
	Caféiers au soleil	0,57 (-3)	0,49 (0)
Nombre de jours pluvieux (NdJ _{pluie})	Caféiers à l'ombre	0,78 (-1)**	0,35 (0)
	Caféiers au soleil	0,84 (-1)**	0,88 (0)**

** Coefficients de corrélations significatifs (....) Semaine de décalage

En 2004, le niveau de nouvelles infections était toujours négativement corrélé aux températures maximales enregistrées au cours de la semaine d'observation, quel que soit l'ombrage des caféiers. Aucune corrélation significative n'a été mise en évidence entre les taux de baies infectées au cours de cette année et les températures minimales (Tableau 5.1). En 2005, nos analyses ont révélé qu'il existe des corrélations négatives significatives entre le taux de nouvelles infections et les températures minimales ou maximales en fonction de l'ombrage des caféiers. Ces infections étaient corrélées aux températures maximales lorsque les caféiers étaient exposés au soleil ; elles étaient corrélées aux températures minimales lorsqu'ils étaient situés sous ombrage. Les corrélations entre le niveau de maladie observé au soleil et les températures maximales ont été moins importantes en 2004 (figure 5.1) qu'en 2005 (figure 5.2).

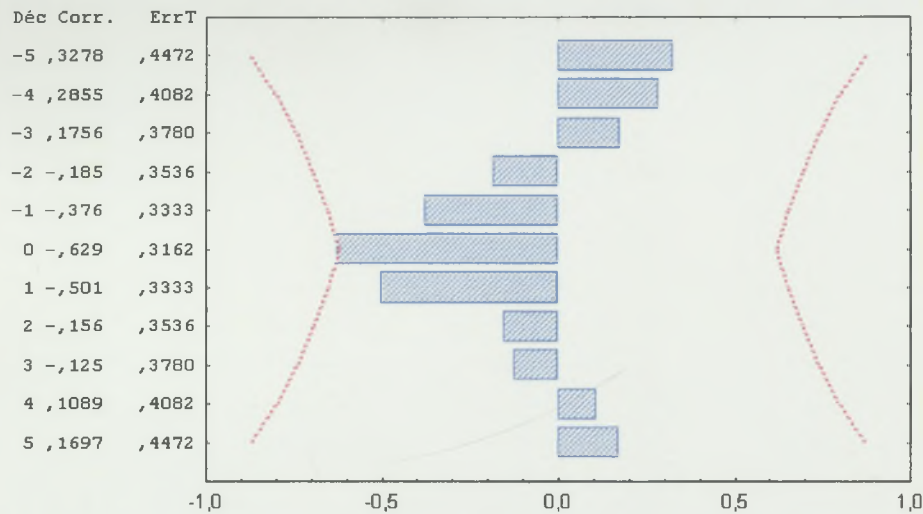


Figure 5.1. Correlogramme des températures maximales avec le taux de nouvelles infections observées sur les caféiers exposés au soleil – Santa 2004.

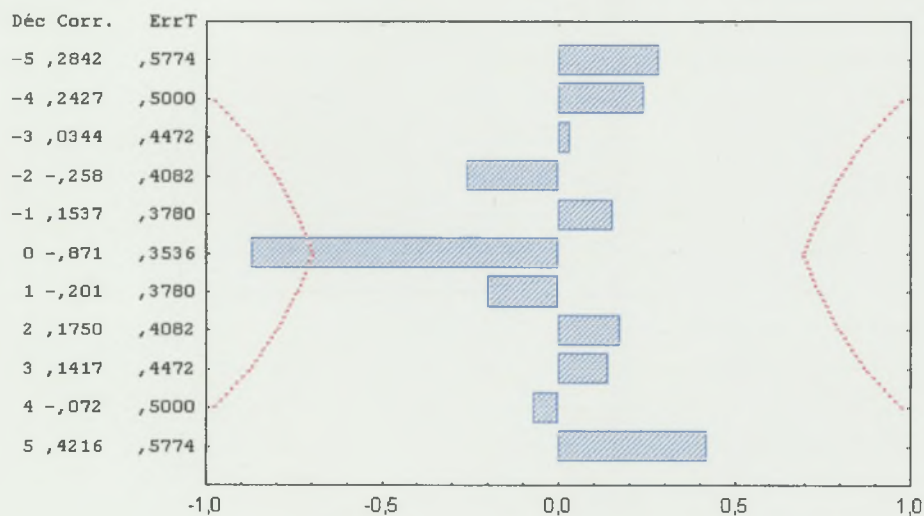


Figure 5.2. Correlogramme des températures maximales avec le taux de nouvelles infections observées sur les caféiers exposés au soleil – Santa 2005.

En 2004, le niveau de nouvelles infections était positivement corrélé au nombre de jours pluvieux de la semaine précédant la date d'observations, quel que soit l'ombrage des caféiers (Tableau 5.1). En 2005, ce type de corrélation a été mis en évidence sans aucun décalage entre les deux variables. Ainsi, le taux de nouvelles infections observées sur les caféiers sans ombrage a été corrélé avec le nombre de jours de pluies tombées au cours de la semaine d'observations (figures 5.3 et 5.4). Nos analyses n'ont révélé aucune corrélation significative

entre le taux de nouvelles baies infectées et la quantité de pluies tombées, quels que soient l'ombrage des caféiers et l'année d'expérimentation (tableau 5.1).

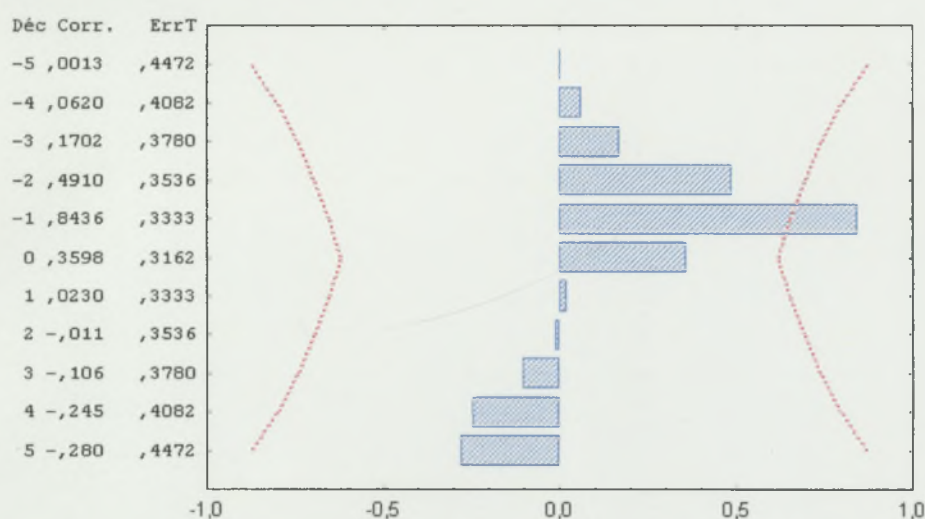


Figure 5.3. Corrélogramme du nombre de jours pluvieux avec le taux de nouvelles infections observées sur les caféiers exposés au soleil – Santa 2004.

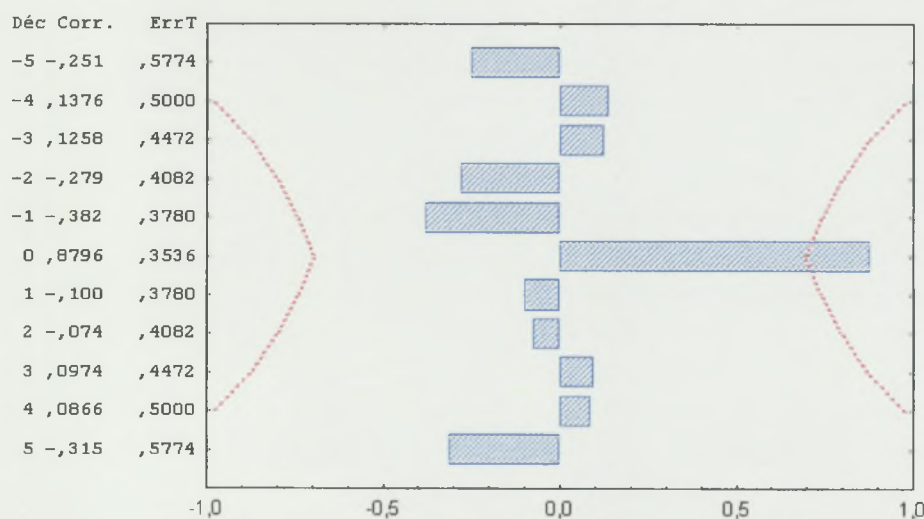


Figure 5.4. Corrélogramme du nombre de jours pluvieux avec le taux de nouvelles infections observées sur les caféiers exposés au soleil – Santa 2005.

Les différentes corrélations révélées par nos analyses montrent que le taux de nouvelles baies infectées des caféiers exposés au soleil diminue toujours significativement, lorsque les températures maximales augmentent, et inversement (figures 5.5 et 5.6). Par contre, il augmente toujours en fonction du nombre de jours de pluies (figures 5.7 et 5.8).

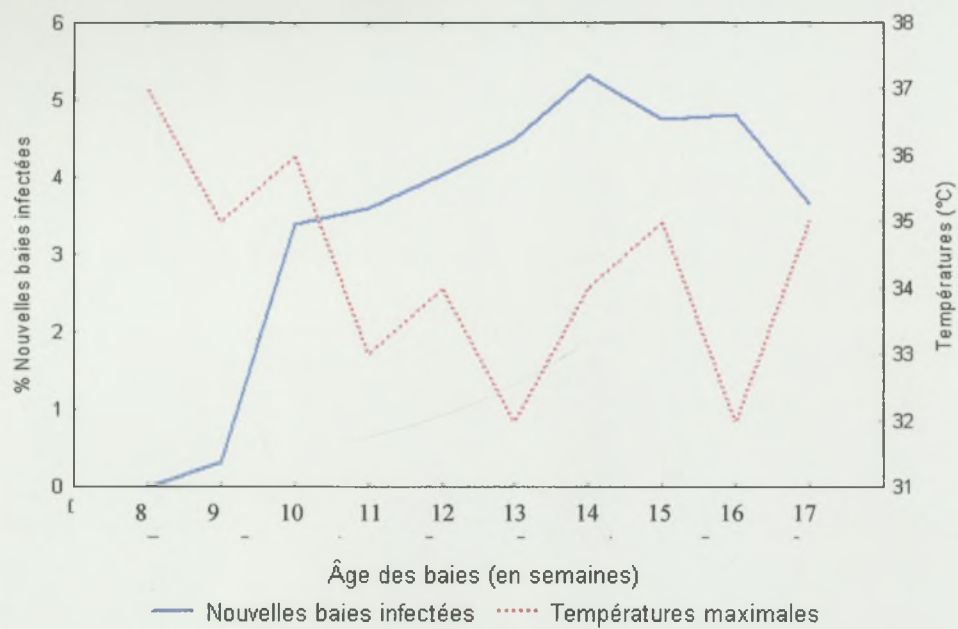


Figure 5.5. Evolution du taux de nouvelles baies infectées en 2004 en fonction de la variation des températures maximales

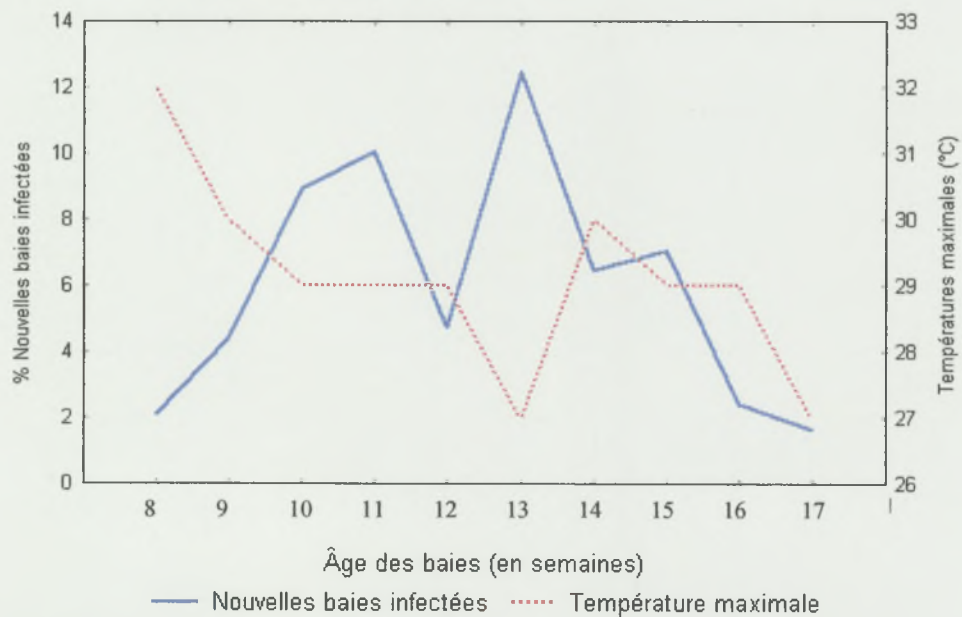


Figure 5.6. Evolution du taux de nouvelles baies infectées en 2005 en fonction de la variation des températures maximales

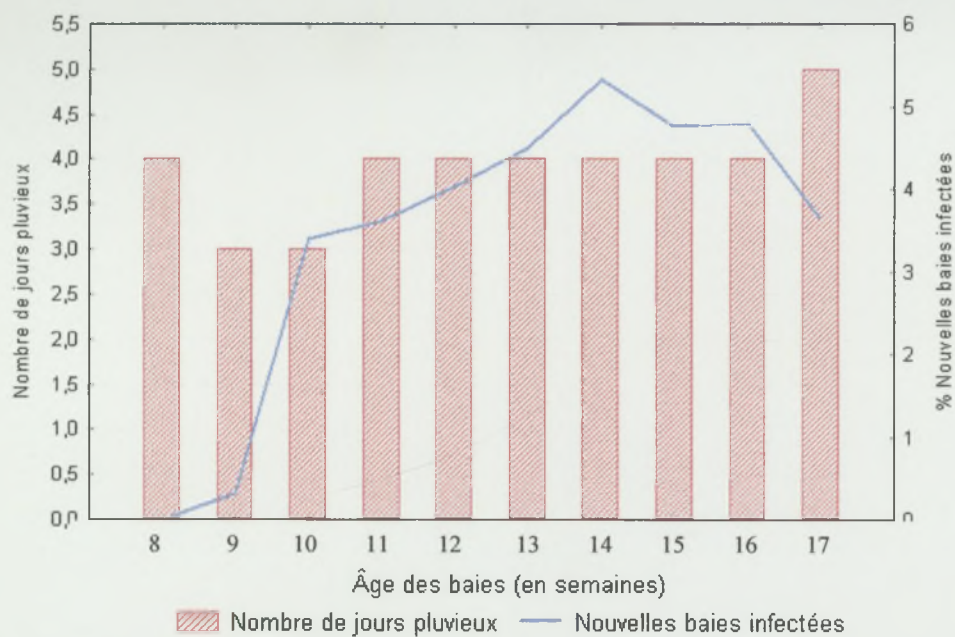


Figure 5.7. Evolution du taux de nouvelles baies infectées en 2004 en fonction du nombre de jours de pluie.

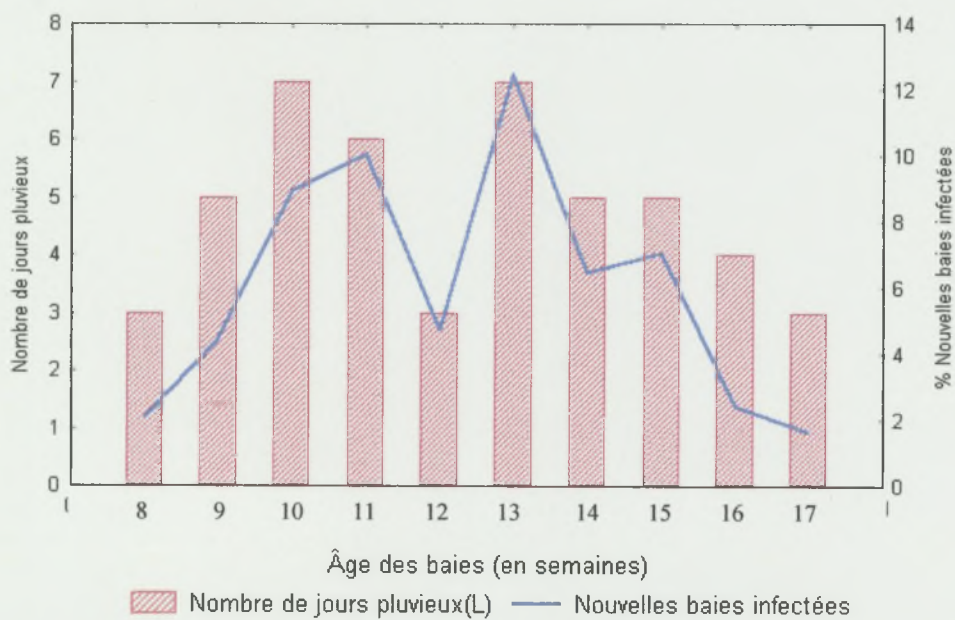


Figure 5.8. Evolution du taux de nouvelles baies infectées en 2005 en fonction du nombre de jours de pluie

5.3.2. Effet conjugué des différents paramètres climatiques sur la sévérité de la maladie

Cet effet a été recherché dans tous les cas où le taux de nouvelles infections était significativement corrélé à plusieurs paramètres climatiques. Il s'agit des observations effectuées au soleil pendant les deux années d'expérimentation et de celles réalisées sous ombrage en 2004 (cf. paragraphe 5.3.1).

Tableau 5.2. Analyse des régressions multiples entre les paramètres climatiques et les taux de nouvelles infections

Paramètres	Caféiers sous ombrage - 2004 R ² = 78,53% R ² ajusté = 61,68% P<0,5628			Caféiers au soleil - 2004 R ² =72,02% R ² ajusté =62,69% P<0,0219			Caféiers au soleil - 2005 R ² =95,58% R ² ajusté =91,36% P<0,0022		
	Coef. β	Test t	Proba.	Coef. β	Test t	Proba.	Coef. β	Test t	Proba.
Ordonnée à l'origine	2,5112	0,1240	0,9053 ^{ns}	-2,4767	-0,1689	0,8714 ^{ns}	36,7765	2,6327	0,0464*
Température maximale	-0,1899	-0,2873	0,7835 ^{ns}	-0,1131	-0,3297	0,7528 ^{ns}	-1,2149	-2,8456	0,0360*
Nombre de jours de pluie	1,1397	1,0649	0,3279 ^{ns}	2,5106	2,5639	0,0427*	1,1572	2,9892	0,0305*

*paramètres significatifs du modèle de régression

ns : paramètres non significatifs

Nos analyses ont montré que le taux de nouvelles baies infectées au soleil peut significativement être défini par un modèle de régression multiple à $p<0,0219$ en 2004 et à $p<0,0022$ en 2005. Toutefois, le modèle de régression le plus précis, avec des coefficients de détermination (réel et ajusté) de plus de 90%, a été obtenu avec les observations effectuées en 2005 (tableau 5.2). Ce modèle dont les tous les paramètres sont significatifs peut être exprimé par la relation :

$$T_{nmal} = 36,776 - 1,215Temp_{max} + 1,157NdJ_{pluie} \quad (1)$$

Le modèle résultant des observations effectuées en 2004 se présente sous la forme :

$$T_{nmal} = -2,4767 - 0,1131Temp_{max} + 2,511NdJ_{pluie} \quad (2)$$

La température maximale n'étant pas un paramètre significatif dans ce modèle (tableau 5.2), nous avons à nouveau effectué une régression en considérant le nombre de jours pluvieux comme l'unique variable dépendante. Cette régression a révélé un modèle dont l'ordonnée à l'origine et la variable dépendante sont significatifs à $p=0,0259$ et à $p=0,0041$ respectivement et qui se présente sous la forme :

$$T_{\text{nmal}} = -7,2257 + 2,7367 \text{NdJ}_{\text{pluie}} \quad (3)$$

Les observations effectuées sous ombrage en 2004 n'ont pas permis de mettre en évidence un modèle de régression multiple significatif, au seuil de probabilité de 5%, entre le taux de baies infectées et les deux paramètres climatiques pris en compte simultanément dans nos analyses. Toutefois, des régressions significatives ont été observées lorsque chaque variable climatique a été introduite individuellement dans le modèle (tableau 5.3). Dans ce cas, la régression du taux de nouvelles baies infectées peut être définie l'équation :

$$T_{\text{nmal}} = 22,735 - 0,826 \text{Temp}_{\text{max}} \quad (4) \quad \text{ou} \quad T_{\text{nmal}} = -3,2787 + 1,4203 \text{NdJ}_{\text{pluie}} \quad (5)$$

L'équation (5) peut simplement s'écrire $T_{\text{nmal}} = 1,4203 \text{NdJ}_{\text{pluie}}$ car le coefficient de l'ordonnée à l'origine n'est pas significatif ($p = 0,0922$).

Tableau 5.3. Analyse des régressions entre la température maximale ou la fréquence des pluies et le taux de nouvelles infections observées sous ombrage en 2004.

Paramètres	La température maximale est la variable indépendante $R^2= 54,43\%$ R^2 ajusté = 48,73% $P<0,0149$			La fréquence des pluies est la variable indépendante $R^2=61,15\%$ R^2 ajusté =55,60% $P<0,0128$		
	Coef. β	Test t	Proba.	Coef. β	Test t	Proba.
Ordonnée à l'origine	22,7350	3,4281	0,0090*	-3,2787	-1,9498	0,0922 ^{ns}
Température maximale	-0,8262	-3,0914	0,0149*	-	-	-
Nombre de jours de pluie	-	-	-	1,4203	3,3193	0,0128*

paramètres significatifs

paramètres non significatifs

5.4. Discussion

Les corrélations significatives entre les facteurs climatiques et la sévérité du CBD ont uniquement été recherchées pendant la phase de progression de la maladie qui s'étend de la 8^{ème} à la 17^{ème} semaine après la floraison. Il s'agit d'une période caractérisée par une forte pression infectieuse de *C. kahawae* (figure 4.1 du chapitre 4) et par des facteurs climatiques qui semblent être optimaux pour le développement du CBD. Il s'agit également de la période pendant laquelle les baies sont très réceptives à la maladie. Les diverses corrélations mises en évidence par nos analyses montrent que les températures (min. et max.) et le nombre de jours de pluies ont une grande incidence sur le niveau de baies nouvellement infectées. Toutefois, la relation entre le niveau de CBD et chacun de ces paramètres peut changer suivant les années et le type d'ombrage des caféiers. C'est ainsi que les caféiers observés en 2004 ont présenté, à l'ombre ou au soleil, des taux de maladie significativement corrélés avec les températures maximales et le nombre de jours de pluie. Par contre en 2005, ces résultats ont uniquement été obtenus avec les observations effectuées sur les caféiers exposés au soleil, les nouvelles infections des caféiers sous ombrage n'étant significativement corrélées qu'aux températures minimales. Les figures 5.5 et 5.6 montrent que les températures maximales de l'année 2004 étaient plus élevées et plus fluctuantes que celles de l'année 2005. Ceci laisse supposer qu'en 2004, elles constituaient un facteur limitant à certains moments du cycle épidémiologique, quel que soit l'ombrage des caféiers. En 2005, ces températures ne semblent pas être un facteur limitant pour le taux d'infection des caféiers ombragés, probablement en raison de l'effet stabilisateur de la canopée des arbres d'ombrage, pour des températures moins excessives. Toutes les corrélations significatives obtenues avec les températures (min. ou max.) sont négatives, ce qui montre que le CBD augmente rapidement aux températures basses et confirme qu'il s'agit effectivement d'une maladie d'altitude (Nutman et Roberts, 1960 ; Mulinge, 1972 ; Cook, 1975).

Contrairement aux quantités de pluies tombées pour lesquelles aucune corrélation significative n'a été établie avec la sévérité de la maladie, le nombre de jours pluvieux s'est révélé positivement corrélé au taux de baies nouvellement infectées. Toutefois, les corrélations obtenues étaient différentes chaque année en fonction du décalage existant entre les deux variables. En 2004, ces corrélations ont été mises en évidence avec le nombre de jours pluvieux de la semaine qui précède la date d'observation, quel que soit l'ombrage des caféiers. Ce résultat amène à supposer que les événements pluvieux antérieurs à l'apparition

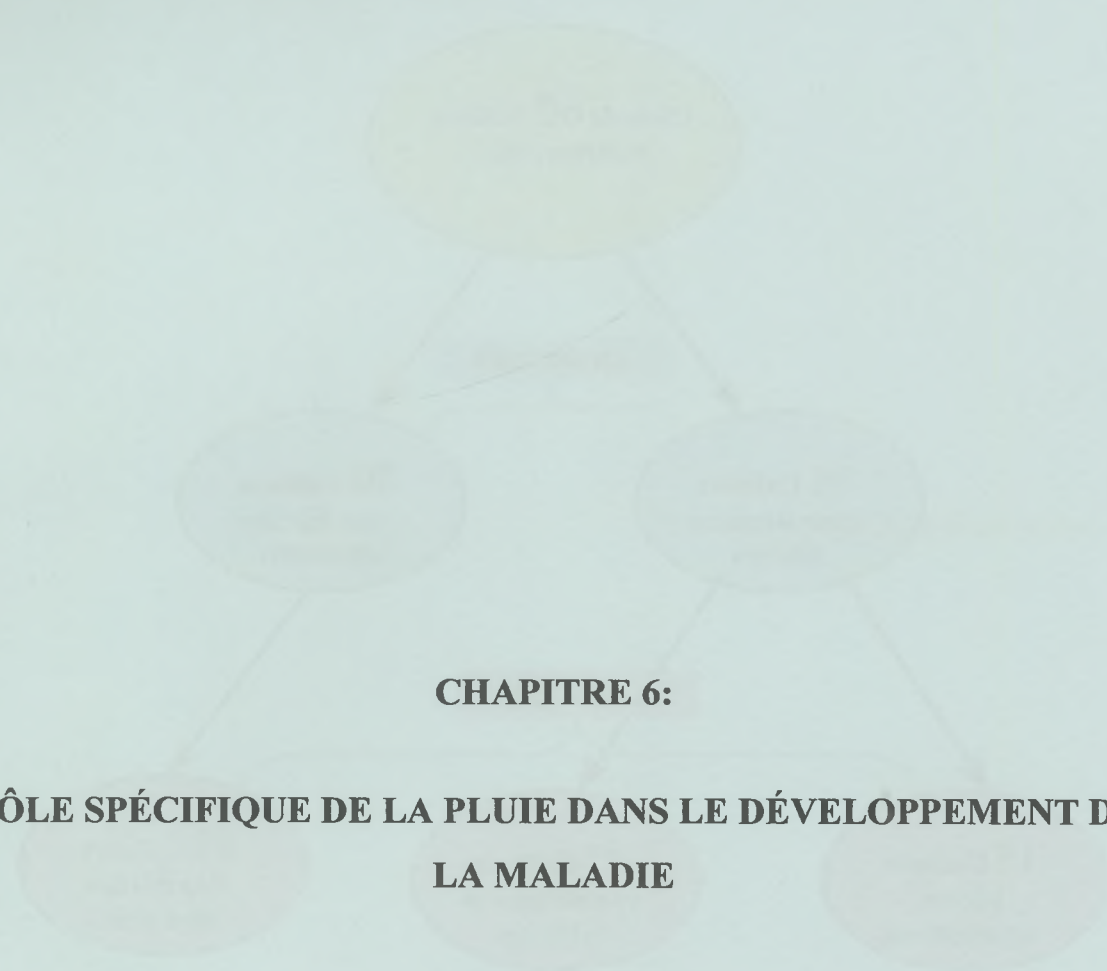
des symptômes favorisent la contamination des baies par l'agent pathogène. Il montre ainsi l'importance du pouvoir de dispersion des pluies de l'année 2004 sur les conidies de *C. kahawae*. En 2005, la sévérité de la maladie était plutôt corrélée au nombre de jours de pluie enregistrés au cours de la semaine d'observation. Ce phénomène uniquement observé sur les caféiers exposés au soleil, pourrait être le fait d'une période d'incubation de la maladie moins longue en 2005 qu'en 2004, traduisant ainsi l'impact prépondérant des pluies de l'année en question sur le cycle de base du CBD. Les infections de CBD ont toujours été observées en saison de pluie, ce qui montre que ce paramètre climatique est indispensable pour le déroulement de l'épidémie. Mais, aucune corrélation significative n'a été observée entre les paramètres pluviométriques étudiés (quantité et nombre de jours de pluie) et le taux de nouvelles infections. Ce résultat montre que les paramètres pluviométriques pris en compte dans nos analyses, ne sont pas suffisants pour préciser la complexité du rôle de la pluie sur le développement du CBD. Toutefois, toutes les relations mises en évidence dans la présente étude, entre la pluie et la sévérité du CBD, sont une indication des multiples rôles que pourraient jouer différents paramètres pluviométriques pendant le cycle épidémique du CBD.

Les observations effectuées en 2005 sur les caféiers exposés au soleil ont permis d'obtenir un modèle de régression assez précis, susceptible de définir le taux de nouvelles baies infectées en fonction des températures maximales et du nombre de jours pluvieux. Ceci montre que la sévérité de la maladie peut être subordonnée à l'action simultanée de plusieurs facteurs climatiques. Lorsque l'effet de chaque facteur climatique est décalé dans le temps et que ce décalage diffère d'un facteur à un autre, le modèle de régression multiple n'exprime le niveau d'infection qu'avec le facteur climatique prépondérant. Dans ces conditions, le taux de maladie peut être défini par plusieurs modèles, en fonction de chaque facteur climatique. Il s'agit du cas des modèles obtenus à partir des observations effectuées en 2004 sur les caféiers ombragés.

Nous n'avons pris en compte que les températures (min. et max.) et la pluviométrie (quantité et nombre de jours de pluie) pour tenter d'expliquer le taux de nouvelles baies infectées. Toutefois, il existe d'autres variables climatiques comme l'humidité relative, la durée d'humectation, qui peuvent influencer sur le développement des maladies cryptogamiques (Griffiths *et al.*, 1971 ; Waller, 1973 ; Fitzell et Peack, 1984 ; Estrada *et al.*, 2000). De plus, l'effectif des baies diminue avec le temps en fonction de leur sensibilité à la maladie et de leur disposition physiologique. Tous ces paramètres qui nous étaient matériellement difficiles



d'évaluer devraient être introduits dans les analyses pour pouvoir établir un modèle plus précis afin de mieux expliquer et prédire le taux de nouvelles infections de CBD. Un tel modèle pourrait être utile pour décider de l'opportunité du déclenchement des traitements fongicides. Nos travaux ont néanmoins permis d'identifier les températures et la pluie comme étant des facteurs climatiques clés dans le déroulement des épidémies d'anthracnose des baies du caféier arabica. L'impact de la pluie sur cette maladie fera l'objet d'une étude spécifique au chapitre 6.



CHAPITRE 6:

RÔLE SPÉCIFIQUE DE LA PLUIE DANS LE DÉVELOPPEMENT DE LA MALADIE

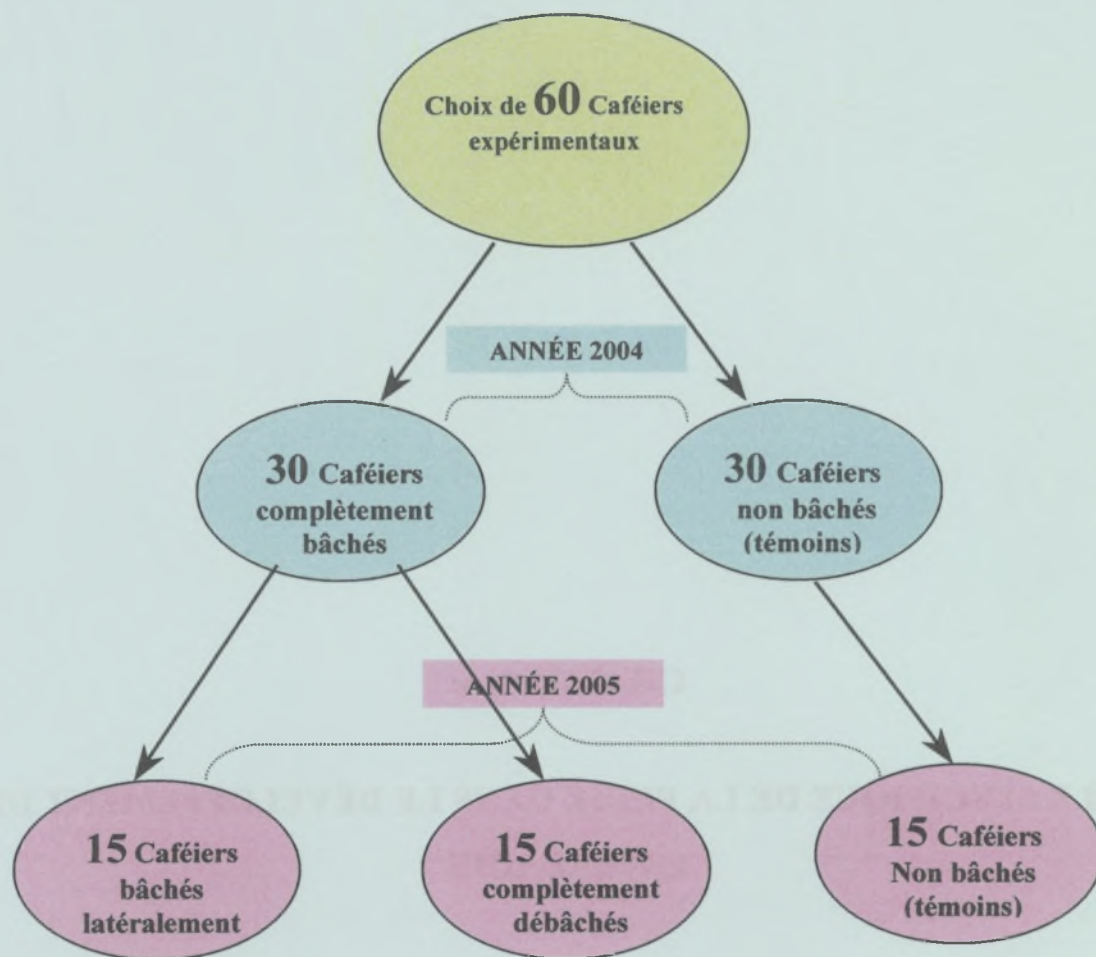


Figure 6.1: représentation schématique des modalités de bâchage des cafés pendant les deux années d'expérimentation (2004 et 2005)

6.1. Introduction

Les maladies cryptogamiques des plantes surviennent généralement en saison pluvieuse et l'intensité des dégâts qu'elles occasionnent dépend surtout des paramètres pluviométriques des sites dans lesquels elles sont observées (Timmer *et al.*, 2000 ; Agostini, *et al.*, 2003 ; Mila *et al.*, 2004 ; Paul *et al.*, 2004). Cette observation est aussi vérifiée pour le CBD dont la sévérité augmente avec l'intensité des pluies (Waller, 1972). La floraison, marquant le début du cycle de développement des baies, est déclenchée par la pluie (Cannell, 1987 ; Wintgens, 2004) qui active également le parasitisme de *C. kahawae* vis-à-vis des jeunes baies. Le cycle épidémiologique du CBD débute donc avec les premiers épisodes pluvieux. Il se poursuit ultérieurement au gré des aléas climatiques, par des contaminations successives de nouvelles baies saines durant la saison pluvieuse. Dans la plupart des cas, de telles contaminations surviennent à la suite de la dispersion des conidies par « *splashing* », un phénomène conditionné par la taille et l'énergie cinétique des gouttes de pluies qui tombent sur les lésions des organes infectés (Madden, 1997 ; Lovell *et al.*, 2002 ; Lan et Scherm, 2003). Au chapitre 5, nous avons montré que le niveau de pertes dues au CBD était positivement corrélé au nombre de jours pluvieux. Ceci laisse supposer qu'en l'absence des pluies, cette maladie ne pourrait ni se développer, ni se propager dans la plantation. Dans ce cas, il se pose le problème de l'origine de l'inoculum primaire pour le nouveau cycle épidémiologique, au retour des pluies. Différents scénarii ont été expérimentés pendant deux années successives (2004 et 2005), pour déterminer l'impact de l'inoculum primaire sur le développement du CBD. Ainsi, des expérimentations ont été conduites dans une plantation paysanne de Bafou dans le but : (i) d'évaluer le niveau de maladie sur les caféiers complètement protégés de la pluie pendant une campagne entière (année 2004) et (ii) de mettre en évidence l'arrière effet éventuel de cette protection sur le développement du CBD au cours de la campagne suivante (année 2005).



Photo 6.1. *Caféiers sous abris bâchés à Bafou*

6.2. Matériel et méthodes

6.2.1. Matériel végétal et dispositif expérimental

En 2004, trente caféiers de la variété *Jamaïque* d'une plantation paysanne située à Bafou (1820 mètres), ont été individuellement protégés de la pluie avant la floraison principale, à l'aide de bâches transparentes en polyéthylène (photo 6.1). Ces bâches étaient disposées de manière à couvrir intégralement la canopée des caféiers en assurant à la fois, leur protection latérale contre la pluie. Chacun de ces caféiers ainsi protégés était situé à proximité immédiate d'un caféier témoin non abrité de la pluie. Au total, 60 caféiers ont été étudiés au cours de cette première année d'expérimentation. Ainsi en 2004, les caféiers protégés de la pluie ont été comparés aux caféiers témoins suivant un dispositif complètement randomisé comportant 30 répétitions.

En 2005, quinze des caféiers protégés de la pluie en 2004 ont été complètement débâchés et les quinze autres n'ont été protégés que latéralement, la bâche recouvrant leur canopée ayant été supprimée (photos 6.2 a et b). De plus, quinze caféiers témoins ont été choisis au hasard parmi les trente caféiers non bâchés en 2004. Ainsi, 45 caféiers ont été observés pendant la deuxième année d'expérimentation. Le mode de protection des caféiers vis-à-vis de la pluie est le principal facteur étudié au cours de cette expérimentation. Les caféiers complètement débâchés, les caféiers bâchés latéralement et les caféiers n'ayant pas été protégés de la pluie pendant les deux années (caféiers témoins) ont été comparés entre eux suivant le même dispositif expérimental totalement randomisé en 15 répétitions.

La répétition est représentée par un seul caféier, quelle que soit l'année d'expérimentation. Le dispositif expérimental de ces deux années d'étude est schématisé à la figure 6.1.

6.2.2. Observations et évaluation des pertes

Les observations hebdomadaires ont été effectuées sur trois rameaux plagiotropes marqués sur chaque caféier étudié; soit un rameau à l'étage supérieur du plant, un à l'étage médian et un à l'étage inférieur. En 2004, ces observations ont été réalisées en différenciant la zone feuillée de chaque rameau de la zone non feuillée. Toutes les observations ont été effectuées à partir de la 6^{ème} semaine après la floraison jusqu'à la 25^{ème} semaine, tel que décrit au



Photo 6.2a. *Caféier bâché latéralement – vue de côté*



Photo 6.2b. *Caféier bâché latéralement – vue de dessus*

paragraphe 3.2.1 du chapitre 5. Les pertes dues au CBD et les chutes physiologiques ont été calculées et analysées suivant les paramètres et la méthodologie énoncés aux paragraphes 2.4 et 2.6 du chapitre 5.

En 2004, les températures maximales et minimales ont été quotidiennement relevées à l'intérieur et à l'extérieur des abris bâchés.

6.3. Résultats

6.3.1. Expérimentation 2004 : impact de la protection intégrale des caféiers contre la pluie sur le niveau de pertes dues au CBD

Tableau 6.1. Analyse de la variance des taux de pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en 2004

Sources de variation	DDL	Pertes dues au CBD		Chutes physio.	
		Test F	Proba	Test F	Proba
Variation totale	359				
Bâchage	1	944,57	<0,0001**	65,37	<0,0001**
Zone de la branche	1	2,28	0,1316	6,48	0,0113*
Branches	2	2,92	0,0550	0,09	0,9164
Bâchage*Zone branche	1	0,62	0,4318	6,28	0,0126*
Bâchage*Branches	2	3,84	0,0224*	2,71	0,0681
Zone branche*Branches	2	0,21	0,8095	0,99	0,3739
Variation résiduelle	350	C.V = 56,04%		C.V = 47,07%	

Les caféiers intégralement protégés de la pluie ont présenté un taux d'infection très faible, d'environ 1% de baies malades qui est très significativement différent ($p < 0,0001$) de celui des caféiers témoins sur lesquels 45% de baies malades ont été observées (tableaux 6.1 et 6.2). De même, les pertes dues aux chutes physiologiques observées sur les caféiers intégralement protégés de la pluie sont très significativement différentes ($p < 0,0001$) de celles enregistrées sur les caféiers témoins (tableau 6.1). La position des baies sur la zone feuillée ou non feuillée

de la branche n'a aucun effet significatif ($p=0,1316$) sur leur niveau d'infection au CBD, ni sur leur niveau de chutes physiologiques.

Tableau 6.2. Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction du bâchage des caféiers (% bruts)

	Pertes dues au CBD	Chutes physiologiques
Caféiers bâchés	1,14 b	24,64 b
Caféiers témoins	45,01 a	43,34 a

Nos résultats ont aussi mis en évidence, l'effet significatif ($p=0,0224$) de l'interaction entre le positionnement des branches sur les caféiers et leur bâchage sur le taux de pertes dues à la maladie (tableau 6.1). Les caféiers sous abris bâchés ont présenté un gradient de sévérité descendant de la maladie. Ce gradient est ascendant sur les caféiers témoins, les branches proches de la cime des arbres ayant été les plus attaquées (tableau 6.3). Aucune différence significative du taux de pertes dues aux chutes physiologiques n'a été mise en évidence entre les branches, quelle que soit la protection des caféiers contre la pluie (tableau 6.3).

Tableau 6.3. Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction de l'interaction entre le bâchage et les étages du caféier (%bruts)

Bâchage	Position des branches	Pertes dues au CBD	Chutes physiologiques
Caféiers bâchés	Branches hautes	0,733 b	27,556 a
	Branches médianes	1,102 a	22,651 a
	Branches basses	1,582 a	23,727 a
Caféiers témoins	Branches hautes	49,350 a	38,603 a
	Branches médianes	47,476 a	44,436 a
	Branches basses	38,195 b	46,970 a

Sur les caféiers témoins, la progression temporelle de la maladie correspond à une courbe sigmoïde. Les périodes de démarrage, de la progression maximale et de la phase asymptotique de la maladie ont respectivement été observées à la 8^{ème}, 13^{ème} et 20^{ème} semaine après la floraison (figure 6.2 a et b). La courbe de progression temporelle de la maladie sur les caféiers bâchés est pratiquement confondue à l'axe des abscisses (figure 6.2a), ce qui correspond à un

niveau d'infections quasiment nul observé sur ces caféiers durant toute l'année d'expérimentation.

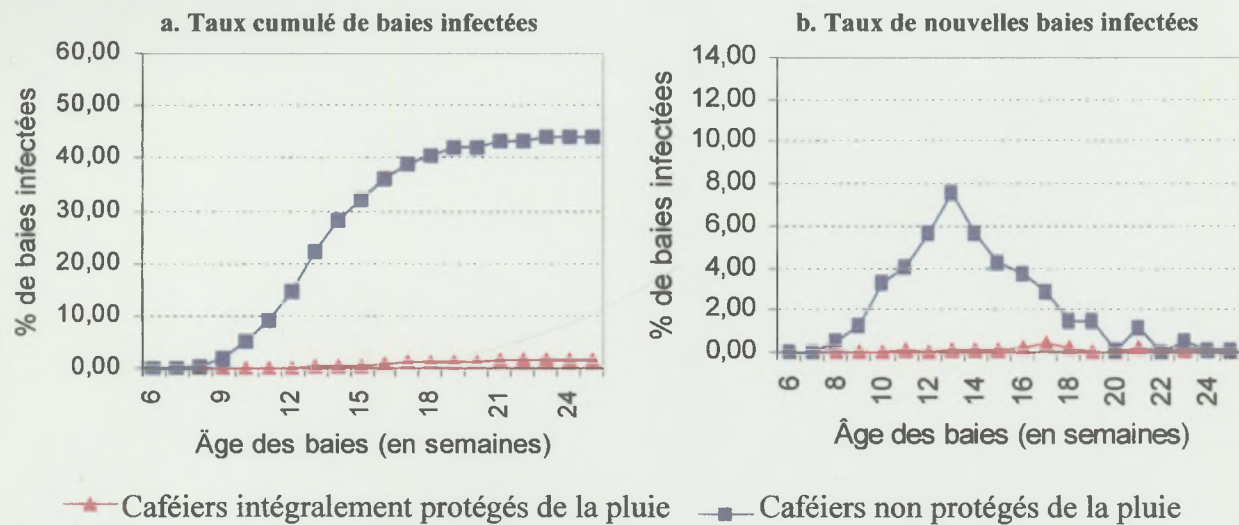


Figure 6.2. Evolution des infections au cours du temps en fonction de la protection des caféiers contre la pluie en 2004.

6.3.2. Expérimentation 2005 : évaluation de l'arrière effet de la protection des caféiers contre la pluie en 2004 sur les pertes dues au CBD en 2005

Tableau 6.4. Analyse de la variance des taux de pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en 2005

Sources de variation	DDL	Pertes dues au CBD		Chutes physiologiques	
		Test F	Proba	Test F	Proba
Variation totale	95				
Bâchage	2	41,35	<0,0001**	3,14	0,0484
Branches	2	2,11	0,1270	1,26	0,2901
Bâchage*Branches	4	1,03	0,3963	0,68	0,6110
Variation résiduelle	87				
		C.V = 53,03%		C.V = 41,35%	

Les pertes dues au CBD varient de façon hautement significative ($p=0,0001$) suivant le type de protection contre la pluie mise en place sur les caféiers en 2005 (tableau 6.4). Ainsi, les caféiers bâchés latéralement en 2005 ont présenté un taux d'infection d'environ 12% de baies malades, équivalent à la moitié de celui qui a été observé sur les caféiers complètement

débâchés en 2005 (tableau 6.5). Le taux d'infection le plus élevé, évalué à 53% de baies malades a été observé sur les caféiers témoins, correspondant aux caféiers qui n'ont pas été protégés de la pluie pendant les deux années d'expérimentation (tableau 6.5). Par ailleurs, aucune différence significative du taux de pertes dues au CBD n'a été observée, quels que soient les étages des caféiers et leur protection contre la pluie ($p=0,1270$) (tableaux 6.4 et 6.6).

Le taux de pertes dues aux chutes physiologiques ne varie pas significativement entre les différents types de protection des caféiers, ni entre les différents étages des caféiers. De même, il n'existe aucune interaction significative entre ces deux paramètres en ce qui concerne les chutes physiologiques des baies.

Tableau 6.5. Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques en fonction du bâchage appliqué aux des caféiers en 2005 (% bruts)

Bâchage	Pertes dues au CBD	Chutes physiologiques
Caféiers bâchés de côté	11,93 c	26,17 a
Caféiers débâchés en 2005	27,01 b	37,07 a
Caféiers témoins	53,00 a	32,48 a

Tableau 6.6. Moyennes des pertes dues au CBD et aux chutes physiologiques sur les différents des caféiers (% bruts)

Position des branches	Pertes dues au CBD	Chutes physiologiques
Branches hautes	32,97 a	28,17 a
Branches médianes	28,22 a	29,59 a
Branches basses	38,00 a	34,58 a

Sur les caféiers témoins et sur les caféiers complètement débâchés, les courbes d'évolution de la maladie (figure 6.3) montrent que les premières infections ont été observées à la 10^{ème} semaine après la floraison. La maladie a ensuite progressé de la même manière sur ces différents caféiers, jusqu'à la 12^{ème} semaine après la floraison. Entre la 12^{ème} et la 14^{ème} semaine après la floraison, l'accroissement du niveau d'infections sur les caféiers témoins a atteint le double de celui observé sur les caféiers complètement débâchés. Sur les caféiers

protégés latéralement, la maladie a débuté à la 12^{ème} semaine après la floraison et sa progression s'est faite très lentement jusqu'à la 18^{ème} semaine où elle s'est stabilisée à environ 12% de baies infectées.

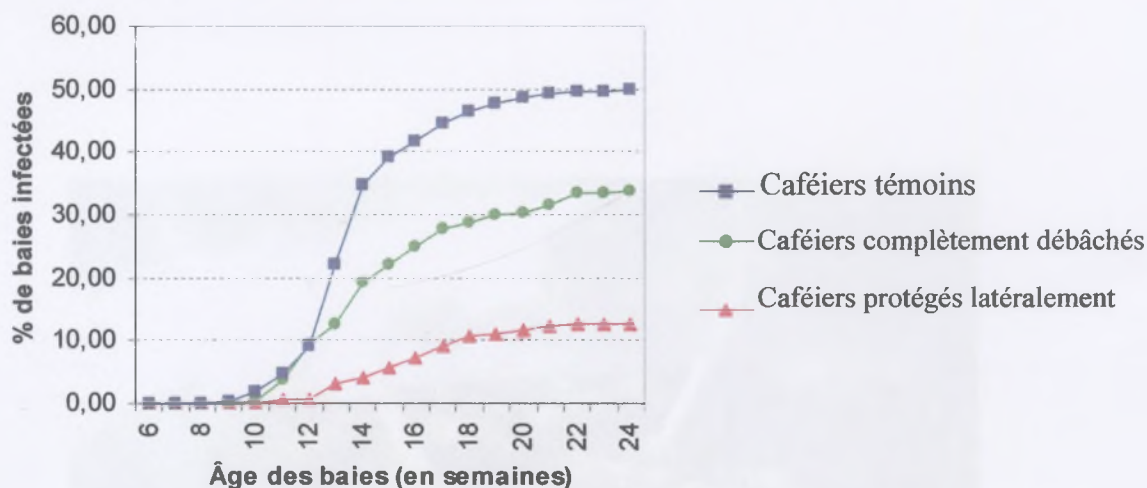


Figure 6.3. Courbes d'évolution du CBD en fonction de la protection des caféiers contre la pluie en 2005

6.4. Discussion

L'anthracnose des baies ne se développe quasiment pas sur les caféiers intégralement protégés de la pluie pendant toute la campagne. Ce résultat met en évidence le rôle hautement déterminant de la pluie sur le développement des épidémies d'anthracnose sur les plantes cultivées. Après la récolte en début de saison sèche, *C. kahawae* survit sur les branches et les baies momifiées des caféiers (Nutman et Roberts, 1960; Muller, 1980). La reprise de son parasitisme dépendra de son aptitude en saison favorable, à initier des appressoria lui permettant de s'établir dans les cellules des jeunes fruits. Toutefois, la germination des conidies et la formation des appressoria reste favorisée par des humidités relatives proches de la saturation (Emmet et Parbery, 1975 ; Estrada *et al.* 1993), et par la présence de l'eau libre (Green et Bailey, 2000). De telles conditions hygrométriques ne surviennent que très rarement dans l'environnement des caféiers sous abris bâchés, ce qui ne favorise pas la croissance de l'agent pathogène issu de l'inoculum résiduel des épidémies précédentes. Il en résulte ainsi une réduction considérable de la quantité de conidies viables susceptibles d'infecter les baies



Photo 6.3. *Baies infectées des branches basse d'un caféier protégé de la pluie – Bafou 2004*

nouvellement formées. La protection des plantes contre la pluie à l'aide des bâches plastiques s'est toujours révélée très efficace pour le contrôle de nombreuses mycoses des organes aériens des plantes. Sur le manguier, cette pratique empêche l'émergence des lésions d'anthracnose dues à *Colletotrichum gloeosporioides* sur les feuilles, les rameaux et les inflorescences (Fitzell et Peack, 1984). Sur les bananiers, le gainage des régimes avant l'anthèse réduit considérablement le niveau de contamination des fruits par *Colletotrichum musae* (Mouen Bedimo *et al.*, 2003). De même, le bâchage des cerisiers assure un contrôle efficace des pourritures de fruits dues au complexe parasitaire constitué par *Monilinia laxa*, *Botrytis cinerea*, *Mucor piriformis* et *Colletotrichum gloeosporioides* (Børve et Stensvand, 2003).

La dispersion de la maladie par « *splashing* » implique la libération des conidies par l'impact des gouttes de pluies sur les acervules des lésions d'anthracnose, leur transport par les gouttelettes de pluie et leur dépôt sur des tissus sains (Campbell et Madden, 1990). Ce phénomène de dispersion ne peut en aucune manière concerner les caféiers intégralement protégés de la pluie car les bâches plastiques constituent une véritable barrière physique vis-à-vis des mouvements des conidies au sein de la parcelle, pendant la saison pluvieuse. Les rares infections de CBD observées sur les caféiers protégés de la pluie étaient surtout localisées vers les branches basses, très proches de l'ouverture au bas des abris bâchés pour permettre l'aération des caféiers (photo 6.2a et 6.3). Par temps orageux, cette ouverture constitue une porte d'entrée pour les fines gouttelettes de pluie qui favorisent le développement de l'agent pathogène sur quelques baies des branches basses. Les branches de la canopée sont en permanence hors de portée de ces gouttelettes de pluie ; d'où le gradient descendant de sévérité de la maladie observé sur les caféiers bâchés, contrairement aux caféiers témoins qui ont toujours présenté un gradient d'infection ascendant à Bafou (cf. chapitres 3).

Nos résultats montrent clairement que la protection intégrale des caféiers vis-à-vis de la pluie en 2004, a eu un effet assez restrictif sur le développement de la maladie en 2005. Les caféiers témoins ont présenté un taux de baies infectées équivalant au double de celui des caféiers complètement débâchés, et au triple de celui des caféiers bâchés latéralement. Ces résultats seraient le fait d'une faible pression infectieuse de l'inoculum primaire sur les jeunes baies des caféiers étudiés en 2005. La pression infectieuse pourrait être déterminée par la quantité de conidies aptes à infecter les baies pendant leur période de sensibilité à la maladie. Dans le cas de la présente étude, cette pression est survenue entre la 8^{ème} et la 21^{ème} semaine après la

floraison. Cependant en 2004, la quasi absence de la maladie sur les caféiers intégralement protégés de la pluie aurait considérablement diminué la quantité d'inoculum primaire sur les caféiers complètement débâchés, au début de la campagne 2005. De plus, il est probable que les conditions hygrométriques adverses au sein des abris bâchés, pendant toute l'année 2004, aient contribué à réduire la viabilité de nombreuses conidies de *C. kahawae*. Les travaux effectués sur l'anthracnose des Citrus ont montré que les conidies de *C. gloeosporioides* perdent rapidement leur viabilité lorsqu'elles sont exposées à de longues périodes sèches (Denham et Waller, 1981 ; Estrada et *al.*, 1993).

Le bâchage latéral des caféiers limite grandement, la contamination des baies par l'inoculum provenant des caféiers avoisinants (allo-inoculum). Ainsi en 2005, les baies des caféiers bâchés latéralement sont principalement contaminées par leur auto-inoculum. Le niveau d'infection relativement bas de ces caféiers montre que la pression infectieuse de cet auto-inoculum reste tributaire de l'arrière-effet du bâchage des caféiers en 2004. Les baies des caféiers complètement débâchés sont deux fois plus attaquées par *C. kahawae* que celles des caféiers bâchés latéralement. En effet, ces baies sont exposées à une double contamination : celle d'un auto-inoculum similaire à celui des caféiers bâchés latéralement en 2005 et celle de l'allo-inoculum issu des caféiers fortement attaqués par le CBD pendant les deux années d'expérimentation. Ce résultat montre l'importance de l'allo-inoculum dans la contamination des baies par *C. kahawae* et confirme la dissémination latérale de la maladie à l'échelle de la parcelle (Mouen Bedimo et *al.*, publication en cours).

Cette étude montre que la pluie est l'un des facteurs physiques les plus déterminants pour le développement de l'anthracnose des baies du caféier arabica. Elle favorise l'émergence des conditions optimales (T° et HR) pour la croissance de *C. kahawae* et demeure l'agent principal de dispersion du CBD au champ. Par ailleurs, un contrôle efficace de la maladie au cours d'une année donnée peut fortement diminuer la quantité l'inoculum primaire au début du cycle épidémique suivant ; ce qui peut ultérieurement aider à maintenir le taux d'infection des baies à un niveau relativement bas.

CHAPITRE 7 :

ANALYSE DE L'EFFET DE L'OMBRAJE A L'AIDE D'UN ÉCRAN ARTIFICIEL

7.1. Introduction

Le caféier arabica est une plante ombrophile dans son biotope naturel, (Muschler, 2004). Sa domestication a nécessité la mise en place de plantes d'ombrage telles que celles du genre *Leucaena*, *Albizzia*, ou *Acacia*, pour assurer son développement adéquat dans les nouvelles aires de culture. Dans les petites exploitations familiales, les plantes d'ombrage sont essentiellement constituées d'arbres fruitiers divers plantés aléatoirement au sein des caféières et qui couvrent les caféiers de manière assez hétérogène. Ces plantes peuvent limiter le développement des maladies comme la rouille orangée (Avelino *et al.*, 2003) ou le CBD (Phiri *et al.*, 2001). Au chapitre 4, nous avons montré que les arbres d'ombrage disposés au sein des caféières permettent de réduire significativement les pertes de récoltes dues à l'anthracnose des baies. Deux hypothèses ont été émises pour tenter d'expliquer ce résultat : premièrement, les arbres d'ombrage constituent une entrave physique à la dispersion efficace des conidies de *C. kahawae* sur les caféiers ; deuxièmement, les arbres d'ombrage pourraient influencer la physiologie des baies et par voie de conséquence, sur leur réceptivité vis-à-vis de *C. kahawae*. La vérification de ces hypothèses nécessite d'une part, une maîtrise des conditions d'ombrage afin que tous les caféiers étudiés au champ soient disposés sous un ombrage de même envergure et de même densité. D'autre part, elle implique un suivi des infections des baies (à l'ombre ou au soleil), dans des conditions constantes du milieu afin de déterminer l'impact spécifique de l'ombrage sur leur sensibilité intrinsèque vis-à-vis de *C. kahawae*. C'est ainsi qu'un suivi épidémiologique de la maladie effectué en 2005 à Bafou, a permis de comparer les niveaux d'infection des caféiers disposés sous une toile d'ombrière à ceux des caféiers témoins exposés au soleil. Cette étude a été conduite concomitamment avec des inoculations artificielles sur les baies détachées de ces différents caféiers, au laboratoire. Ces deux expérimentations permettront d'évaluer l'effet de l'ombrage permanent et homogène sur le développement du CBD, en zone de très forte pression infectieuse. Elles permettront également de déterminer cet effet sur la sensibilité intrinsèque des baies à la maladie, en tenant compte de la position des rameaux sur le caféier.



7.1. Caféiers couverts individuellement par la toile d'ombrière

7.2. Matériel et méthodes

7.2.1. Matériel végétal

Trente quatre caféiers ont été identifiés au sein d'une plantation constituée de caféiers sensibles au CBD (variété Jamaïque). La moitié de ces caféiers ont été placés individuellement sous un ombrage artificiel permanent, obtenu à partir d'une toile d'ombrière noire à mailles réguliers (photo 7.1). Chacun des dix sept autres caféiers était disposé en plein soleil, à proximité immédiate d'un caféier sous ombrage artificiel. Trente deux caféiers dont 16 sous ombrage et 16 témoins, ont été utilisés pour le suivi épidémiologique de la maladie en champ. Trois rameaux plagiotropes présentant au moins cinq glomérules ont été marqués sur chacun de ces caféiers; soit un rameau à l'étage supérieur du plant, un à l'étage médian et un à l'étage inférieur.

Deux caféiers dont un situé sous ombrage artificiel et un caféier témoin exposé au soleil ont spécialement été réservés pour le prélèvement des baies vertes, en vue des inoculations artificielles au laboratoire. Ces prélèvements ont été effectués sur trois étages des caféiers (en haut, au milieu et en bas), à la 12^{ème}, 16^{ème}, 18^{ème} et 22^{ème} semaine après la floraison. A chaque passage, 75 baies ont été prélevées par étage, soit 375 baies par arbre. Des témoins ont été introduits pour vérifier la validité des inoculations. Les baies ont été prélevées sur la variété *Java*, tolérante au champ et sur la variété *Caturra*, très sensible. Ces prélèvements ont été effectués sur des plants cultivés au soleil, dans la collection variétale de la station IRAD de Santa (Nord-Ouest Cameroun).

L'entretien de ces caféiers *Jamaïque* a nécessité les opérations agricoles suivantes :

- a) une taille effectuée en janvier 2005 qui a permis de supprimer les branches mortes et improductives et de favoriser l'initiation de nouvelles branches fructifères ;
- b) deux désherbages chimiques avec le Glyphosate (Roundup 360), à la dose de 2,4 l /ha. Le premier désherbage a été effectué à la mi- avril 2005, et le second en fin juin 2005 ;
- c). une fertilisation réalisée avec un engrais minéral (N-P-K/20-10-10) appliqué à la dose de 200g/pied, soit 220 kg/ha. Cette fertilisation a été effectuée à la mi-avril 2005.

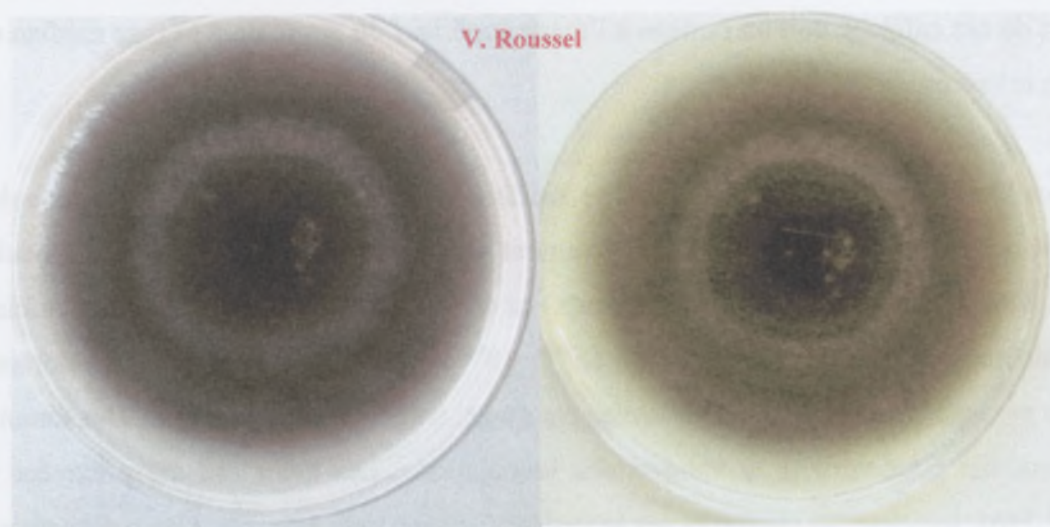


Photo 7.2. *Faciès cultural d'un isolat de Colletotrichum kahawae sur le milieu PDA (Potato-Dextrose-Agar)*

7.2.2. Agent phytopathogène et technique d'inoculation

L'isolat de *C. kahawae* utilisé dans cette étude, a été obtenu à partir des baies infectées d'un caféier de la parcelle de Bafou (cf. paragraphe 2.1). Il a été purifié à l'aide d'une culture monoconidie en boîte de pétri, réalisée sur le milieu PDA (Potato-Dextrose-Agar). Cet isolat était caractérisé par une croissance radiale relativement lente et un mycélium aérien laineux de couleur gris-foncé (photo 7.2). Sa pathogénicité a préalablement été testée sur les baies détachées avant son utilisation en routine pour les inoculations artificielles proprement dites. L'inoculum a consisté en un filtrat de la suspension de conidies obtenue à partir du grattage des cultures pures imbibées d'eau distillée stérile de cet isolat. Il a été calibré à 10^6 conidies/ml avant les inoculations.

Les baies prélevées sur chaque étage des quatre caféiers étudiés ont été réparties dans cinq boîtes de pétri tapissées d'un papier buvard imbibé d'eau distillée stérile, à raison de 25 baies par boîte (photo 7.3). Soit cinq répétitions de 25 baies par étage. Une goutte d'inoculum de 10µl a ensuite été déposée sur chacune de ces baies à l'aide d'une micropipette. Après ces inoculations, les baies ont été mises en incubation dans une enceinte climatique (phytotron) réglée à une température de 21°C et à une photopériode de 12h/12h. Quatre séries d'inoculations ont été réalisées avec des baies de la 12^{ème}, 16^{ème}, 18^{ème} et 22^{ème} semaine après la floraison.

7.2.3. Dispositifs expérimentaux et observations

7.2.3.1. Expérimentation au champ

Cette étude a été conduite suivant un dispositif expérimental plurifactoriel (deux facteurs) en Split-plot qui comporte 16 répétitions. Le facteur principal représenté par le type d'éclairement des caféiers comprend deux modalités : les caféiers couverts par la toile d'ombrière et les caféiers témoins situés en plein soleil. Le facteur secondaire correspondant à la position des différents étages sur les caféiers comprend trois modalités : l'étage supérieur constitué des rameaux proches de la canopée, l'étage intermédiaire sur lequel sont disposés les rameaux médians des caféiers et l'étage inférieur qui comprend les rameaux proches du sol. Chaque caféier constitue une répétition.



I. Njiayouom

Photo 7.3. *Disposition des baies dans une boîte de pétri pour les inoculations artificielles*



I. Njiayouom

a) Baies de var. Jamaïque à l'ombre



I. Njiayouom

b) Baies de var. Catura (témoin sensible)

Photo 7.4. *Symptômes de CBD après les inoculations artificielles*

Les observations hebdomadaires ont été effectuées sur les rameaux marqués, de la 6^{ème} à la 24^{ème} semaine après la floraison (du 27 Avril au 25 août 2005), soit 19 observations au total.

Elles ont consisté au comptage du :

- nombre total des baies (**Btot**),
- nombre de nouvelles baies malades et leur marquage par de petites étiquettes (**Bmal**)
- d'anciennes baies malades (baies marquées) (**Bmarq**).

7.2.3.2. Expérimentation au laboratoire

Trois facteurs principaux ont été étudiés au cours de la présente expérimentation :

- a. L'origine des baies artificiellement contaminées. Ce facteur comprend quatre modalités : le caféier sous ombrage, le caféier au soleil, le caféier Java (témoin tolérant) et le caféier Cattura (témoin sensible). Les baies des caféiers témoins permettent de contrôler d'éventuels écarts de sensibilité des baies situées sous ombrage ou au soleil. Les deux caféiers témoins sont exposés au soleil.
- b. L'étage des caféiers. Ce facteur est constitué de trois modalités qui correspondent aux trois étages des caféiers sur lesquels les baies ont été prélevées (en haut, au milieu et en bas).
- c. L'âge des baies lors de l'inoculation artificielle.

Les observations ont débuté 24 heures après les inoculations et se sont poursuivies pendant dix jours successifs. Le délai de dix jours d'observations permet de limiter les risques de confusion des symptômes du CBD avec les infections des champignons opportunistes comme *Pestalotia spp.* Ainsi, les observations journalières ont consisté à compter le nombre total de baies malades dans chaque boîte de pétri (photo 7.4).

7.2.4. Evaluation des pertes de récoltes

Pour chaque caféier étudié, les différentes pertes de récolte ont été estimées par :

a) *le pourcentage des pertes totales (P_{tot})* qui exprime l'ensemble des pertes dues au CBD ou non, enregistrées au cours d'une année. Il est calculé par la formule :

$$P_{tot} = \frac{B_{tot_1} - (B_{tot_n} - B_{maq_n} - B_{mal_n})}{B_{tot_1}} * 100$$

Où

B_{tot₁} désigne le nombre total des baies à la première observation et l'expression **(B_{tot_n} - B_{maq_n} - B_{mal_n})** le nombre de baies saines à la dernière semaine d'observations. Les termes **B_{tot_n}**, **B_{maq_n}** et **B_{mal_n}** représentent respectivement le nombre total de baies, le nombre total de baies malades marquées et le nombre total de nouvelles baies infectées à la dernière observation.

b) *le pourcentage de baies malades (P_{mal})* qui est le rapport entre la somme des nouvelles baies malades comptabilisées pendant toutes les semaines d'observations ($\sum B_{mal_{1-n}}$) et le nombre initial de baies (**B_{tot₁}**).

$$P_{mal} = \frac{\sum B_{mal_{1-n}}}{B_{tot_1}} * 100$$

c) *le pourcentage des pertes non dues au CBD (P_{chutes})* qui est exprimé par la différence entre les pertes totales et les pertes dues au CBD (**P_{pert} - P_{mal}**). Ces pertes seront dénommées « chutes physiologiques » car elles sont principalement dues aux chutes des baies apparemment saines.

7.2.5. Evaluation de la sensibilité des baies *in vitro*

Les données recueillies nous ont permis de calculer le taux d'infection des baies (**T_{x_{inf}}**) et l'indice de précocité de l'infection (**I_{nd_p}**), par boîte de pétri. Le taux d'infection correspond au pourcentage d'inoculations réussies au dixième jour d'observation. Il est obtenu par la formule suivante :

$$T_{x_{inf}} = \frac{B_{mal_{10}} * 100}{N}$$

Où **Bmal₁₀** représente le nombre total de baies malades comptabilisées dans la boîte de pétri au 10^{ème} jour d'observation et N nombre total de baies inoculées (N=25 ; cf. paragraphe 7.2.2).

L'indice de précocité de l'infection est une estimation de la vitesse d'apparition des symptômes après les inoculations. Il est calculé par la formule ci-après, inspirée de celle utilisée par Reddy *et al.* (2003), pour le calcul de l'indice de précocité de production des manguiers :

$$\text{Ind}_p = \frac{(6X_5 + 5X_6 + 4X_7 + 3X_8 + 2X_9 + X_{10})}{6(\sum N_{\text{mal}})}$$

Les variables $X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}$ représentent respectivement le nombre de nouvelles baies présentant des symptômes au 5^{ème}, 6^{ème}, 7^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} jour après l'inoculation car les premiers symptômes apparaissent sur les baies les plus sensibles, au cinquième jour d'observation. Les coefficients 6, 5, 4, 3, 2 et 1 qui correspondent une suite arithmétique de raison -1 (moins un), ont été attribués dans cet ordre à chaque variable X_{i+1} , afin de donner plus de poids aux baies précocement attaquées. Le terme $\sum N_{\text{mal}}$ est la somme de nouvelles baies malades comptabilisées entre le 5^{ème} et le 10^{ème} jour d'observation. Ce terme est en réalité l'équivalent de la variable **Bmal₁₀** utilisée pour le calcul du taux d'infection. L'indice de précocité de l'infection (**Ind_p**) sera égal 1 (un) si toutes les baies infectées sont comptabilisées au cinquième jour d'observation. Il sera égal 0,16667, soit un sixième si toutes les baies inoculées ne présentent des symptômes qu'au dixième jour d'observation.

7.2.6. Analyses statistiques

Toutes les données exprimées en pourcentages ont été transformées en $\arcsin\sqrt{x}$ afin de se conformer aux conditions d'application de l'analyse de la variance. L'analyse de variances a été effectuée avec la procédure **GLM** (General Linear Model) de la version 9.1 du logiciel **S.A.S** (Statistical Analysis System). La comparaison des moyennes entre les facteurs étudiés a été effectuée avec le test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5%.

7.3. Résultats

7.3.1. Caractérisation des pertes de récoltes

Tableau 7.1. *Analyse de la variance des pertes dues au CBD et celles dues aux chutes physiologiques*

Source de variation	DDL	Pertes dues au CBD		Chutes physiologiques	
		Test F	Pr > F	Test F	Pr > F
Eclairement des caféiers	1	17,31	< 0,0001	0,25	0,6183
Position des branches	2	3,10	0,0499	0,46	0,6327
Eclairement x Position	2	1,45	0,2402	0,77	0,4674
Erreur	90	-	-	-	-

Les pertes dues au CBD varient de façon hautement significative ($p < 0,0001$) en fonction de l'ombrage des caféiers. De même, ces pertes diffèrent significativement ($p = 0,0499$) suivant les étages, quel que soit l'ombrage des caféiers. Par contre, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les facteurs étudiés, en ce qui concerne les pertes dues aux chutes physiologiques (tableau 7.1).

Tableau 7.2. *Comparaison des moyennes des pertes de récolte en fonction de l'ombrage des caféiers et de la position de leurs branches*

Paramètres étudiés	Modalités	Pertes dues au CBD	Chutes physiologiques
Eclairement des caféiers	Caféiers sous la toile	29,56 b	32,56 a
	Caféiers au soleil	49,89 a	35,37 a
Position des branches sur le caféier	Branches hautes	44,22 a	34,51 a
	Branches médianes	42,34 a	36,80 a
	Branches basses	32,61 b	30,59 a

Le taux d'infection des caféiers situés sous l'ombrage artificiel, estimé à 30% de baies malades, est nettement moins élevé que celui des caféiers sans ombrage, qui ont présenté 50% de baies malades environ (tableau 7.2). Par ailleurs, les baies des branches basses des caféiers sont significativement moins attaquées que celles des branches médianes et hautes, qui font partie du même groupe homogène de moyennes (tableau 7.2).

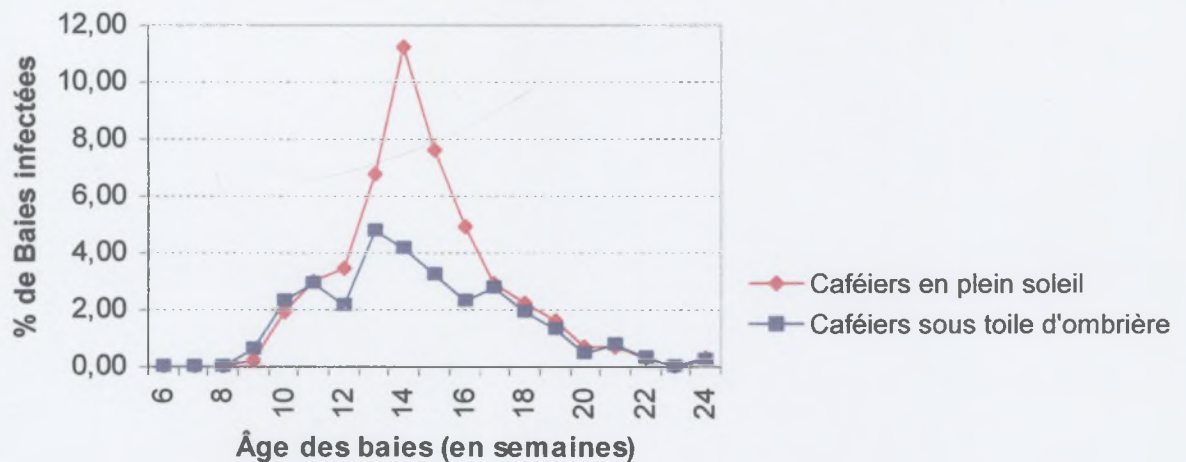


Figure 7.1. Evolution temporelle de nouvelles baies malades en fonction de l'ombrage des caféiers (année 2005)

La figure 7.1 montre que les premières baies malades ont été observées à la 9^{ème} semaine après la floraison, quel que soit l'ombrage des caféiers. Ensuite, le taux de nouvelles infections a progressé de la même manière à l'ombre et au soleil jusqu'à la 11^{ème} semaine où environ 3% de nouvelles infections ont été enregistrées sur tous les caféiers. Entre la 12^{ème} et la 16^{ème} semaine après la floraison, les nouvelles infections observées sur les caféiers au soleil ont été nettement plus importantes que celles des caféiers situés sous la toile d'ombrière. Le pic de la maladie a été atteint à la 14^{ème} semaine, avec environ 11% de nouvelles baies malades observées sur les caféiers exposés au soleil. Ce taux de maladie correspondait au double de celui enregistré sur les caféiers situés sous la toile d'ombrière. Tous les caféiers ont présenté le même taux de nouvelles infections entre la 17^{ème} et la 24^{ème} semaine, quel que soit leur ombrage. Les nouvelles infections ont considérablement diminué (moins de 1%) à partir de la 20^{ème} semaine après la floraison.

7.3.2. Développement de la maladie sur les baies contaminées artificiellement au laboratoire

Tableau 7.3. Analyse de variance du niveau d'infection et de l'indice de précocité de la maladie

Source de variation	DDL	Taux d'infection		Précocité de l'infection	
		Test F	Pr > F	Test F	Pr > F
Type de caféiers	3	109,74	< 0,0001	123,64	< 0,0001
Etage des caféiers	2	218,90	< 0,0001	35,31	< 0,0001
Âge des baies	3	162,00	< 0,0001	65,29	< 0,0001
Caféiers*Etage	6	10,41	< 0,0001	8,61	< 0,0001
Caféier*Âge des baies	9	11,96	< 0,0001	22,82	< 0,0001
Etage*Âge des baies	6	2,17	0,479	6,38	< 0,0001
Coefficient de variation		13,79%		13,86%	

Les résultats d'analyses de variances (tableau 7.3) montrent que tous les facteurs principaux étudiés (les caféiers, leurs étages et l'âge des baies) ont un effet hautement significatif ($p < 0,0001$) sur le taux d'infection et sur l'indice de précocité de la maladie. Il en est de même pour les différentes interactions entre ces facteurs. Toutefois, l'effet des facteurs principaux reste hautement prépondérant, compte tenu des grandes valeurs du test F qui sont parfois plus de dix fois supérieures à celles des interactions.

D'après le test de Student-Newman-Keuls, la maladie a été significativement plus sévère et plus précoce sur les baies du caféier *Cattura* (témoin sensible) que sur celles de tous les autres caféiers. Le taux d'infection le plus faible et l'indice de précocité le plus bas ont été observés sur les baies du caféier *Java* (témoin tolérant). Les baies du caféier situé sous ombrage artificiel ont présenté un niveau de maladie et un indice de précocité intermédiaires, qui sont statistiquement équivalents à ceux des baies du caféier exposé au soleil. Ce test de séparation des moyennes a en outre mis en évidence, des gradients de sévérité et de précocité ascendants de la maladie en fonction des étages des caféiers. Toutefois, la sensibilité des baies a fortement varié au cours du temps, le taux d'infection et l'indice de précocité les moins élevés ayant été observés à la 22^{ème} semaine après la floraison (tableau 7.4).

Tableau 7.4. Moyennes du niveau d'infection et de l'indice de précocité par type de caféier, par étage et par âge des baies

Paramètres étudiés	Modalités	Taux d'infection	Précocité de l'infection
Type de caféiers	Variété <i>Cattura</i> (témoin)	75,800 a	0,588 a
	Var. <i>Jamaïque</i> sous ombrage	59,923 b	0,471 b
	Var. <i>Jamaïque</i> au soleil	58,305 b	0,470 b
	Variété <i>Java</i> (témoin)	41,695 c	0,358 c
Position des branches sur le caféier	Branches hautes	74,880 a	0,517 a
	Branches médianes	59,117 b	0,467 b
	Branches basses	43,538 c	0,434 c
Âge des baies	12 ^{ème} semaine	59,649 b	0,463 c
	16 ^{ème} semaine	67,579 b	0,473 b
	18 ^{ème} semaine	74,596 a	0,560 a
	22 ^{ème} semaine	34,915 c	0,395 d

Les baies du caféier exposé au soleil ont présenté les mêmes taux d'infection que celles du caféier ombragé, pendant les trois premières séries d'inoculations artificielles (figure 7.2). Cependant, à la 22^{ème} semaine après la floraison, les baies issues du caféier au soleil se sont montrées plus sensibles au CBD que celles provenant du caféier ombragé. Les baies du témoin sensible au CBD (caféier *Cattura*) ont été plus attaquées que celles de tous les autres caféiers à la 16^{ème} et à la 22^{ème} semaine. Elles ont présenté le même taux d'infection que les baies des caféiers à l'ombre et au soleil, à la 12^{ème} et 18^{ème} semaine après la floraison. Les plus faibles taux d'infection ont été observés sur les baies du témoin tolérant à la maladie (caféier *Java*), à chaque série d'inoculations artificielles. Toutefois, les baies de ce témoin et celles du caféier ombragé ont présenté le même taux d'infection à la suite des inoculations réalisées à la 22^{ème} semaine après la floraison (figure 7.2).

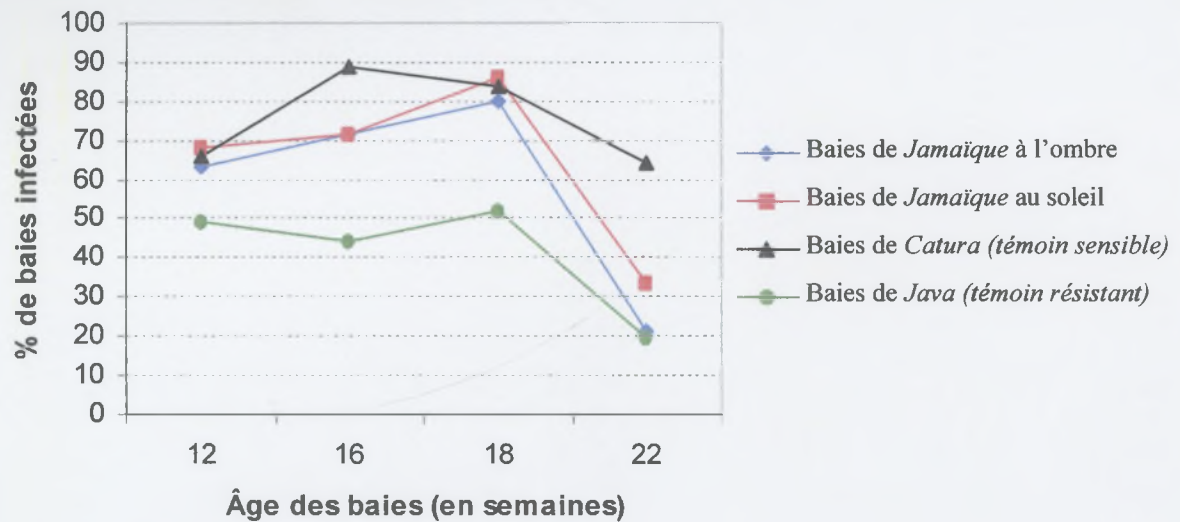


Figure 7.2. Taux d'infection des baies en fonction des caféiers, à différentes dates d'inoculations artificielles.

La sensibilité des baies à la maladie varie suivant un gradient ascendant en fonction de la position des branches sur le caféier, quels que soient leur âge et l'ombrage du caféier sur lequel elles ont été prélevées. (figures 7.3a et 7.3b). Toutefois, la figure 7.3a montre que les baies de la 12^{ème} semaine prélevées des branches hautes et médianes du caféier ombragé ont présenté le même niveau de sensibilité à la maladie. Toutes les baies des branches hautes du caféier au soleil ont été attaquées à la suite des inoculations artificielles réalisées à la 12^{ème} semaine après la floraison.

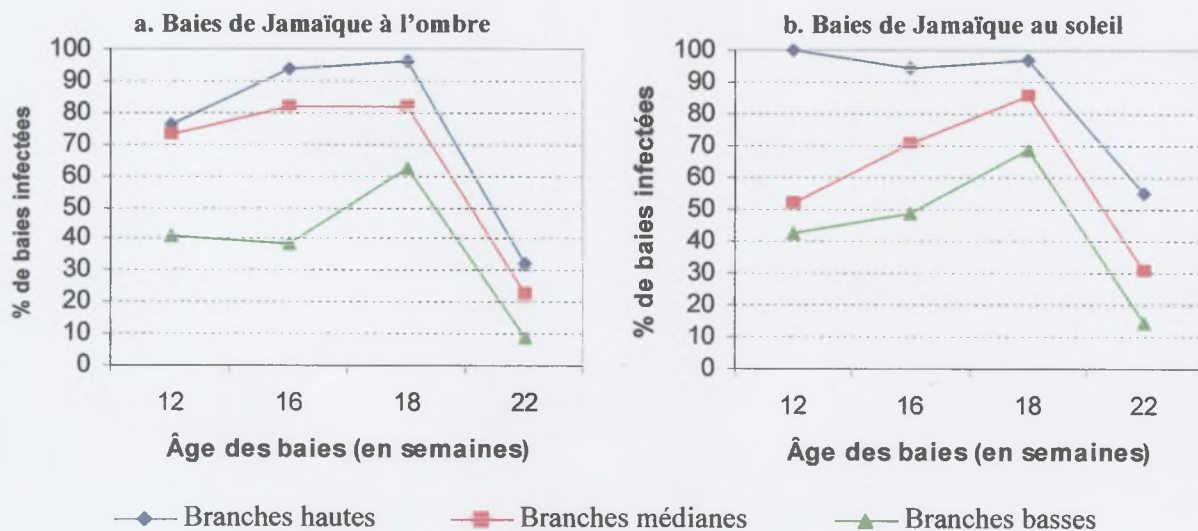


Figure 7.3. Taux d'infection des baies en fonction des étages, à différentes dates d'inoculations artificielles (caféier à l'ombre et au soleil).



7.4. Discussion

L'ombrage artificiel mis en place sur les caféiers a considérablement modifié les diverses interactions entre *C. kahawae*, les caféiers et le climat ; ce qui a contribué à créer des conditions micro-environnementales susceptibles de réduire le développement du CBD. C'est ainsi que le suivi épidémiologique de la maladie en champ a montré que les caféiers sans ombrage sont plus sévèrement attaqués que les caféiers couverts par de la toile d'ombrière. Par contre, les résultats obtenus à la suite des inoculations artificielles sur baies détachées ont montré que la sensibilité intrinsèque des baies à la maladie est identique sur les caféiers situés sous ombrage ou exposés au plein soleil (figure 2). Ainsi, l'ombrage ne semble pas induire des modifications sur la sensibilité intrinsèque des baies. Les différents résultats obtenus montrent l'incidence prépondérante des plantes d'ombrage sur les interactions entre l'agent pathogène et le climat dans le pathosystème *C. kahawae/Coffea arabica*. Ils confirment aussi l'hypothèse de " l'effet barrière " des plantes d'ombrage par rapport à la dispersion du CBD (Phiri *et al.*, 1999). Des études récentes conduites dans les plantations de caféiers arabica au Costa Rica ont démontré que la maturation des baies survient plus rapidement sur les caféiers disposés en plein soleil que sur les caféiers ombragés (Vaast *et al.*, 2006). Mais, nos résultats montrent que cette action de l'ombrage sur la croissance physiologique des baies n'affecte pas leur réceptivité vis-à-vis des agressions de l'agent pathogène.

En champ ou au laboratoire, la sensibilité des baies au cours du temps a varié de la même manière, quelle que soit la position des caféiers par rapport à l'ombrage (figures 1 et 2). Le pic de sensibilité des baies contaminées artificiellement a été observé à la 18^{ème} semaine après la floraison alors que le maximum de nouvelles infections au champ a été observé à la 14^{ème} semaine après la floraison. Ceci amène à supposer que le pic épidémique du CBD ne coïncide pas nécessairement avec la date exacte de la sensibilité maximale des baies. Il pourrait survenir à la faveur d'une pression maximale de l'inoculum, à n'importe quel moment de la phase de sensibilité des baies. Les résultats obtenus au champ montrent que les baies sont sensibles au CBD entre la 10^{ème} et la 20^{ème} semaine après la floraison. Dans le cas des épidémies polycycliques comme celles de CBD, la pression de l'inoculum dans une plantation augmente en fonction des nouveaux organes contagieux, en particulier lorsque les paramètres de fructification et de dispersion de l'agent pathogène sont optimaux (Zadocks et Schein, 1979 ; Rappilly, 1991). Ainsi, cette pression de l'inoculum demeure très dépendante des facteurs climatiques tels que la température, l'humidité relative et la pluie (Timmer *et al.*,

2000 ; Agostini *et al.*, 2003 ; Paul, *et al.*, 2004 ; Mila *et al.*, 2005). La pression infectieuse de *C. kahawae* n'a pas encore été évaluée sur les baies du caféier arabica au cours de leur développement comme cela a été signalé pour le cas de *Colletotrichum musae* sur les bananes (de Lapeyre de Bellaire et Mourichon, 1997).

Les observations effectuées au champ ont montré qu'il existe un gradient de sévérité ascendant de la maladie, quel que soit l'ombrage des caféiers. Ce gradient serait le fait d'une dispersion plus efficace des conidies de *C. kahawae*, sur les baies de la canopée des caféiers par rapport à celles des étages sous-jacents (Mouen Bedimo *et al.*, publication en cours). Le même type de gradient a été mis en évidence pour la sensibilité intrinsèque des baies, à la suite des inoculations artificielles réalisées *in vitro*. Ce résultat confirme la distribution de la maladie à l'échelle du caféier, telle que révélée par les observations effectuées au champ. Mais, il montre aussi que les baies des branches hautes seraient naturellement plus réceptives aux agressions de *C. kahawae* que celles des branches basses.

La précocité des infections sur les baies contaminées varie suivant leur sensibilité vis-à-vis de *C. kahawae*. La période d'incubation du CBD *in vitro* est comprise entre 4 et 8 jours pour les baies du caféier très sensibles à la maladie (Caturra), et entre 6 et plus d'une dizaine de jours pour les baies du caféier tolérant (Java). De plus, les inoculations artificielles ont confirmé la grande sensibilité des baies de la variété Caturra au CBD et la tolérance de celles de la variété Java vis-à-vis de cette maladie. Ceci atteste de la validité de nos tests de sensibilité intrinsèque des baies *in vitro*.

La présente étude confirme que les plantes d'ombrage associées aux caféiers réduisent considérablement les pertes dues au CBD (cf. chapitre 4). Elles constituent un obstacle physique pour une dispersion efficace de l'agent pathogène sur les caféiers. Elle permet en outre de démontrer que les plantes d'ombrage n'ont aucune incidence sur la sensibilité intrinsèque des baies au CBD. La variation de la sensibilité des baies a plutôt été observée à l'échelle du caféier, quelle que soit sa position par rapport à l'ombrage, les baies de la canopée étant plus sensibles que celles des étages inférieurs du caféier.

CONCLUSION

CONCLUSION

I. Caractéristiques des épidémies de CBD

L'épidémiologie du CBD présente des particularités liées à la biologie de *C. kahawae*. Cet agent pathogène se développe préférentiellement dans les régions d'altitude à pluviométrie élevée et à températures modérées. Son aptitude au parasitisme est limitée aux jeunes baies de café pendant une quinzaine de semaines. Il survit pendant une longue période (12 à 16 semaines) entre deux cycles de fructification, sous une forme de conservation non définie jusqu'à présent. Les épidémies démarrent par conséquent à partir d'un inoculum primaire mal connu. La quantité de cet inoculum est l'un des facteurs déterminants du niveau maximal de la maladie au cours d'une saison donnée. Les épidémies sont également très dépendantes des variations climatiques. En régions d'altitude, la sévérité de cette maladie augmente lorsque les températures (max. ou min.) diminuent et vice-versa. Les premiers symptômes apparaissent au début de la saison pluvieuse. De plus, les pluies sont nécessaires pour libérer et disséminer les conidies de l'agent pathogène.

La suppression des baies momifiées et des branches mortes avant la floraison ne permet pas de stopper le développement d'une nouvelle épidémie. Ceci implique que le parasite ne survit pas uniquement dans ce type d'organes. Ainsi, le problème de l'origine et de la conservation de l'inoculum primaire reste toujours non résolu, nos observations n'ayant pas permis de les identifier formellement.

Au Cameroun, le l'épidémie progresse au cours du temps suivant une courbe sigmoïde qui s'ajuste bien par un modèle de régression logistique. Ceci indique qu'il existe trois principales séquences dans la progression temporelle de l'épidémie : une phase de progression lente après l'apparition des premières baies infectées, une phase de développement exponentiel et une phase de stabilisation dès l'atteinte du niveau maximal d'infections. Cette courbe épidémique est généralement observée dans les régions où il n'existe qu'un seul cycle annuel de fructification et une floraison pratiquement synchrone des caféiers. Il est fort probable qu'elle décrive un double « S » dans les régions où les caféiers présentent deux cycles annuels de fructification. A l'échelle de la parcelle, les foyers d'infection apparaissent une à deux semaines après le démarrage de la maladie et disparaissent au moment de sa progression maximale, pendant la phase exponentielle. Le foyer d'infection est défini par d'Arcy *et al.*

(2001) comme un petit groupe de plantes malades au sein d'une population, ce groupe constituant le premier point de départ de l'épidémie dans la parcelle. Cette définition, contrairement à celle de Sache (2003), ne tient pas compte de la dépendance spatiale entre les plants infectés, qui est une indication de la progression de la maladie au sein de la parcelle. Les analyses géostatistiques effectuées dans notre étude montrent qu'à échelle de la parcelle, les foyers d'infection (*sensu* Sache) n'apparaissent pas nécessairement dès le début de la maladie. Ceci rend leur identification précoce très difficile. Certains de ces foyers apparaissent aux mêmes endroits de la parcelle chaque année, ce qui peut constituer un indice important pour les futures études sur l'origine et la conservation de l'inoculum primaire.

Les principaux résultats obtenus à la suite de nos travaux constituent une avancée majeure dans la compréhension de la progression spatio-temporelle des épidémies de CBD. Ils montrent que ces épidémies présentent de fortes similarités avec celles de certaines maladies des plantes annuelles, du fait de l'interruption du cycle de l'agent pathogène en l'absence d'organes hôtes et de la présence de foyers d'infection. Dans le cas des caféiers ou de plantes annuelles, ces foyers d'infection disparaissent au moment de « l'explosion » de l'épidémie.

II. Conséquences sur la gestion des épidémies

L'apparition précoce des foyers d'infection implique que toutes les opérations agricoles visant à protéger les baies contre les premières infections de CBD, notamment les applications de fongicides, devraient être réalisées juste après la nouaison. Les baies ne présentent pas de symptômes entre la nouaison (4^{ème} semaine) et le début de leur phase d'expansion (8^{ème} semaine), ce qui suppose : (1) qu'elles ne sont vraisemblablement pas réceptives à *C. kahawae*, pendant cette période de leur développement ou (2) qu'elles pourraient héberger l'agent pathogène à l'état quiescent, en attendant les transformations physiologiques qui favoriseraient l'apparition des premiers symptômes vers la 8^{ème} semaine après la floraison. Ce phénomène est bien connu dans le cas des anthracnoses des fruits climactériques comme les bananes (de Lapeyre de Bellaire, 1999), les mangues (Fitzell *et al.*, 1984 ; Dodd *et al.*, 1991) ou les avocats (Coates *et al.*, 1993) sur lesquels l'agent pathogène peut rester quiescent pendant plusieurs mois (Swinburne, 1983 ; Prusky et Plumbey, 1992). La quiescence n'a pas encore été décrite dans le cas du CBD ; toutefois, il importe d'identifier clairement les raisons biologiques ou physiologiques pour lesquelles les baies ne sont pas infectées avant la 8^{ème} semaine après la floraison.

La contamination initiale des baies et la dispersion des conidies lors de la phase active de la maladie apparaissent comme des étapes critiques du cycle épidémique pendant lesquelles les caféiers devraient être rigoureusement protégés contre le CBD. De ce fait, toutes les opérations agricoles consistant à détruire les sources potentielles d'inoculum immédiatement après la récolte permettent de réduire substantiellement les pertes dues au CBD. Il s'agit par exemple de la destruction des baies momifiées et de la taille des branches mortes ou de celles ayant été en production pendant plusieurs années successives.

La culture du caféier arabica sous ombrage peut être considérée comme l'une des pratiques agricoles permettant de limiter la contamination des baies par *C. kahawae*. L'écran physique formé par la canopée des plantes d'ombrage présentes dans les caféières, modifie négativement les paramètres pluviométriques, nécessaires à la dispersion des conidies de l'agent pathogène. Toutefois, cette pratique culturale reste largement insuffisante pour un contrôle efficace du CBD car, elle ne permet qu'une réduction maximale d'environ 24% du taux d'infection, en année de forte incidence de la maladie (2005) (chapitre 4). En revanche, elle pourrait considérablement améliorer la lutte chimique ou la lutte prophylactique. L'architecture des caféiers semble également être un facteur important à prendre en compte dans la gestion des épidémies de CBD car, les baies localisées au niveau de la canopée des caféiers sont plus sévèrement attaquées que celles des branches basses (chapitre 3). Ainsi, la plupart des baies des caféiers en forme de parapluie, généralement disposées vers la canopée, sont très exposées aux contaminations de *C. kahawae*. Par contre, les baies des caféiers présentant une architecture pyramidale sont réparties de manière homogène entre les différents étages, ce qui limite la contamination de toutes celles qui sont portées par des branches situées aux étages inférieurs. Cette observation implique qu'il est important d'insister sur cette partie du caféier lors de la mise en œuvre d'opérations agricoles visant la destruction des sources d'inoculum primaire avant la floraison. De même, il semble nécessaire de la couvrir au mieux lors des applications de fongicides, en cas de l'option d'un contrôle chimique du CBD. Nos résultats ont montré que ces traitements fongicides pourraient être effectués de façon raisonnée, sur la base d'un modèle de prévision de la sévérité de la maladie, à partir des relevés de températures et de pluviométrie. Par exemple, les traitements fongicides devraient être déclenchés à la faveur d'une diminution des températures et/ou d'une augmentation du nombre de jours de pluie. Toutefois, la mise en pratique d'une telle approche exige une connaissance précise des seuils de températures et

ceux du nombre de jours de pluie, occasionnant un taux d'infections critique qui justifie une application de fongicides. Les données climatiques recueillies au cours de nos expérimentations ne sont pas suffisamment précises pour nous permettre de déterminer les valeurs seuils de ces différents paramètres climatiques. L'obtention d'un modèle fiable de prévision des pertes nécessite une étude très fine, pendant plusieurs années successives, des relations entre la maladie et les facteurs climatiques (températures, pluviométrie, humidité, humectation) mesurés sur un pas de temps très court (ex : toutes les heures).

III - Perspectives

Au terme de cette étude, il apparaît que d'importants travaux de recherche devraient être effectués en vue de déterminer les modalités de conservation de *C. kahawae* pendant une très longue période, en l'absence des baies. La connaissance précise de cette phase du cycle de vie du parasite peut conduire à une identification exhaustive des sources d'inoculum primaire qui demeurent le point critique du développement des épidémies de CBD. Le maintien d'un niveau d'inoculum relativement élevé dans les parcelles, malgré la destruction de tous les organes susceptibles d'héberger l'inoculum résiduel en fin de campagne (momies et bois mort), interroge sur les stratégies de survie de ce parasite.

L'identification précoce des foyers d'infection devrait constituer un nouvel objectif de recherche sur l'épidémiologie du CBD, ce qui nécessite la mise au point d'outils fiables permettant de prévoir leur émergence. Les foyers pluriannuels stables devraient être étudiés de manière spécifique car ils semblent constituer une sérieuse piste de recherche sur l'origine de l'inoculum primaire. Les observations devraient être effectuées sur un pas de temps très court (2 jours au maximum) sur ce type de foyers afin d'augmenter les chances de retrouver les véritables points de départ de la maladie sur les caféiers et dans la parcelle.

Enfin, un travail de fond devait être mené sur l'incidence de l'architecture des caféiers sur le développement de la maladie. Cette étude devrait être réalisée au sein d'une même parcelle et sur différents sites afin de faire des propositions sur la meilleure conduite des caféiers, en termes de lutte contre le CBD.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agostini, J. P., Gottwald, T. R., and Timmer, L.W. 1993. Temporal and spatial dynamics of postbloom fruit drop of citrus in Florida. *Phytopathology*, 83 (5) : 485-490.
- Agostini, J. P., Bushong, P. M., Bhatia, A., and Timmer, L. W. 2003. Influence of environmental factors on severity of Citrus scab and melanose. *Plant Disease*, 87 : 1102-1106.
- Ahimera, N., Gisler, S., Morgan, D. P., and Michailides, T. J. 2004. Effects of single-drop impactions and natural and simulated rains on the dispersal of *Botryosphaeria dothidea* conidia. *Phytopathology* 94 : 1189-1197.
- Alahakoon, P. W., Brown, A. E., and Sreenivasaprasad, S. 1994. Cross-infection potential of genetic groups of *Colletotrichum gloeosporioides* on tropical fruits. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 44 : 93-103.
- Anonyme. 2004. Geostatistics for the environmental sciences. *Gamma Design Software, LLC*. 160 pp.
- Arauz, L. F. 2000. Mango anthracnose : economic impact and current options for integrated management. *Plant Disease*, 84 (6) : 600-611.
- Avelino J., Willocquet L., and Savary S. 2004. Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology*, 53 :541-547.
- Bailey, J. A., O'Connell, R. J., Pring, R. J., and Nash, C. 1992. Infection strategies of *Colletotrichum* species. In *Colletotrichum: Biology, Pathology, and Control*. J. A. Bailey and M. J. Jeger, eds. *CAB International, Wallingford, U.K.* 88-120.
- Baxter, A. P., Van der Westhuizen, G. C. A. and Eicker, A. 1983. Morphology and taxonomy of South African isolates of *Colletotrichum*. *S. Afr. J. Bot.* 2 (4) : 259-289.

Bella Manga. 1999. Etude de la diversité de *Colletotrichum kahawae*, responsable de l'anthracnose des baies et caractérisation de la résistance du caféier arabica à cet agent. *Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2*, 149 pp.

Bella Manga, Bieysse, D., Mouen Bedimo J. A., Berry D., 1997. Observations sur la diversité de la population de *Colletotrichum kahawae*, agent de l'anthracnose des baies du caféier arabica. Implications sur l'amélioration génétique. *Actes du 17^e colloque ASIC. Nairobi, Kenya*, 604-612

Berry, D., Nankam, C., Mouen Bedimo, J. A., Aubin, V. 1992. L'anthracnose des baies de caféier (CBD, Coffee Berry Disease) au Cameroun : Epidémiologie et lutte chimique. *Actes du 14^e Colloque ASIC. San Francisco (USA)*, 499-509

Berry, D., and Cilas, C. 1994. Etude génétique de la réaction à la pourriture brune des cabosses chez des cacaoyers (*Theobroma cacao* L) issus d'un plan de croisements diallèle. *Agronomie*, 14 : 599-609

Bhatia, A., and Munkvold, G. P. 2002. Relationships of environmental and cultural factors with severity of gray leaf spots on maize. *Plant Disease*, 86 :1127-1133.

Binyamini, N., and Schiffmann-Nadel, M. 1972. Latent infection in avocado fruits due to *Colletotrichum gloeosporioides*. *Phytopathology* 62 : 592-594.

Bieysse D., Bella Manga, Mouen Bedimo, Ndeumeni J.P, Roussel V., Fabre J.V., Berry D. 2002. L'anthracnose des baies, une menace potentielle pour la culture mondiale de l'arabica. *Plantation-Recherche-Développement. Recherche et Caféculture*, Cirad-CP, Montpellier, France. 144 -152.

Børve, J. and Stensvand, A. 2003. Use of a plastic rain shield reduces fruit decay and need for fungicides in sweet cherry. *Plant Disease*, 87 : 523-528.

Bouharmont P. 1992. Sélection de la variété Java et son utilisation pour la régénération de la caféière arabica au Cameroun. *Café- Cacao - Thé* 36(4) : 247-262

Campbell, C. L., and Madden, L. V. 1990. Introduction to plant disease epidemiology. *John Wiley & Sons*. 532 pp.

Caramori PH, Androcioli A, Leal AC, 1996. Coffee shade with *Mimosa scabrella* Benth. for frost protection in southern Brazil. *Agroforestry Systems* 33 : 205-14.

Cannell M. G. R. 1987. Physiology of the coffee crop. In: Clifford M. N., Willson K. C., eds. Coffee Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage. *CROOM HELM London*. New York. Sydney, 108 -133

Charrier A. and Berthaud J. 1987. Botanical Classification of Coffee. In : Clifford M. N. and Willson K. C. (eds). Coffee Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage. *CROOM HELM London*. New York, 13 – 47

Charrier A. and Eskes A. B. 1997. Les Caféiers. In : Charrier A., Jacquot M., Hamon S., Nicolas D. (eds) l'Amélioration des Plantes Tropicales, *CIRAD et ORSTOM*, 171-196.

Charrier A. and Eskes A. B. 2004. Botany and genetics of coffee. In: Wintgens J. N. (eds) Coffee Growing, Processing, Sustainable Production, 25-55.

Charest, J., Dewdney, M., Paulitz, T., Phillion, V., and Carisse, O. 2002. Spatial distribution of *Venturia inaequalis* airborne ascospores in orchards. *Phytopathology* 92 : 768-779.

Chen, Z., Nunes, M. A., Silva, M. C., Rodrigues, J. Jr. 2004. Appressorium turgor pressure of *Colletotrichum kahawae* might have a role in coffee cuticle penetration. *Mycologia*, 96 (6) : 1199-1208.

Cilas, C., and Lecoustre, R. 1988. Etude spatiale de la production d'une cacaoyère suivant la méthode des variables régionalisées. *Café Cacao Thé* 32 (4)

Coates, L. M., Muirhead, I. F., Irwin, J. A. G. and Gowanlock, D. H. 1993. Initial infection processes by *Colletotrichum gloeosporioides* on avocado fruit. *Mycol. Res.* 97 (11) : 1363-1370.

Coste, R. 1955. Les caféiers et les cafés dans le monde. Tome 1 : Les caféiers. *Edition Larose*, Paris (V^e). 381pp.

Cook, R. T. A. 1975. The effect of weather conditions on infection by coffee berry disease. *Kenya coffee*, 40 (471) : 190-197.

Cox, M. L. and Irwin, J. A. G. 1988. Conidium and appressorium variation in Australian isolates of *Colletotrichum gloeosporioides* group and closely related species. *Aust. Syst. Bot.* 1 : 139-149.

D'Arcy, C. J., Eastburn, D. M. and Schumann, G. L.. 2001. Illustrated Glossary of Plant Pathology. *The Plant Health Instructor*. DOI: 10.1094/PHI-I-2001-0219-01.

de Lapeyre de Bellaire, L., and Mourichon, X. 1997. The pattern of fungal contamination of the banana bunch during its development and potential influence on incidence of crown-rot and anthracnose diseases. *Plant Pathology*, 48 : 481-489.

de Lapeyre de Bellaire, L., Chillet M., Dubois C., Mourichon X. 2000. Importance of different sources of inoculum and dispersal methods of conidia of *Colletotrichum musae*, the causal agent of banana anthracnose, for fruit contamination. *Plant Pathology*, 49 : 782-790.

De Lapeyre de Bellaire, L. 1999. Bio-écologie de *Colletotrichum musae* (Berk. & Curt.) Arx, agent de l'anthracnose des bananes dans les conditions tropicales humides de la Guadeloupe. *Thèse de doctorat, Université de Paris XI Orsay*, 100 pp.

Denham, T. G., and Waller, J. M. 1981. Some epidemiological aspects of post-bloom fruit drop disease (*Colletotrichum gloeosporioides*) in citrus. *Ann. Appl. Biol.* 98 : 65-77.

Dodd, J. C., Jeffries, P., and Jeger, M. 1991. Study on the epidemiology and control of mango anthracnose on the variety "Carabao" in the Philippines. *Acta Horticulturae*, 291 : 346-352.

Dufour B. 2002. Importance du piégeage pour la lutte intégrée contre le scolyte du café, *Hypothenemus hampei* Ferr. *Plantations, Recherche, Développement*. Mai 2002 : 109- 113

- Emmet, R. W., and Parbery, D. G. 1975. Appressoria. *Ann. Rev. Plant Path.* 23 : 421-454.
- Estrada, A. B., Dodd, J. C., and Jeffries, P. 1993. Effects of environment on the in-vitro growth and development of *Colletotrichum gloeosporioides* isolates from the Philippines. *Acta Horticulturae* 341 : 360-370.
- Eskes A. B., and Leroy T. 2004. Coffee selection and breeding. In: Wintgens J. N. (eds) *Coffee Growing, Processing, Sustainable Production*, 59-85.
- Estrada, A. B., Dodd, J. C., and Jeffries, P. 1993. Effects of environment on the in-vitro growth and development of *Colletotrichum gloeosporioides* isolates from the Philippines. *Acta Horticulturae* 341 : 360-370.
- Estrada, A. B., Dodd, J. C., and Jeffries, P. 2000. Effect of humidity and temperature on conidial germination and appressorium development of two Philippines isolates of the mango anthracnose pathogen *Colletotrichum gloeosporioides*. *Plant Pathology*. 49 : 608-618.
- Evenhuis, A., Verdam, B., and Zadocks, J. C. 1997. Splash dispersal of conidia of *Mycocentrospora acerina* in the field. *Plant pathology* 46 : 459-469.
- Fagan, H. J. 1970. Postbloom fruit drop, a new disease of Citrus associated with a form of *Colletotrichum gloeosporioides*. *Ann. Appl. Biol.* 91 : 13-20.
- Fitzell, R. D. 1981. Effects of regular applications of benomyl on the population of *Colletotrichum* in mango leaves. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 77 (3) : 529-533.
- Fitzell, R. D. and Peak, C. M. 1984. The epidemiology of anthracnose disease of mango : inoculum sources, spore production and dispersal. *Ann. Appl. Biol.* 104 : 53-59.
- Freeman, S., Pham, M., and Rodriguez, R. J. 1993. Molecular genotyping of *Colletotrichum* species based on arbitrary primed PCR, A+T-Rich and nuclear DNA analysis. *Experimental mycology* 17 : 309-322.

- Freeman, S., and Shabi, E. 1996. Cross-infection of subtropical and temperate fruits by *Colletotrichum* species from various hosts. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 49 : 395-404.
- Furman, L. A., Lalancette, N., and White, J. F. Jr. 2003. Peach rusty spot epidemics : temporal analysis and relationship to fruit growth. *Plant Disease*, 87 : 366-374.
- Gibbs J. N. 1969. Inoculum sources for coffee berry disease. *Ann. Appl. Biol.* 64 : 515-522.
- Goos, R. D. and Tschirch, M. 1962. Effect of environmental factors on spore germination, spore survival, and growth of *Gloeosporioides musarum*. *Mycologia* 54 : 353-366.
- Green, S., and Bailey, K. L. 2000. Influence of moisture and temperature on infection of Canada thistle by *Alternaria cirsinioxia*. *Plant Dis.* 84 : 1126-1132.
- Griffiths, E., and Waller, J. M. 1971. Rainfall and cropping patterns in relation to coffee berry disease. *Ann. Appl. Biol.* 67 : 75-91.
- Gupta, J. P., and Chatrath, M. S. 1979. Physiology of resistance to anthracnose in guava. *Indian Phytopathology* 32 : 64-67.
- Gupta, A. K. and Pathak, V. N. 1990. Epidemiology and management of papaya fruit rots. *Summa Phytopathologica* 16 : 92-105.
- Guyot, J., Ntawanga Omanda, E., Ndoutoume, A., Mbah Otsaghe, A-A., Enjalric, F., and Ngoua Assoumou, H-G. 2001. Effect of controlling *Colletotrichum* leaf fall of rubber tree on epidemic development and rubber production. *Crop protection*. 20 : 581-590.
- Hallam, D. 2004. La baisse des prix des produits de base et les réactions du secteur : quelques enseignements à tirer de la crise internationale du café. In : Rapport sur les marchés des produits. *FAO*.

- Hepper, F. N. 1963. Rubiaceae. In Hutchinson, J. & Dalziel, J. M. Flora of West Tropical Africa. Second edition. London, Crown agents for overseas governments and administrations, 2 : 104-223.
- Hillocks R. J., Phiri N. A., and Overfield D. 1999. Coffee Pest and Disease Management Options for Smallholders in Malawi. *Crop protection*, 18 : 199-206.
- Hindorf, H. 1970. *Colletotrichum* spp. isolated from Coffea Arabica L. in Kenya. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten, Pflanznpathologie und Pflanzenschutz* 77 : 322-331
- Hindorf, H., and Muthappa, B. N. 1974. A comparison of *Colletotrichum coffeanum* Noack from South India and Kenya. *Phytopath. Z.* 80 : 9-12.
- Hoffman, L. E., Wilcox, W. F., Gadoury, D. M., Seem, R. C. and Riegel, D. G. 2004. Integrated control of grape black rot : influence of host phenology, inoculation availability, sanitation and spray timing. *Phytopathology* 94 : 641-650.
- Holb, I. J. 2005. Effect of pruning on apple scab in organic apple production. *Plant Disease*, 89 : 611-618.
- Hossain, M. S. and Meah, M. B. 1992. Prevalence and control of guava fruit anthracnose. *Tropical Pest Management* 38(2) : 181-185.
- Imbach AC, Fassbender HW, Beer J, Borel R, Bonnemann A, 1989. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. 6. Balances hídricos e ingreso con lluvias y lixiviación de elementos nutritivos. *Turrialba* 39 : 400-14.
- Jaramillo-Robledo A, Chaves-Córdoba B, 1998. Interceptación de la lluvia en un bosque y en plantaciones de *Coffea arabica* L. *Cenicafé* 49 : 129-34.
- Jaramillo-Robledo A, Gómez-Gómez L, 1989. Microclima en plantaciones a libre exposición solar y bajo sombrío. *Cenicafé* 15 : 65-79.

- Jeffries, P., Dodd, J. C., and Plumbey, R. A. 1990. The biology and control of *Colletotrichum* species on tropical fruit crops. *Plant Pathology* 39 : 343-366.
- Kolattukudy, P. E., Li, D., Hwang, C-S., and Flaishman, M. A. 1995. Host signals in fungal gene expression involved in penetration into the host. *Can. J. Bot.* 73 (1) : 1160-1168.
- Lalancette, N., Foster, K. A., and Robison, D. M. 2003. Quantitative models for describing temperature and moisture effects on sporulation of *Phomopsis amygdali* on peach. *Phytopathology* 93 : 1165-1172.
- Lan, Z., and Scherm, H. 2003. Moisture sources in relation to conidial dissemination and infection by *Cladosporium carpophilum* within peach canopies. *Phytopathology* 93 : 1581-1586.
- Latunde-Dada, A. O., O'Connell, R. J., Nash, C. and Lucas, J. A. 1999. Stomatal penetration of cowpea (*Vigna unguiculata*) leaves by a *Colletotrichum* species causing latent anthracnose. *Plant Pathology*. 48 : 777-785.
- Leandro, L. F. S., Gleason, M. L., Nutter, F. W. Jr., Wegulo, S. N., and Dixon, P. M. 2003. Influence of temperature and wetness duration on conidia and appressoria of *Colletotrichum acutatum* on symptomless strawberry leaves. *Phytopathology* 93 : 513 – 520.
- Lepoivre P. 2003. Phytopathologie. Bases Moléculaires et Biologiques des Pathosystèmes et Fondements des Stratégies de Lutte. *De Boeck et Lancier (eds). Bruxelles*, 1^{er} éditions, 426 pp.
- Lovell, D. J., Parker, S. R., Van Peteghem, P., Webb, D. A., and Welham, S. J. 2002. Quantification of raindrop kinetic energy for improved prediction of splash-dispersed pathogens. *Phytopathology* 92 : 497-503.
- Madden L. V., Yang X., Wilson L.L. 1996. Effects of rain intensity on splash dispersal of *Colletotrichum acutatum*. *Phytopathology*, 86 : 864-874.

Madden, L. V. 1997. Effect of rain on splash dispersal of fungal pathogens. *Can. J. Plant Pathol.* 19 : 225-230.

Madden, L. V., Hughes, G., and Irwin, M. E. 2000. Coupling disease-progress-curve and time-of-infection functions for predicting yield loss of crops. *Phytopathology* 90: 788-800.

Masaba D and Waller J.M. 1992. Coffe Berry Disease: The current statut. In: Baley J.A. and Jeger M.J. (eds) *Colletotrichum: Biology, Pathology and Control*. CAB international Wallingford UK. 237-249.

Mila, A. L., Driever, G. F., Morgan, D. P. and Michailides, T. J. 2005. Effect of latent infection, temperature, precipitation and irrigation on panicle and shoot blight of pistachio in California. *Phytopathology* 95 : 926-932.

Mila, A. L., Carriquiry, A. L., and Yang, X. B. 2004. Logistic regression modelling of prevalence of soybeans *Sclerotinia* stem rot in the north-central region of the United States. *Phytopathology* 94 : 102-110.

Mouen Bedimo, J., Chillet, M., Jullien, A., de Lapeyre de Bellaire, L. 2003. Le gainage précoce des régimes de bananes améliore la croissance des fruits et leur état sanitaire vis-à-vis de l'antracnose (*Colletotrichum musae*). *Fruits*, 58(2) : 71-81.

Muller R.A. 1980. Contribution à la connaissance de la phytomycocénose constituée par *Coffea arabica* L., *Colletotrichum coffeanum* Noack (sensu Hindorf), *Hemileia vastatrix* B. et Br., *Hemileia coffeicola* Maublanc et Roger. Paris, France, *Institut français du café et du cacao*, Bulletin n°15, 174 pp.

Muller R .A., Berry D., Avelino J. and Bieysse D. 2004 coffee Diseases. In: Wintgens J. N. (eds) *Coffee Growing, Processing, Sustainable Production. A guide book for growers, processors, Traders and Researchers* : 493-545.

Mulinge, S. K., 1972. Effect of altitude on the distribution of the fungus causing coffee berry disease in Kenya. *Kenya coffee*, 36 (470) : 25-29.

- Muruganandam, V., Venkatachalam, S., and Suryanarayanan, R. S. 1991. Potassium enhances thigmotropically stimulated appressorium formation in *Colletotrichum capsici*. *Cryptogamic Mycol.* 12 (2) : 155-159.
- Muschler, R. G. 2004. Shade management and its effect on coffee growth and quality. In: Wintgens J. N. (eds) *Coffee Growing, Processing, Sustainable Production. A guide book for growers, processors, Traders and Researchers* : 391-418.
- Ndoubè Nkeng, M. 2002. Incidence des facteurs agro-écologiques sur l'épidémiologie de la pourriture brune des fruits du cacaoyer au Cameroun : contribution à la mise en place d'un modèle d'avertissements agricoles. *Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon*, 151 pp.
- Nemeye P. S., Moore D., and Prior C. 1990. Potential of the parasitoid *Heterospilus prosopidis* (Hymenoptera : Braconidae) as a vector of plant-pathogenic *Colletotrichum spp.* *Ann. Appl. Biol.* 116 : 11-19.
- Nicholson, R. L. 1992. *Colletotrichum graminicola* and the anthracnose diseases of maize and sorghum. In *Colletotrichum: Biology, Pathology, and Control*. J. A. Bailey and M. J. Jeger, eds. *CAB International, Wallingford, U.K.* 186-202.
- Ntahimpera, N., Wilson, L. L., Ellis, M. A., and Madden, L. V. 1999. Comparison of rain effects on splash dispersal of three *Colletotrichum* species infecting strawberry. *Phytopathology*. 89 (7) : 555-563.
- Nutman F. J., and Roberts F. M. 1960. Investigations on a disease of *Coffea Arabica* caused by a form of *Colletotrichum* Noack. I – Some factors affecting infection by the pathogen. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 43 (3) : 489-505.
- Onzima J. R., Coulibaly N., Montagnon C. 2002. Le développement du réseau africain de recherche sur le café pour le développement d'une production de café durable et de qualité. *Plantations, Recherche, Développement*. Mai 2002 : 82- 84

Osorio, N. 2002. La crise mondiale du café menace le développement durable. *Sommet mondial sur le développement durable*. 6pp.

Phiri N. A., Hillocks R. J., Jeffries P. 2001. Incidence and Severity of Coffee Disease in Smallholder Plantations in Northern Malawi. *Crop Protection* 20, 325-332.

Prusky, D., and Plumbey, R. A. 1992. Quiescent infections of *Colletotrichum* in tropical and subtropical fruits. In *Colletotrichum: Biology, Pathology, and Control*. J. A. Bailey and M. J. Jeger, eds. *CAB International, Wallingford, U.K.* 289-307.

Prusky, D., and Keen, N. T. 1993. Involvement of preformed antifungal compounds in the resistance of subtropical fruits to fungal decay. *Plant Disease* 77 (2) : 114-110.

Paul, P. A., El-Allaf, S. M. Lipps, P. E., and Madden, L. V. 2004. Rain splash dispersal of *Gibberella zeae* within wheat canopies in Ohio. *Phytopathology* 94: 1342-1349

Rapilly, F. 1991. L'épidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes. *Institut National de la Recherche Agronomique*. 317 pp.

Reddy, Y. T. N., Kurian, R. M., Ramachander, P. R., Singh, G., and Kohli, R. R. 2003. Long-term effects of rootstocks on growth and fruit yielding patterns of "Alphonso" mango (*Mangifera indica* L.). *Scientia Horticulturae* 97 : 95-108.

Roger L. 1953. Phytopathologie Des Pays Chauds. Paul Lechevalier (eds). *Encyclopédie mycologique*, Paris VI^e Tome II, 225 pp.

Rossi, V., Bolognesi, M., Languasco, L., and Giosué, S. 2006. Influence of environmental conditions on infection of peach shoots by *Taphrina deformans*. *Phytopathology* 96 : 155-163.

Sache, I. L'épidémiologie. 2003. In Lepoivre, P. Phytopathologie. Bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte. *Editions De Boeck Université*. 193-213

Shtienberg, D., Zilberstaine, M., Levi, S., Shwartz, H., and Kritzman, G. 2003. New consideration of pruning in management of fire blight in pears. *Plant Disease*, 87 : 1083-1088.

Simmonds, J. H. 1965. A study of *Colletotrichum* causing ripe fruit rots in Queensland. *Queensland Journal of Agriculture and Animal Science* 22 : 437-459.

Smith R. F. 1987. A history of coffee. In : Clifford M. N. and Willson K. C. (eds). Coffee Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage. *CROOM HELM London*. New York, 1 – 12.

Sreenivasaprasad, S., Brown, A. E., and Mills, P. R. 1993. Coffee berry disease in Africa : genetic structure and relationship to the group species *Colletotrichum gloeosporioides*. *Myc. Res.* 97 (8) : 995-1000.

Sullivan, M. J., Damicone, J. P., and Payton, M. E. 2002. The effect of temperature and wetness period on the development of spinach white rust. *Plant Disease*, 86 : 753-758.

Sutton, B. C. 1992. The genus *Glomerella* and its anamorph *Colletotrichum*. In *Colletotrichum: Biology, Pathology, and Control*. J. A. Bailey and M. J. Jeger, eds. *CAB International, Wallingford, U.K.* 1-26

Swinburne, T. R. 1983. Quiescent infections in post-harvest diseases. In : Post-harvest pathology of fruits and vegetables. Denis C. (Ed.). *London. Academic Press* 1-21.

Timmer, L. W., Darhower, H. M., Zitko, S. E., Peever, T. L., Ibañez, A. M., and Bushong, P. M. 2000. Environmental factors affecting the severity of *Alternaria* brown spot of Citrus and their potential use in timing fungicide applications. *Plant Disease*, 84 : 638-643.

Tomassone, R., Lesquoy, E., and Millier, C. 1983. La régression : nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique. *Inra et Masson, Paris*. 177 pp.

Turecheck, W. W., and Madden, L. V. 2003. A generalized linear modelling approach for characterising disease incidence in a spatial hierarchy. *Phytopathology* 93 : 458-466.

- Vaast, P., Bertrand, B., Perriot, J.-J., Guyot, B., and Genard, M. 2006. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86 : 197-204.
- Van de Lande, H. L., and Zadocks, J. C. 1999. Spatial patterns of spear rot in oil palm plantations in Surinam. *Plant pathology* 48 : 189-201.
- Van der Vossen H.A.M., Walyaro D.J. 1980. Breeding for resistance to coffee berry disease in *Coffea arabica* L., 2. Inheritance of the resistance. *Euphytica*, 29 : 777-791.
- Van der Vossen H. A. M., Cook R. T. A. and Murakaru G. N. W. 1976. Breeding for resistance to coffee berry disease caused by *Colletotrichum coffeanum* Noack (sensu Hindorf) in *Coffea arabica* L. I. Methods of pre-selection for resistance. *Euphytica* 25 (3) : 733-745
- Van Der Graaff N. A. 1992. Coffee Berry Disease. In: Mukhopadhyay A. N., Kuman J., Singh U.S., Chaube H. S (eds) *Plant Diseases of International Importance*. USA, 6: 202-230.
- Van Leewen, G. C. M., Stein, A., Holb, I. and Jeger, J. M. 2000. Yield loss in apple caused by *Monilinia fructigena* (Aderh.& Ruhl.) Honey and spatio-temporal dynamics of disease development. *European Journal of Plant Pathology* 106 : 519-528.
- Van Maanen, A. and Xu, X.-M. 2003. Modelling plant epidemics. *European Journal of Plant Pathology*, 109 : 669-682
- Villain L., Baujard P., Anzueto F., Hernandez A. and Sarah J. L. 2002. Protection intégrée des caféières d'Amérique centrale contre les nématodes. *Plantations, Recherche, Développement*. Mai 2002 : 118 -127.
- Walker, J., and Nikandrow, A., and Millar, G. D. 1991. Species of *Colletotrichum* on *Xanthium* (Asteraceae) with comments on some taxonomic and nomenclatural problem in *Colletotrichum*. *Mycol. Res.* 95 (10) : 1175-1193.

Waller J.M. 1972. Water-borne spore dispersal in coffee berry disease and its relation to control. *Annals of Applied Biology*, 71 : 1-18.

Waller, J. M. 1973. The incidence of climatic conditions favorables to coffee berry disease in Kenya. *Kenya coffee*, (38-446 bis) : 157-166.

Waller J. M., Bridge P. D., Black R. and Hakiza G. 1993. Characterisation of the Coffee Berry Disease Pathogen, *Colletotrichum kahawae* Sp. nov. *Myc.* 97 (8): 989-994

Wintgens, J. N. 2004. The coffee plant. In: Wintgens J. N. (eds) Coffee Growing, Processing, Sustainable Production. A guide book for growers, processors, Traders and Researchers : 3-24.

Wolkow, P. M., Sisler, H. D., and Vigil, E. L. 1983. Effect of inhibitors of melanin biosynthesis on structure and function of appressoria of *Colletotrichum lindemuthianum*. *Physiological Plant Pathology* 22 : 55-71.

Xu, X. 2003. Effect of environmental conditions on the development of *Fusarium* ear blight. *European Journal of Plant Pathology* 109 : 683-689.

Young, D. H., and Kauss, H. 1984. Adhesion of *Colletotrichum lindemuthianum* spores to *Phaseolus vulgaris* Hypocotyls and to polystyrene. *Applied and Environmental Microbiology* 47 (4) : 616-619.

Zadocks, J. C. and Schein, R. D. 1979. Epidemiology and Plant Disease management. Oxford University Press. 427pp.

1. The following information is required for the purpose of the study:

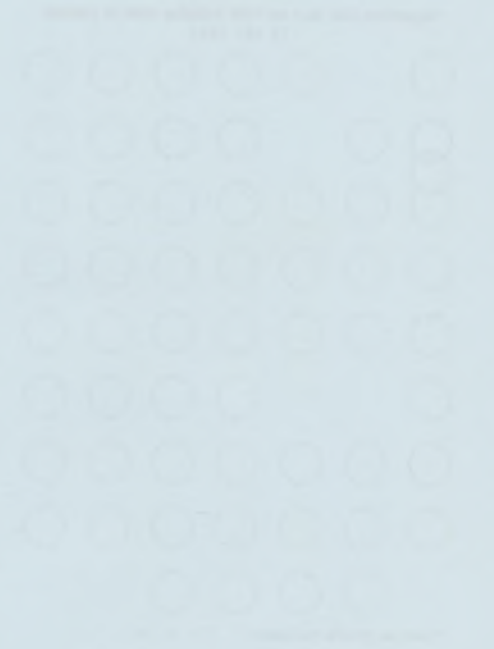
1.1. The name of the institution

1.2. The name of the person in charge



ANNEXES

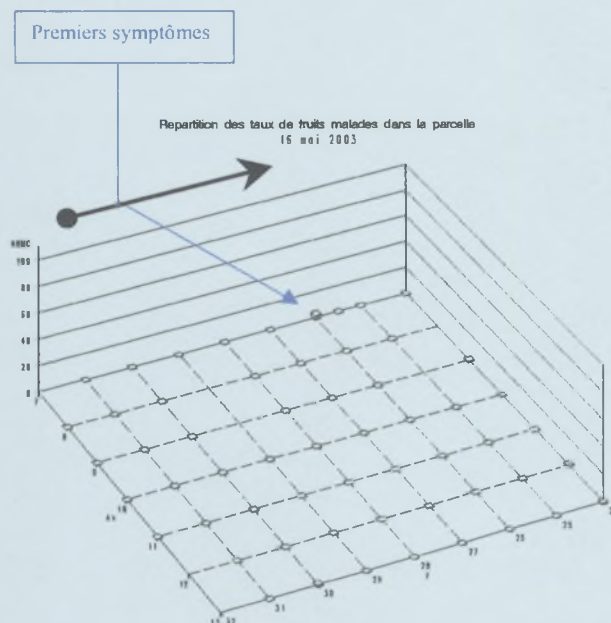
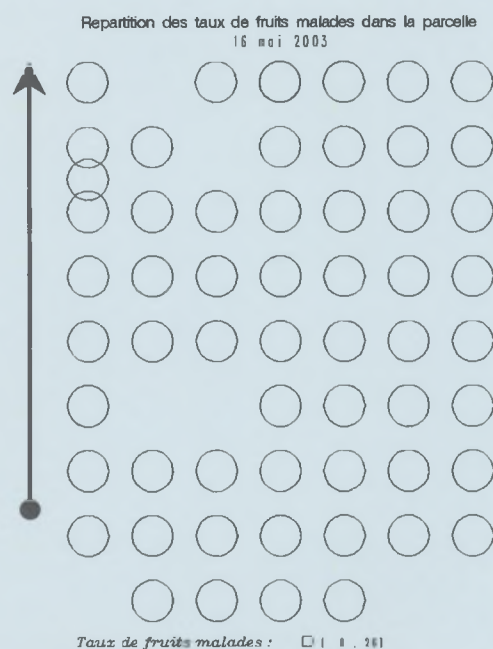
1. The following information is required for the purpose of the study:



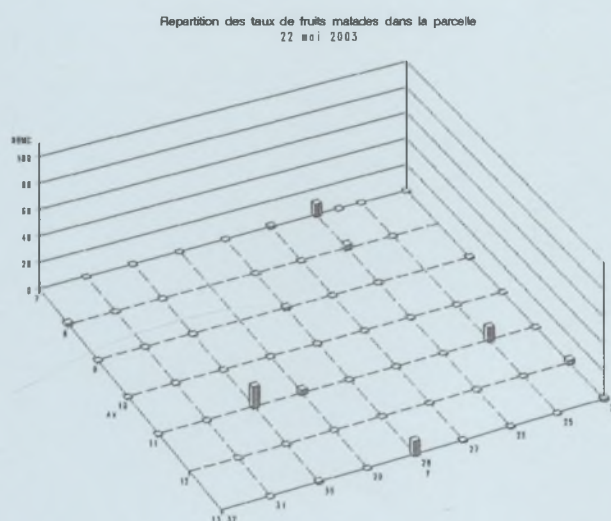
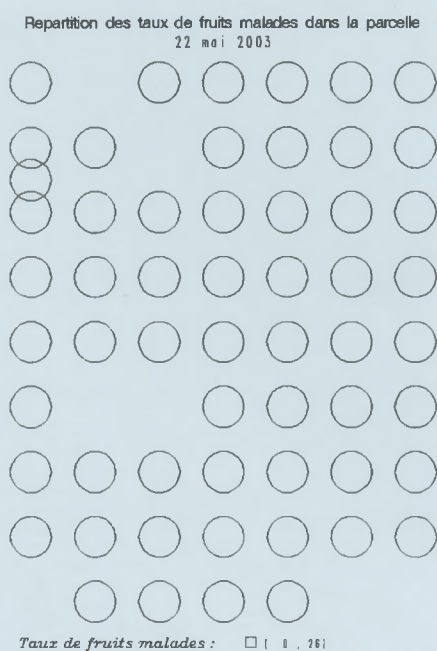
1. The following information is required for the purpose of the study:

Annexe 1. Cartes de répartition spatio-temporelle de la maladie dans la parcelle de Santa en 2003

Premiers symptômes observés en 2003



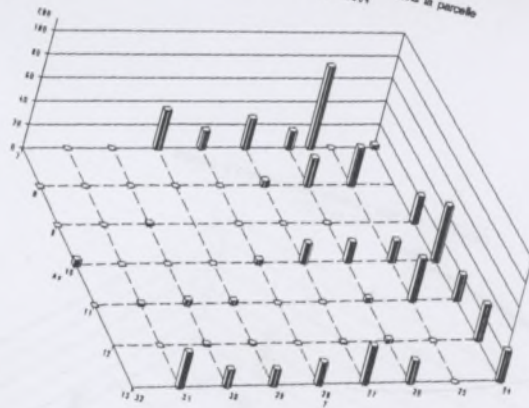
Observations de la 9^{ème} semaine après la floraison



Symptômes observés à la 10^{ème} semaine après la floraison

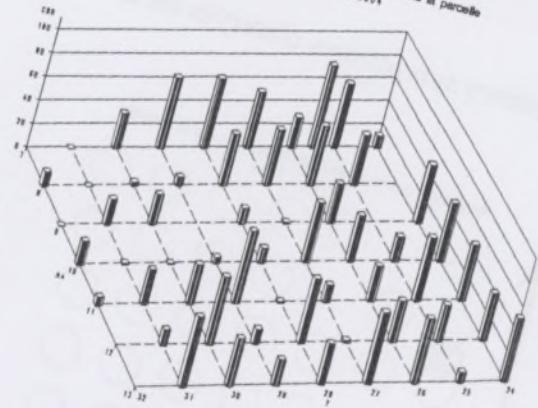
Annexe2, suite

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
10 Juin 2004



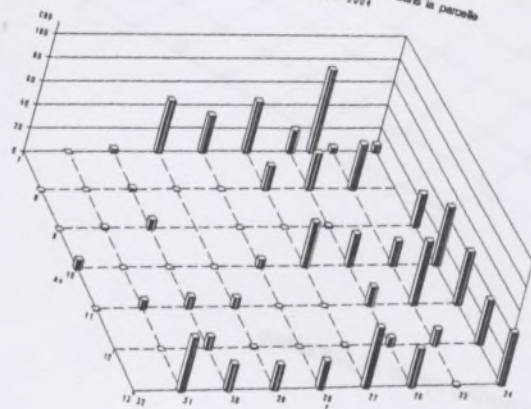
12^{ème} Semaine

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
22 Juillet 2004



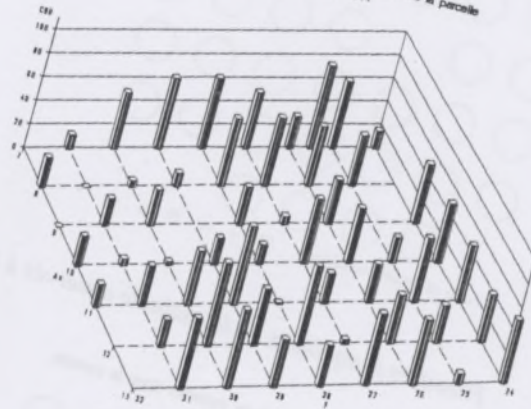
18^{ème} Semaine

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
24 Juin 2004



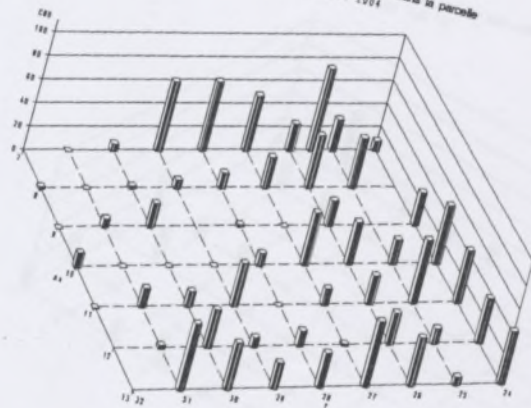
14^{ème} Semaine

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
05 Aout 2004



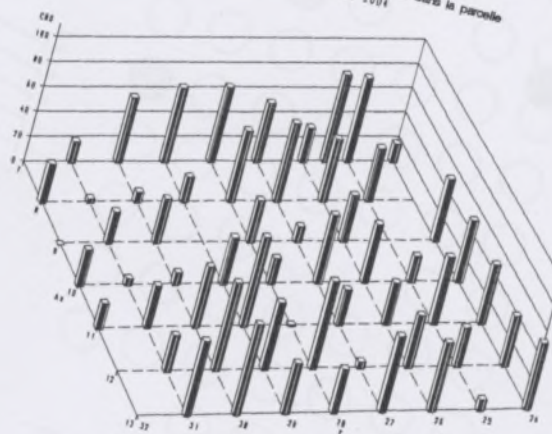
20^{ème} Semaine

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
08 Juillet 2004



16^{ème} Semaine

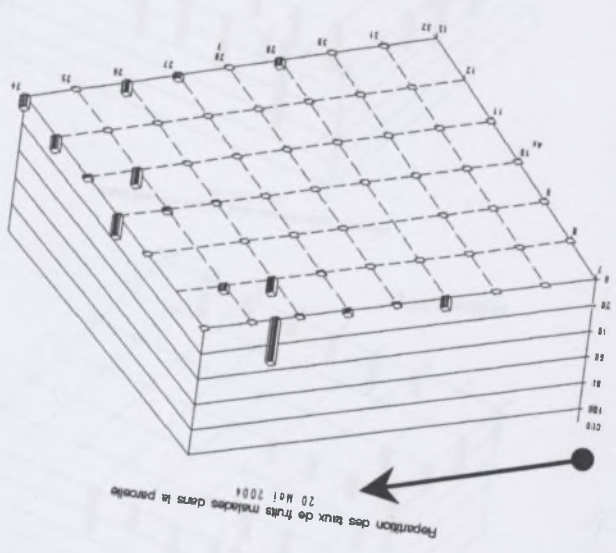
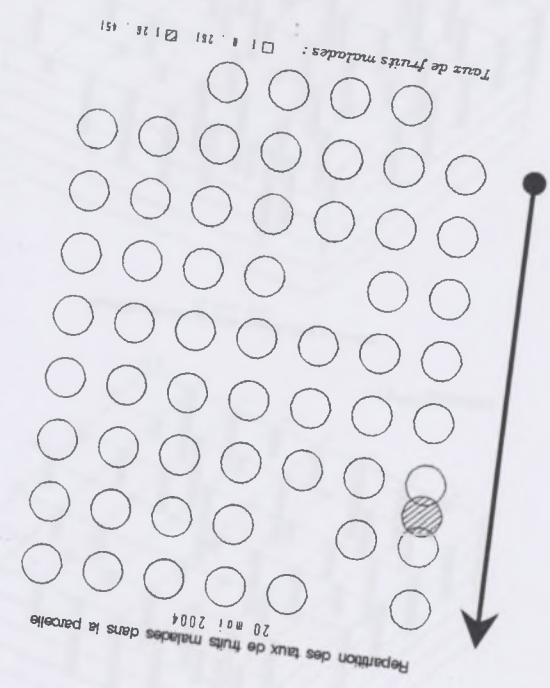
Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
19 Aout 2004



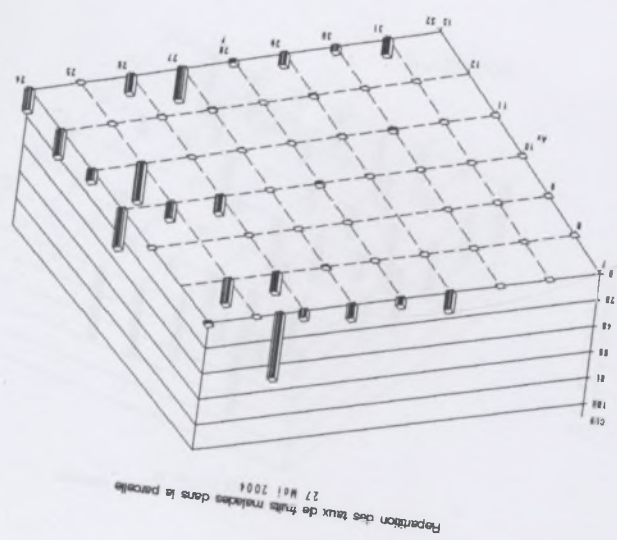
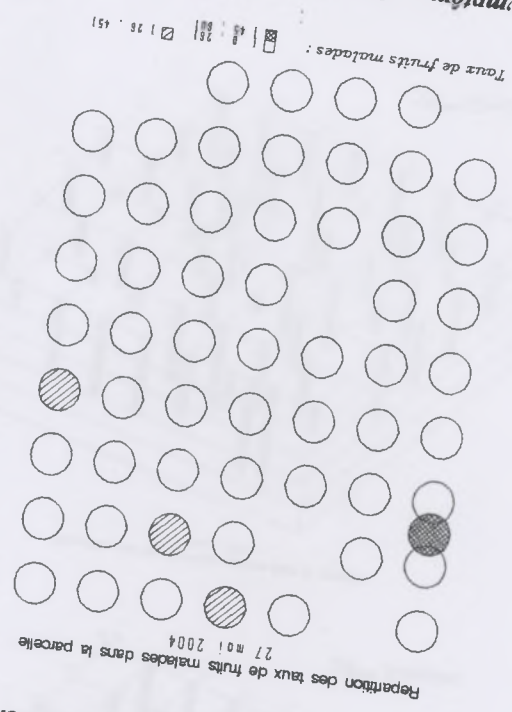
22^{ème} Semaine

Annexe 2. Cartes de répartition spatio-temporelle de la maladie dans la parcelle de Santa en 2004

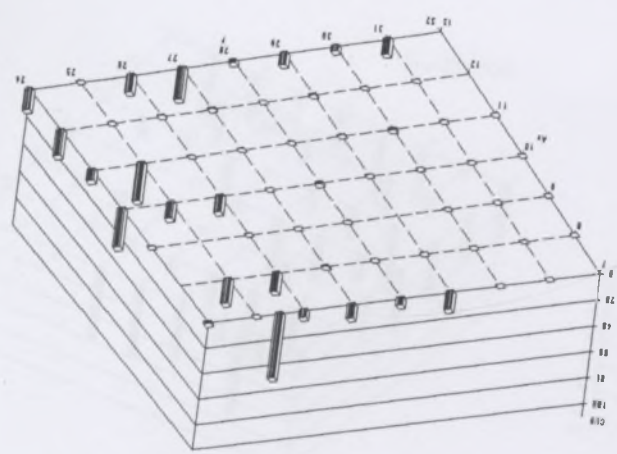
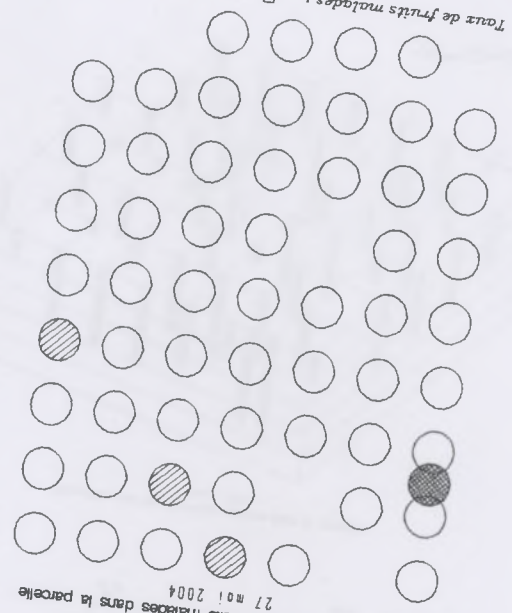
Premiers symptômes observés en 2004



Premiers symptômes de la maladie observés à la 9^{ème} semaine après la floraison

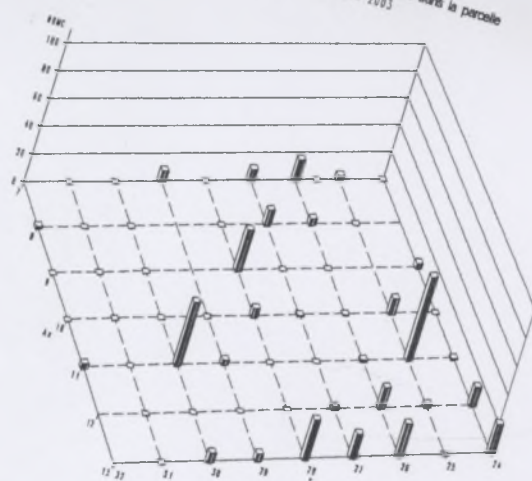


Symptômes observés à la 10^{ème} semaine après la floraison



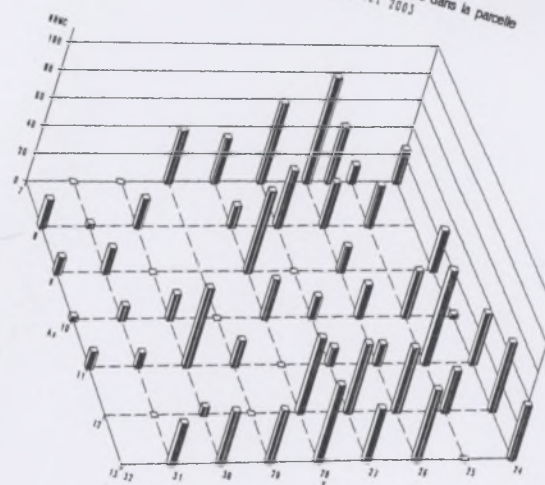
Annexe 1, suite

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
03 Juin 2003



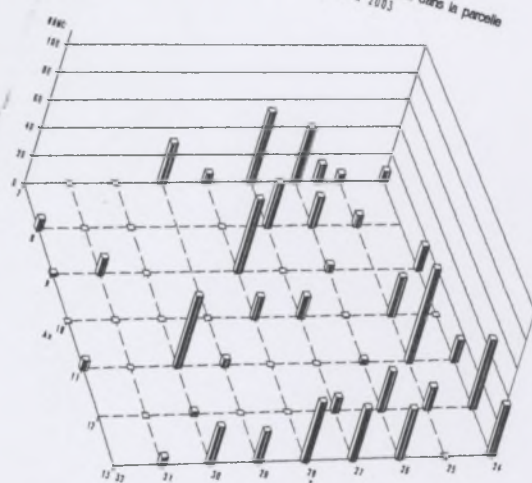
12^{ème} semaine

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
15 Juillet 2003



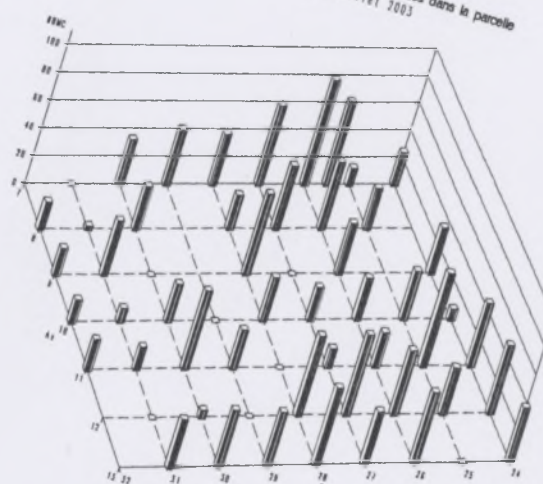
18^{ème} Semaine

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
17 Juin 2003



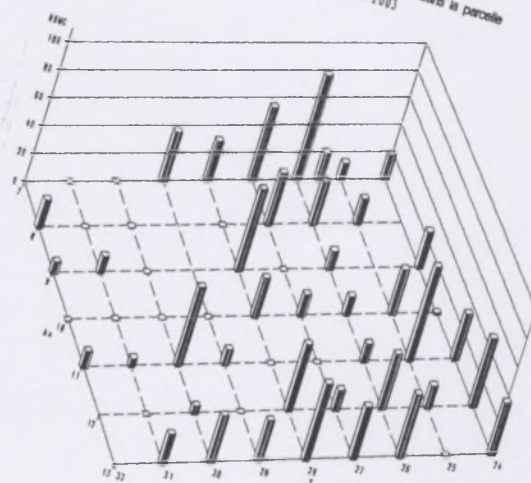
14^{ème} Semaine

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
29 Juillet 2003



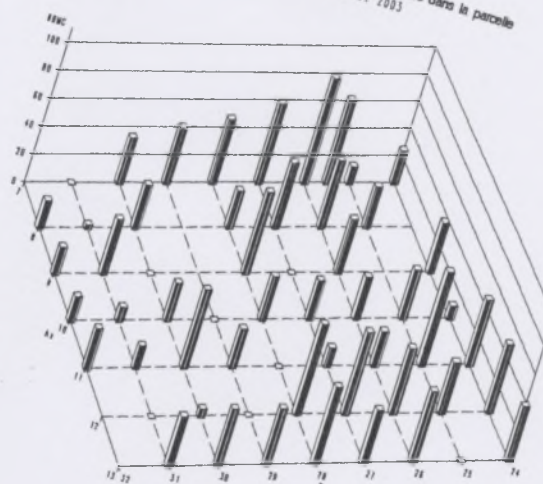
20^{ème} Semaine

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
01 Juil 2003



16^{ème} Semaine

Repartition des taux de fruits malades dans la parcelle
12 Août 2003



22^{ème} Semaine

**Spatio-temporal dynamics of arabica Coffee Berry Disease caused by *Colletotrichum kahawae* [Waller & Bridge], in Cameroon:
analysis of the main determinant factors of the disease**

Summary

Coffee Berry Disease (CBD), caused by *Colletotrichum kahawae*, is a major constraint for arabica (*Coffea arabica* L.) coffee growing in the major production zones of Africa. The disease is specific to green berries and can lead to 60% harvest losses under conditions that are particularly propitious to the disease. Better knowledge of how epidemics develop would make it possible to optimize control methods. The dynamics of pathogen/host/environment interactions were studied taking an experimental approach at two sites with a high disease incidence in Cameroon.

The study of CBD spatio-temporal dynamics revealed that epidemics evolved over time following a logistic model and that their spatial spread could take place from infection foci. Such foci appeared one to two weeks after the start of the disease and faded at the moment of maximum disease spread, during the exponential phase. Experiments conducted to check hypotheses on the origin of those infection foci brought out the factors that govern CBD epidemics. Disease severity was negatively correlated to temperatures; berries were virtually uninfected in the absence of rainfall. Lastly, primary inoculum and allo-inoculum pressure were decisive in the way CBD epidemics progressed. Our work lays the foundations for a clearer understanding of the spatio-temporal spread of this disease.

Maintenance pruning, the destruction of mummified berries and coffee tree shading create environmental conditions that help to limit CBD development. Agricultural practices that reduce the amount of primary inoculum and reduce the growth and/or dispersal of the pathogen can be considered for effective CBD control.

Keywords: *Coffea arabica*, *Colletotrichum kahawae*, cultural practices, infection foci, semi-variograms, spatio-temporal dynamics.

Résumé

L'anthracnose des baies ou Coffee Berry Disease (CBD), due à *Colletotrichum kahawae* constitue une importante contrainte pour la culture du caféier arabica (*Coffea arabica* L.), dans les grandes zones de production d'Afrique. Cette maladie est spécifique des baies vertes et peut entraîner environ 60% de pertes de récoltes, dans les conditions particulièrement favorables la maladie. Une meilleure connaissance des modalités de développement des épidémies, permettrait d'optimiser les méthodes de lutte. La dynamique des interactions entre l'agent pathogène, son hôte et l'environnement, ont été étudiées par une approche expérimentale, sur deux sites à forte incidence de la maladie au Cameroun.

L'étude de la dynamique spatio-temporelle du CBD a montré que les épidémies évoluent au cours du temps suivant un modèle logistique et que leur progression spatiale peut se faire à partir des foyers d'infection. Ces foyers apparaissent une à deux semaines après le début de la maladie et s'estompent au moment de sa progression maximale, lors de la phase exponentielle. Les expérimentations conduites pour vérifier les hypothèses sur l'origine de ces foyers d'infection, ont permis de déterminer les facteurs régissant les épidémies de CBD. La sévérité de la maladie est négativement corrélée aux températures ; les baies ne sont quasiment pas infectées en l'absence des pluies. Enfin, la pression de l'inoculum primaire et l'allo-inoculum sont déterminants dans le déroulement des épidémies de CBD. Nos travaux permettent de poser les bases d'une meilleure compréhension de la progression spatio-temporelle de cette maladie.

La taille d'entretien, la destruction des baies momifiées et l'ombrage des caféiers créent des conditions environnementales permettant de limiter le développement du CBD. Les pratiques agricoles qui réduisent la quantité d'inoculum primaire et qui réduisent la croissance et/ou la dispersion de l'agent pathogène peuvent être envisagés pour un contrôle efficace du CBD.

Mots clés : *Coffea arabica*, *Colletotrichum kahawae*, dynamique spatio-temporelle, foyers d'infection, pratiques culturales, semi-variogrammes.