

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE  
PARIS-GRIGNON

CENTRO AGRONOMOICO TROPICAL  
DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA

## THESE

présentée par Francisco Jiménez Otárola  
Ingénieur agronome, MSc. Université du Costa Rica-CATIE

pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

ETUDES AGROMETEOROLOGIQUES APPLIQUEES A LA LUTTE  
CONTRE LA SIGATOKA NOIRE (*Mycosphaerella fijiensis*) DU  
BANANIER PLANTAIN (*Musa AAB*)

soutenue le 1 mars 1994 devant la Commission d'examen composé de:

M. PERRIER	Professeur INA-PG	Président
M. BARBAULT	Professeur ENS Paris	Rapporteur
M. PAYEN	Ingénieur en Chef Météo-France	Rapporteur
M. McCARTNEY	Principal Scientist AFRC, U.K.	Rapporteur
M. MOURICHON	Phytopathologiste CIRAD-FHLOR	Examineur
M. LHOMME	Chargé de recherche ORSTOM	Examineur
M. HUBER	Chargé de recherche INRA	Examineur

## AVANT PROPOS

Il m'est très agréable dans cet avant-propos d'exprimer toute ma gratitude à tous ceux qui m'ont permis de mener à bien le travail que je présente ici.

Tout d'abord je remercie Laurent Huber et Jean Paul Lhomme. C'est grâce à leurs grandes qualités pédagogiques, scientifiques et humaines que j'ai pu finir ce travail. J'ai bénéficié de leurs conseils, de leurs connaissances, de leurs travaux et de leurs amitiés.

Je remercie aussi M. Alain Perrier, Professeur de Bioclimatologie à l'Institut National Agronomique (INA-PG) pour avoir bien voulu m'accueillir comme étudiant de thèse et pour ses critiques toujours constructives et pertinentes.

Je souhaite également remercier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté, et les suggestions et remarques qu'ils ont formulées:

M. Barbault, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure (ENS) de Paris.  
 M. Payen, Ingénieur en Chef de Météo-France.  
 M. McCartney, Directeur de Recherche dans le Department of Plant Pathology de Rothamsted Experimental Station en Angleterre.  
 M. Mourichon, Phytopatologiste du CIRAD.

Je suis particulièrement reconnaissant à Rubén Guevara, Directeur Général du CATIE, à Carlos Rivas, Directeur du Programme Manejo Integrado de Recursos Naturales (PMIRN), à Jorge Faustino, Responsable de l'Unité Cuencas Hidrográficas et Coordinateur du projet RENARM, à José Flores, directeur du PMIRN (1987-1991), et à Florent Maraux, coordinateur du Proyecto Regional de Agrometeorología (1987-1991) pour leur appui inconditionnel.

Je remercie M. Katerji, Directeur de l'Unité de Recherches en Bioclimatologie à Thiverval-Grignon pour avoir accepté de m'accueillir dans son laboratoire au cours de deux séjours (5 mois en 1991, 4 mois en 1993-1994). Je remercie également Pierre Cellier, Andrée Tuzet, Marina Pavlides, Sylvie Masson, et Simone Poncelet pour leurs collaborations.

Je remercie tout particulièrement Jean Vincent Escalant, Responsable de l'Unité de Biotechnologie du CATIE et coordinateur des travaux sur la Sigatoka pour son aide indispensable pour finir ce travail. Ma reconnaissance va aussi à Ramiro Jaramillo, Coordinateur Régional de INIBAP en l'Amérique Latine pour ses conseils et son appui.

Parmi mes collègues du CATIE, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Bruno Rapidel, Alexander Salas, Ana Cecilia Tapia, Nicolas Gribius et Manrique González pour leurs collaborations. Je veux aussi exprimer ma gratitude à l'équipe des secrétaires de PMIRN-Cuencas: Ligia Pérez, Lorena Jiménez, Azálea Salguero, Emilce Chavarría et Luisa García.

Je veux exprimer ma gratitude à Madame Collinet et Madame Escalant pour leurs leçons de Français.

Enfin tout cela n'aurait pas été possible sans le financement du CATIE et du Ministère des Affaires Etrangères de France, ce qui a permis que le travail soit mené à son terme dans de bonnes conditions.

A ma mère, Ester  
A mon père, Antonio (*in memoriam*)  
A mes enfants, Antonio José et Mélissa Maria  
A mon épouse, Josefina  
A toute ma famille

## SOMMAIRE

RESUME	vi
SUMMARY	vii
RESUMEN	viii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1: LE COMPLEXE MILIEU-HOTE-PATHOGENE	4
1.1 Le milieu physique	
1.1.1 Climat et régions productrices de bananier plantain dans le monde	5
1.1.2 Caractéristiques générales du Costa Rica	6
1.1.2.1 Situation et relief	6
1.1.2.2 Caractéristiques climatiques	9
1.1.3 Caractéristiques de la région atlantique	12
1.2 L'hôte	16
1.2.1 Classification taxonomique et nomenclature	16
1.2.2 Morphologie générale	16
1.2.3 Le système foliaire	18
1.3 La maladie et l'agent pathogène	22
1.3.1 Importance de la maladie	22
1.3.2 Symptômes	22
1.3.3 Virulence	24
1.3.4 Le pathogène responsable de la Sigatoka noire	25
1.3.5 Importance du type de spore dans l'évolution de la maladie	25
1.3.6 Production et dispersion des spores	25
1.3.7 L'évolution de la maladie	27
1.3.8 Effet du climat sur le développement de la maladie	29
CHAPITRE 2: MODELISATION DE LA DUREE DE ROSEE SUR LE CIGARE ET SUR LA PREMIERE FEUILLE DU BANANIER PLANTAIN	34
2.1 Introduction	35
2.2 Description du modèle	37
2.2.1 Estimation de la température de la feuille	37
2.2.2 Formation de la rosée et estimation de sa durée	39
2.3 Calcul du bilan radiatif	40
2.3.1 Estimation des rayonnements standard sur un plan horizontal	40
2.3.2 Estimation du rayonnement incident sur les feuilles	41
2.4 Site expérimental et mesures de terrain	43
2.5 Opération et validation du modèle	43
2.6 Analyse de sensibilité du modèle	49
2.7 Température des feuilles durant la période d'humectation par la rosée	52
2.8 Comparaison entre la durée de rosée estimée par le modèle et celle mesurée par des capteurs électriques	55
2.9 Utilisation du modèle ROCIO en conditions naturelles au champ en relation avec la Sigatoka noire	58
2.10 Conclusions	59

CHAPITRE 3: LIBERATION DES ASCOSPORES ET CARACTERISTIQUES DES PLUIES DANS LA REGION ATLANTIQUE DU COSTA RICA	61
3.1 Introduction	62
3.2 Libération et dispersion des ascospores de <i>M. fijiensis</i> dans une plantation de bananier plantain.	63
3.2.1 Introduction	63
3.2.2 Matériels et méthodes	64
3.2.3 Résultats et discussion	65
3.2.4 Conclusions	72
3.3 Etude de la durée de la pluie dans la région atlantique du Costa Rica	73
3.4 Etude de la dynamique de l'eau de pluie dans le couvert du bananier plantain	76
3.4.1 Introduction	76
3.4.2 Mesures	77
3.4.3 Résultats et discussion	78
3.5 Estimation de la durée d'humectation par la pluie	84
CHAPITRE 4: APPLICATIONS A L'EPIDEMIOLOGIE DE LA SIGATOKA NOIRE ET LA LUTTE RAISONNEE	88
4.1 Introduction	88
4.2 Application du modèle ROCIO: utilisation de relations expérimentales entre sévérité de la maladie et microclimat obtenues en conditions contrôlées	89
4.3 Un système biométéorologique d'avertissement de la Sigatoka noire du bananier plantain	95
4.3.1 Introduction	95
4.3.2 Matériel et méthodes	95
4.3.2.1 Sites expérimentaux et conditions culturelles	95
4.3.2.2 Brève description du système de préavis biologique	96
4.3.2.3 Variables épidémiologiques et météorologiques évaluées	99
4.3.4 Résultats et discussion	102
4.3.5 Le système d'avertissement biométéorologique	106
4.3.6 Evaluation du système d'avertissement biométéorologique	107
4.3.7 Comparaison des applications de fongicides faites en suivant le système de préavis biologique (PB) et simulées par le système d'avertissement biométéorologique (SAB)	110
4.3.8 Conclusions	113
CONCLUSIONS GENERALES	115
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	118

## RESUME

La culture du bananier plantain représente une activité agricole essentielle pour de nombreux pays tropicaux. La Sigatoka noire (*Mycosphaerella fijiensis*) est considérée actuellement comme l'un des principaux facteurs qui affectent la production de plantain. Dans ce travail effectué au Costa Rica, on présente différentes études agrométéorologiques concernant les interactions entre l'hôte, l'agent pathogène et le milieu, et destinées à améliorer la lutte contre cette maladie.

On utilise la méthode du bilan d'énergie pour développer un modèle simple d'estimation de la durée de rosée sur la feuille cigare et la première feuille, qui sont les principales cibles des spores du champignon. Dans la majorité des cas, la durée de rosée a été estimée avec une erreur de moins d'une heure. On utilise des données de durée de rosée obtenues au moyen de ce modèle et certains paramètres épidémiologiques pour montrer qu'en conditions naturelles, dans la région atlantique du Costa Rica, la durée de rosée n'est pas un facteur limitant pour la Sigatoka noire.

On a fait des simulations de la sévérité de la Sigatoka noire dans une région où existe une saison sèche prononcée, mais où l'irrigation pourrait rendre possible la culture de bananier plantain. Les résultats suggèrent que la brièveté des durées d'humectation est très défavorable à la Sigatoka noire pendant la période sèche.

On a effectué une étude spécifique de la dissémination des ascospores et montre le rôle fondamental des pluies sur cette phase de la maladie. Pendant les jours sans pluie, la libération des ascospores de *M. fijiensis* est faible, avec une tendance à croître pendant la nuit et au lever du soleil en relation avec le dépôt de rosée. Durant les jours de pluie, la libération est forte et augmente peu de temps après le début des pluies ou à la fin de l'épisode pluvieux.

On présente une étude du régime pluviométrique et de la distribution de la durée journalière de la pluie dans la région atlantique du Costa Rica, étude qui met en évidence l'absence d'une période sèche prolongée et l'alternance quotidienne de conditions sèches et mouillées, caractéristiques qui sont très favorables à la Sigatoka noire.

On a pu montrer que la variation temporelle du niveau d'infection de la feuille quatre (NIF4) est comparable à l'évolution de la durée cumulée de pluie pendant les quatre premières, de six semaines précédant l'évaluation biologique (NIF4). Ces résultats ont servi de base pour développer un système d'avertissement biométéorologique destiné à définir le moment le plus opportun pour l'application des traitements fongicides. Ce système d'avertissement, testé dans des conditions réelles de production, permet une rationalisation de la lutte chimique.

**Mots clés:** bananier plantain, sigatoka noire, agrométéorologie, pluie, rosée, système d'avertissement.

## SUMMARY

Plantain is a very important crop for local consumption in a number of tropical countries. Black Sigatoka is a fungal disease considered as one of the major obstacles to plantain production. In order to improve crop protection, several agrometeorological studies have been conducted in Costa Rica relating to the interaction between the host, the disease and the physical environment.

An energy balance model and standard weather input data were used to estimate dew duration on both cigare and first leaf which are the more important targets of the fungus. In most cases, calculated dew durations compared reasonably well with observations ( $\pm 1$  h.). Using the dew duration model and epidemiological data obtained in the field, it was shown that surface wetness duration is not a limiting factor of the disease in the atlantic region of Costa Rica.

Disease severity was simulated in a dry region of Costa Rica where, with the use of irrigation, it would be possible to grow plantain. Results suggested that more short dew durations found during the dry season are very unfavourable to the development of black sigatoka.

The dispersal of ascospores was studied and the fundamental role played by rainfall was shown. During dry days, ascospores liberation was low but when dew formed trended to increase during the night and at sunrise. During rainy days, ascospore liberation was high and increased shortly after the rain started or at the end of a rain event.

In the Atlantic region of Costa Rica, the characteristics of rainfall (particularly daily rain duration) were studied. The main results were the absence of a long dry period and the daily occurrence of dry and wet conditions, both of which are extremely favourable to the development of black sigatoka.

The variation with time of infection of the fourth leaf (assessed weekly) was similar to that of the cumulative duration of rain assessed over the four weeks starting six weeks before the date that the disease was assessed. These results were used to develop a biometeorological warning system for scheduling fungicide application. The system was validated in the field under normal cropping conditions.

**Key words:** plantain, black sigatoka, agrometeorology, rainfall, dew, warning system.

## RESUMEN

El cultivo del plátano (*Musa* AAB) representa una actividad agrícola fundamental para numerosos países tropicales. La Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) es considerada actualmente como uno de los principales factores limitantes de esta actividad. En este trabajo se presentan algunos estudios agrometeorológicos sobre la interacción entre el hospedante, el patógeno y el ambiente, cuyo objetivo es contribuir la manejo integrado de la enfermedad.

Se utilizó el método de balance de energía para desarrollar un modelo simple que permite estimar la duración de rocío sobre la hoja cigarro y la primera hoja más joven del plátano. Las mismas son el principal blanco de las esporas del hongo. En la mayoría de los casos la duración de rocío fue estimada con un error inferior a una hora. Datos obtenidos mediante este modelo fueron utilizados para mostrar que, en la región atlántica de Costa Rica y en condiciones de campo, la duración de rocío no es un factor limitante para el desarrollo de la enfermedad.

Se realizaron simulaciones de la severidad de la Sigatoka negra en una región que presenta un estación seca prolongada, pero donde la disponibilidad de riego podría hacer posible el cultivo de plátano. Los resultados indican que las duraciones de humectación son muy cortas durante en el período seco y por lo tanto, muy desfavorables a dicha enfermedad.

Un estudio sobre la diseminación de las ascosporas de *M. fijiensis* muestra que la lluvia tiene un papel fundamental en esta fase de la enfermedad. Durante los días sin lluvia la liberación de ascosporas es muy baja, con tendencia a aumentar durante la noche y al amanecer cuando ocurre la formación de rocío. Durante los días con lluvia la liberación es mayor, y aumenta de manera fuerte poco tiempo después del inicio de una lluvia o del final de la misma, si ésta es de corta duración.

Se efectuó un análisis del régimen pluviométrico y de la distribución diaria de la duración de la lluvia en la región atlántica de Costa Rica. El mismo pone en evidencia la ausencia de períodos secos prolongados, y la alternancia frecuente de condiciones secas y húmedas, características que son muy favorables a la Sigatoka negra.

Se demuestra que la variación temporal del nivel de infección de la hoja cuatro (NIH4), es comparable a la evolución de la duración acumulada de las lluvias durante las primeras cuatro de las seis semanas anteriores a la evaluación biológica (NIH4). Estos resultados sirvieron de base para desarrollar un sistema de pronóstico biometeorológico que permite definir el momento más oportuno de realizar las aplicaciones de fungicida. Este sistema de pronóstico fue probado en condiciones reales de producción de plátano destinado al consumo local.

Palabras claves: plátano, sigatoka negra, agrometeorología, lluvia, rocío, sistema de pronóstico.

## **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION

Les plantains et les bananes constituent une source alimentaire très importante chez les pays producteurs. De plus, les fruits sont très prisés sur les marchés internationaux. Leur culture contribue à l'obtention de devises et à la génération d'emploi. Ils sont produits dans plusieurs systèmes d'agriculture tropicale et sub-tropicale, depuis les petites jusqu'aux grandes plantations, fréquemment en monoculture, mais aussi dans des systèmes de cultures associées (Jaramillo 1987). La production mondiale de banane et de plantain s'estime à plus de 60 millions de tonnes, dont 40 % correspondent au continent américain, pour lequel la superficie cultivée correspond à plus de 1,5 millions d'hectares.

La maladie nommée Sigatoka noire (*Mycosphaerella fijiensis*) est considérée aujourd'hui comme l'un des principaux facteurs limitants pour la production de bananier plantain et de bananier. La haute susceptibilité des bananier plantains (*Musa AAB*) a comme conséquence la réduction des rendements, ou dans les cas extrêmes, la perte totale de la production. Ceci est plus grave si on considère que les bananier plantains sont un important, et dans quelques cas le principal, composant de l'alimentation de nombreux habitants des pays tropicaux. Les coûts actuels de lutte contre la maladie sont supérieurs à 1000 US\$ par hectare et par an. Par exemple, au Costa Rica avec une surface plantée de près de 40.000 hectares, le coût de la lutte contre la maladie en 1993, a été proche de 50 millions US\$, ce qui est au moins le double du coût de la lutte contre n'importe quelle autre maladie végétale existant dans ce pays.

Dans les pays d'Amérique Centrale, le contrôle de la Sigatoka noire est actuellement un problème complexe. Il apparaît que dans plusieurs zones productrices, la résistance du champignon au fongicide systémique propiconazole triazol s'est accrue. Depuis quelques années ce fongicide est le principal produit utilisé pour la lutte contre cette maladie. Ceci a conduit à l'utilisation d'autres fongicides moins efficaces et donc à une augmentation du nombre d'applications nécessaires pour maintenir les plantations dans un bon état sanitaire, et à un accroissement des probabilités de détérioration écologique. Cette situation est aggravée par l'énorme incongruité entre les normes strictes de qualité, exigées pour le fruit sur les marchés internationaux, qu'il est possible d'atteindre seulement par de fréquentes applications de pesticides, et le comportement des consommateurs qui demandent des fruits à faible teneur en matières actives ou cultivés sans protection chimique. Pour la production de bananier plantain, il faut ajouter comme facteur aggravant que les stratégies de lutte chimique actuellement utilisées pour la bananier ne sont pas applicables aux systèmes de cultures utilisés par les petits producteurs de bananier plantain (Bureau 1990, Mourichon et Fullerton 1990).

L'amélioration génétique pour la recherche de matériaux résistants a été fortement promue et appuyée, principalement par le Réseau International d'Amélioration du Bananier et du Bananier Plantain. Bien qu'il existe des génotypes très prometteurs quant à la production et à la résistance à la Sigatoka, il apparaît nécessaire d'attendre encore plusieurs années, avant que des nouveaux cultivars soient utilisés de manière commerciale et que les fruits produits soient acceptés par les consommateurs.

Devant ce panorama, il apparaît que les stratégies de lutte contre la Sigatoka noire doivent être dirigées vers deux voies: 1. Le contrôle intégré, basé sur des pratiques culturales adéquates (principalement l'effeuillage), la réalisation planifiée et

opportune des traitements chimiques (système d'avertissement de la maladie) et l'alternance de fongicides pour éviter l'apparition de souches résistantes du champignon. 2. L'évitement qui est la recherche de zones de production peu favorables à la maladie (zone avec au moins une époque sèche prolongée et avec possibilité d'irrigation). La première voie constitue la voie privilégiée dans la mesure où la lutte intégrée a un coût très inférieur à celui de l'irrigation.

Pour la Sigatoka noire, la connaissance existante du système hôte-pathogène-climat est assez limitée et fréquemment l'information a été adaptée ou extrapolée à partir des connaissances sur la Sigatoka jaune. Ceci est dû à deux raisons principales: d'un part il s'agit d'une maladie de dissémination récente (apparue en Amérique en 1972), d'autre part, il s'agit d'une maladie tropicale dont l'étude ne fait pas partie des priorités de recherche des pays développés. La France constitue une exception remarquable, puisqu'il existe une tradition de recherche sur cette maladie, principalement dans plusieurs pays d'Afrique tels que le Cameroun, la Guinée, et la Côte d'Ivoire.

Le système de préavis biologique développé par Ganry et Meyer (1972) pour la Sigatoka jaune, et adapté plus tard à la Sigatoka noire (Fouré 1988, Bureau 1990), a été un apport fondamental dans la lutte raisonnée contre cette maladie. Ce système a montré son efficacité dans différents pays et régions productrices de bananier plantain et bananier dans le monde. Des expériences effectuées au Costa Rica ont montré que l'utilisation du système de préavis biologique permet de réduire le nombre annuel des applications de près de 50%. Au Cameroun, depuis quelques années, ce système est appliqué avec succès dans des grandes plantations de bananier, en permettant une réduction supérieure à 50% du nombre annuel d'applications fongicides. Il est important d'améliorer et de simplifier ce système afin de permettre une utilisation plus large et à la portée du petit producteur.

Pour les pays développés, un objectif essentiel est de maximiser la productivité; pour les pays en voie de développement le but fondamental est de réduire les pertes. Dans ce contexte, la recherche agricole des pays en voie de développement a pour objectif le développement de méthodes simples et opérationnelles qui peuvent être mises en place au service des producteurs. Cet travail de thèse doit être inscrit dans cette réalité.

Il est connu que les facteurs météorologiques ont une importance fondamentale dans la sporulation, la dissémination, l'inoculation, l'incubation et le développement de la maladie, ainsi que dans l'opportunité et l'efficacité des mesures de lutte. Par conséquent, la nécessité d'avoir plus d'informations au niveau du terrain sur les conditions microclimatiques dans les plantations de bananier plantain et leur influence sur la maladie paraît évidente, afin de proposer des méthodes simples et à la portée du petit producteur, qui puissent contribuer à la lutte raisonnée contre ce pathogène et à la stabilité de la production obtenue dans des conditions socio-économiques et écologiques satisfaisantes.

Une partie importante de cette étude a été consacrée à la rosée. Au début du travail de thèse (1988), des opinions exprimées par des chercheurs qui travaillaient sur la Sigatoka en Afrique laissaient entendre que la rosée est un facteur déterminant pour le développement épidémique de la maladie. Par la suite, on a montré que pour les conditions climatiques où se développent les principales plantations de bananier plantain et bananier du Costa Rica ce facteur, bien qu'il soit important n'est pas limitant pour le développement du champignon. Depuis ce

moment, les efforts ont été consacrés à l'étude de la pluie et à sa liaison avec la maladie.

Ce travail est divisé en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre correspond à une revue bibliographique relative au milieu, à l'hôte et à l'agent pathogène.

Le deuxième chapitre est consacrée à l'étude de la durée de rosée sur la feuille cigare et la première feuille du bananier plantain. Ces deux feuilles constituent les principales cibles des spores du champignon. Dans un premier temps, on développe un modèle fondé sur le bilan d'énergie, qui utilise comme données d'entrée ceux d'une station météorologique classique. Dans un deuxième temps le modèle est utilisé afin de voir dans quelle mesure il est possible de prévoir le risque de contamination à partir de variables météorologiques.

Dans le troisième chapitre, on étudie la libération et la dispersion des ascospores de *M. fijiensis* dans une plantation de bananier plantain et leur relation avec les facteurs climatiques. On présente une analyse de la durée journalière des pluies dans la région atlantique du Costa Rica. On présente également une étude locale de l'interception de la pluie pour un couvert de bananier plantain et une étude d'estimation de la durée d'humectation par la pluie

Dans le quatrième chapitre, on présente deux types d'applications des concepts et résultats obtenus. Dans un premier temps le modèle de simulation de la rosée est utilisé conjointement avec des données expérimentales obtenues en condition contrôlée. Dans un deuxième temps, on présente un système biométéorologique d'avertissement destiné à rationaliser la lutte chimique contre la Sigatoka noire dans le bananier plantain.

**CHAPITRE 1**  
**LE COMPLEXE MILIEU-HOTE-PATHOGENE**

## CHAPITRE 1

### LE COMPLEXE MILIEU-HOTE-PATHOGENE

#### 1.1 Le milieu physique

##### 1.1.1 Climats et régions productrices de bananier plantain dans le monde.

Actuellement, toutes les grandes zones de production de bananier plantain et de bananier sont situées dans les tropiques, entre les parallèles 20 degrés de latitude Nord et Sud (figure 1). Certaines zones de moindre importance se trouvent entre les 20 et 30 degrés de latitude Nord et Sud et sont considérées comme des régions sub-tropicales (Stover et Simmonds 1987). Les principaux climats tropicaux pour la production de bananier et de bananier plantain incluent le sud du Mexique, l'Amérique Centrale, la partie d'Amérique du Sud située au nord du parallèle 20 degrés de latitude Sud (Colombie, Equateur, Vénézuéla), les îles Caraïbes, les tropiques humides d'Afrique de l'Ouest, de l'Est et Centrale, et la partie d'Asie située au sud du parallèle 20 degrés de latitude nord. Ce sont des régions où le risque de gelée est nul et qui sont situées en majorité au-dessous de 1500 mètres de altitude, sauf en Afrique de l'Est et en Afrique Centrale, où quelques clones poussent au-dessus de 2000 mètres. Les plantations de bananier d'exportation sont situées principalement en dessous de 500 mètres d'altitude (Stover et Simmonds 1987).

Là où l'eau n'est pas un facteur limitant, le taux de croissance de la plante et la durée pour le mûrissement du fruit sont déterminés par la température. Pour le bananier, la température optimale pour la croissance foliaire est entre 26 et 28 °C (Ganry 1980) et légèrement supérieure pour la croissance du fruit: de 29 à 30 °C. En climat tropical, l'émission foliaire cesse à des températures inférieures à 16 °C et la croissance s'arrête complètement à des températures voisines de 10 °C (Aubert 1971). Dans les principales régions où se produisent le bananier plantain et le bananier d'exportation, la température descend rarement en dessous de 15 °C, et ceci seulement pendant de brèves périodes (Stover et Simmonds 1987).

De la même manière que la température, la pluie détermine les régions tropicales où se produisent les plantains et les bananes d'exportation. La majeure partie pousse dans les tropiques humides. De manière idéale, ces cultures requièrent des précipitations supérieures à 100 mm par mois, bien distribuées et sans saison sèche prononcée; dans le cas contraire, l'irrigation est nécessaire (Stover et Simmonds 1987). Le génotype *balbisiana* (génomme B) est associé à une meilleure résistance à la sécheresse (León 1987). Ainsi les hybrides AAB et ABB s'adaptent mieux aux zones plus sèches, alors que les triploïdes AAA sont cultivés principalement dans des aires à distribution de pluie uniforme au cours de l'année, ou dans lesquelles l'irrigation est possible durant toute la période de culture (Sastry 1988). Lorsque la longueur de la saison sèche augmente, les génotypes AAB et ABB peuvent être cultivées, mais seulement pour la consommation locale, sachant que les fruits produits ne satisfont pas aux normes requises pour l'exportation (Stover et Simmonds 1987).

Les plantations doivent être évitées dans des régions où il existe des risques de vent fort (supérieur à 20 km/h), à cause du danger de déracinement des plantes ou de destruction partielle ou totale du système foliaire (Sastry 1988).

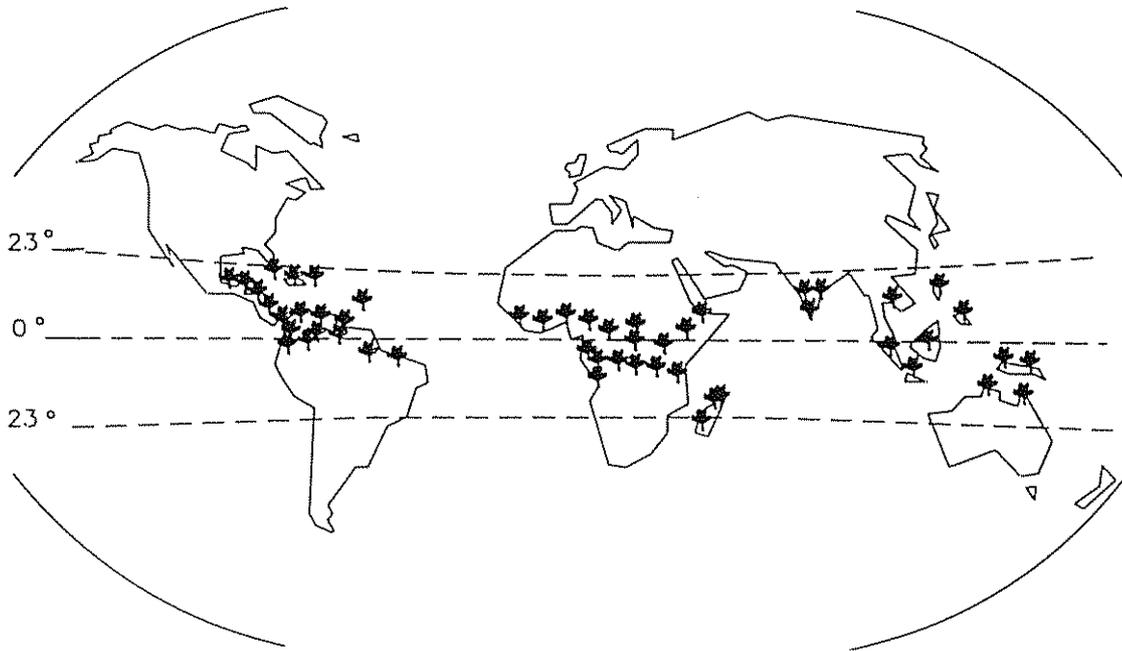


Figure 1. Zones de culture du bananier plantain dans le monde (d'après Tezenas du Montcel 1985).

## 1.1.2 Caractéristiques générales du Costa Rica.

### 1.1.2.1 Situation et relief

Le Costa Rica occupe en Amérique Centrale une superficie de 51.000 km<sup>2</sup>, située entre 8°03' et 11°13' de latitude Nord et 82°32' et 85°57' de longitude Ouest. Il est limité au nord par le Nicaragua, au sud et à l'ouest par l'Océan Pacifique, à l'est par l'Océan Atlantique et au sud-est par le Panama.

Un système montagneux central, de direction N.O. – S.E, constitué par la Cordillère Volcanique du Guanacaste, la Cordillère Volcanique Centrale et la Cordillère du Talamanca, divise le pays en deux parties presque égales (figure 2): le versant caraïbe (région atlantique) et le versant pacifique (région pacifique). Le système montagneux central et les autres chaînes plus petites parallèles à la côte donnent un relief très accidenté, avec des vallées fertiles dans l'intérieur. Les vents humides, les fortes précipitations et le réseau hydrographique dense accélèrent les processus d'érosion dans les montagnes et contribuent à la formation des plaines étendues au sud-est, au nord et à l'est. Les caractéristiques orographiques du pays ont une influence importante sur la distribution spatiale de la pluie (figure 3).

Le territoire costaricien est situé à une latitude moyenne de 10° Nord, soit dans la région tropicale de l'Hémisphère Nord.

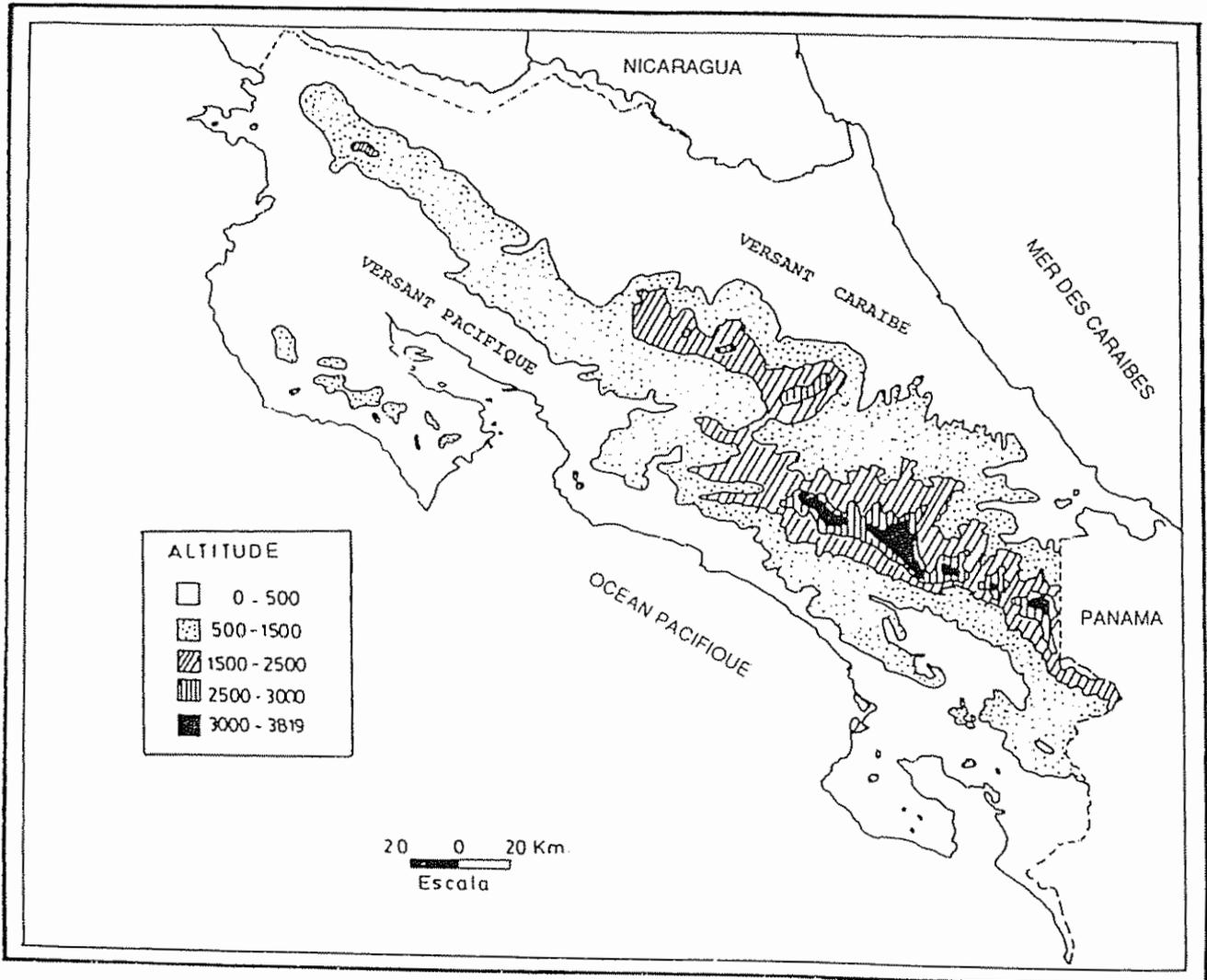


Figure 2. Orographie générale du Costa Rica.

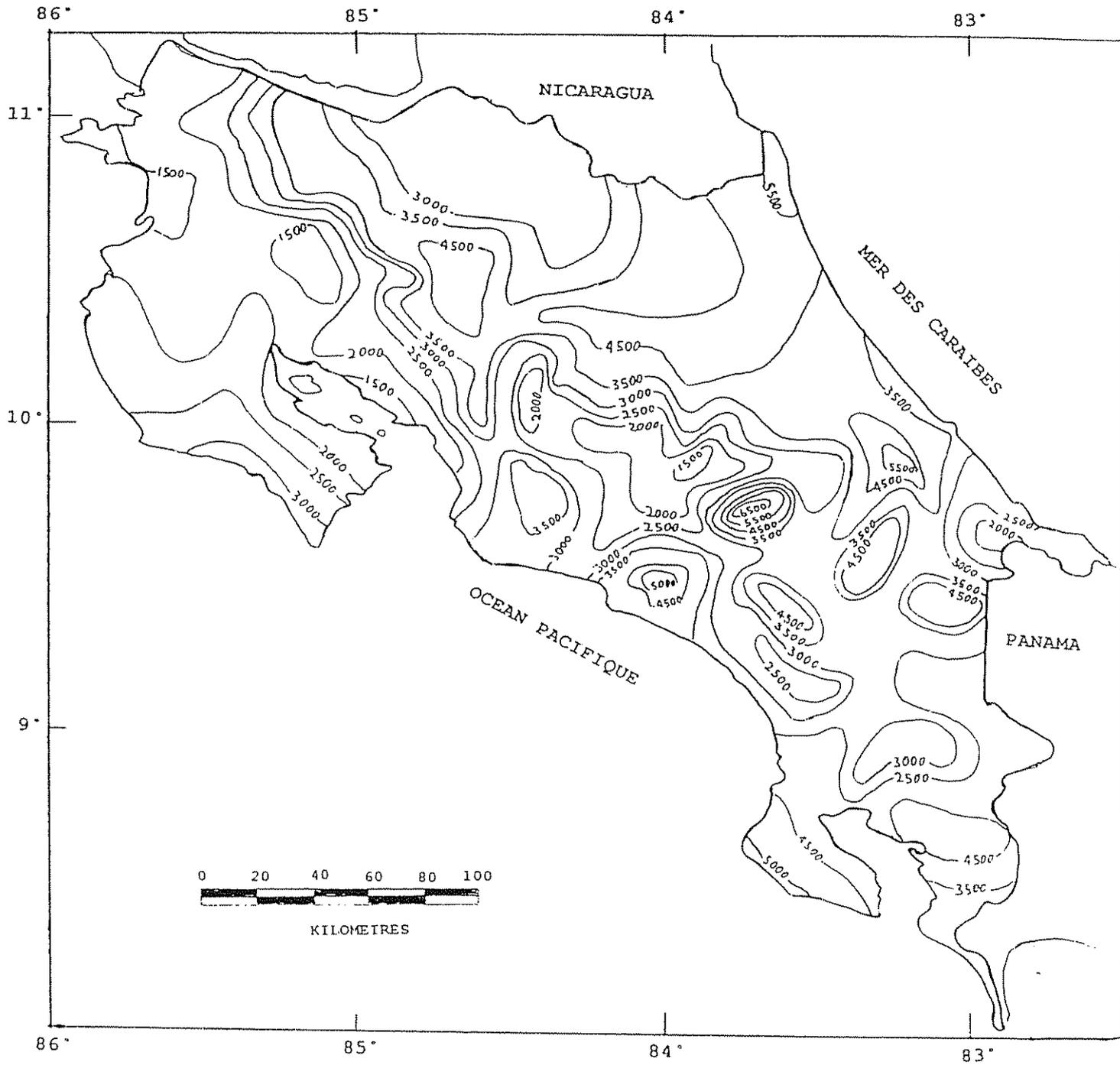


Figure 3. Isohiètes annuelles du Costa Rica (d'après Instituto Meteorológico de Costa Rica 1985).

### 1.1.2.2 Caractéristiques climatiques

#### a) Dynamique des masses d'air et régime thermique

Dans les eaux enserrant l'étroit isthme centroaméricain existent d'importants courants marins superficiels qui influent sur les systèmes atmosphériques qui affectent la région (Herrera, 1985). Ces courants chauds favorisent l'évaporation de l'eau et la formation de nuages qui sont transportés par le vent vers le continent.

Le facteur isthmique affecte le climat costaricien. En raison de l'étroitesse du pays (464 km dans la plus grande longueur et 119 km dans la plus grande largeur), les perturbations atmosphériques qui prennent naissance dans la Mer des Caraïbes peuvent affecter non seulement la région atlantique mais aussi la région pacifique et les régions montagneuses. De la même manière, les perturbations qui se développent dans l'Océan Pacifique affectent, en partie, le versant caraïbe.

Les principaux systèmes atmosphériques qui affectent le climat du Costa Rica sont les mouvements de la zone de convergence intertropicale (ZCI), les fronts froids qui viennent du nord et certaines ondes d'instabilité, dites "ondes de l'est", qui sont des perturbations atmosphériques tropicales qui se développent principalement de juin à octobre.

La ZCI est une zone d'interaction entre les vents alizés de l'Hémisphère Nord de direction nord-est et les vents alizés de l'Hémisphère Sud de direction sud-ouest. On y trouve un vaste système nuageux composé de couches ou rangs de nuages de différents types (Herrera, 1985).

En décembre (début de l'hiver dans l'Hémisphère Nord), l'anticyclone semi-permanent des Bermudes se déplace plus au sud de sa position originale (30° Lat. N.) en occasionnant de forts vents de direction nord-est qui affectent l'Amérique Centrale. Ces vents, appelés populairement "nortes", transportent occasionnellement des masses d'air provenant des fronts froids modifiés, causant à leurs passage de fortes précipitations.

Le régime thermique du pays connaît des fluctuations journalières majeures (8 à 11 °C) tandis que l'amplitude mensuelle est réduite (2 à 3 °C). Les températures les plus élevées correspondent à la côte et aux terres de basse altitude, principalement dans la région pacifique. Dans la région atlantique, la température moyenne au niveau de la mer est de 26 °C, tandis que dans la région pacifique elle est de 27.6 °C. Le gradient altitudinal de température est de 0.57 °C/100 m du côté pacifique et 0.52 °C/100 m du côté atlantique.

La durée théorique d'insolation moyenne est 12 heures avec une différence maximale de 70 minutes entre le jour le plus court et le plus long de l'année. En moyenne, le soleil se lève à 6 heures et se couche à 18 heures.

#### b) Régime pluviométrique

Le Costa Rica a trois régimes de précipitations bien définis: le régime pacifique, le régime atlantique et le régime atlantique des régions montagneuses.

Le régime pacifique est caractérisé par des précipitations abondantes de mai à novembre et une période sèche de décembre à avril dans le pacifique central et nord, et relativement sèche de décembre à mars dans le pacifique sud. Septembre

et octobre sont les mois les plus pluvieux; en juillet il y a une diminution de la pluie (figure 4). Les pluies surviennent généralement entre 14 et 20 heures. Le régime pacifique concerne les terres situées entre les sommets des montagnes et la côte pacifique, mais aussi se présente dans les plaines situées au nord-ouest du versant caraïbe.

Le régime atlantique comprend le littoral et les plaines du nord et de l'est du versant caraïbe (régions productrices de bananier plantain et bananier). Il est caractérisé par l'absence de période sèche au cours de l'année. Il présente une diminution de la pluie durant les mois de mars et avril, et de septembre et octobre, principalement dans la région située plus à l'est sur la versant (figure 5). Les pluies surviennent principalement entre 15 et 20 heures et parfois le matin.

Le régime atlantique de montagne est le plus pluvieux du pays. Il pleut toute l'année. L'heure de début de la pluie ne suit pas de règle bien définie. Dans les bassins intermédiaires (1400 à 2200 m), la précipitation est plus élevée, entre 5000 et 7000 mm par année.

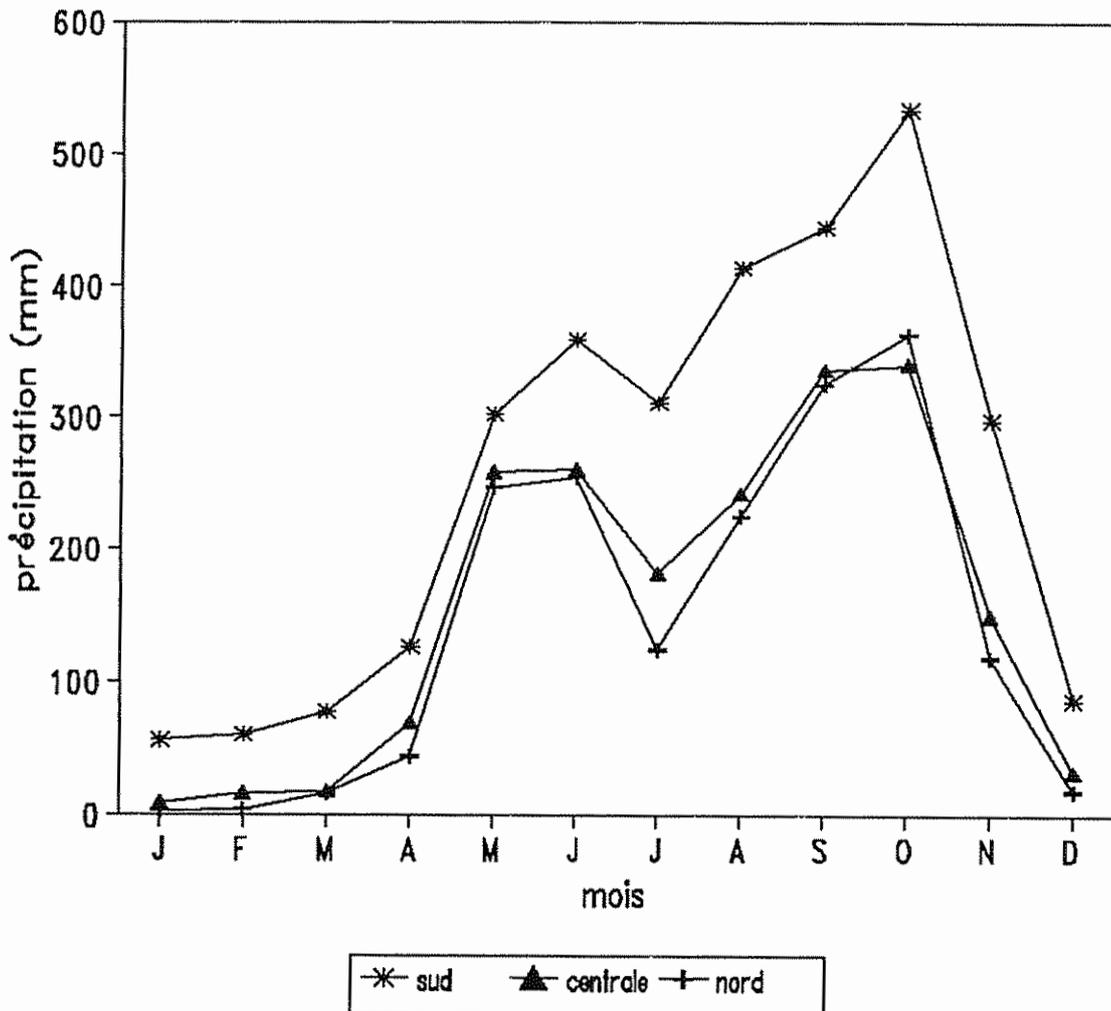
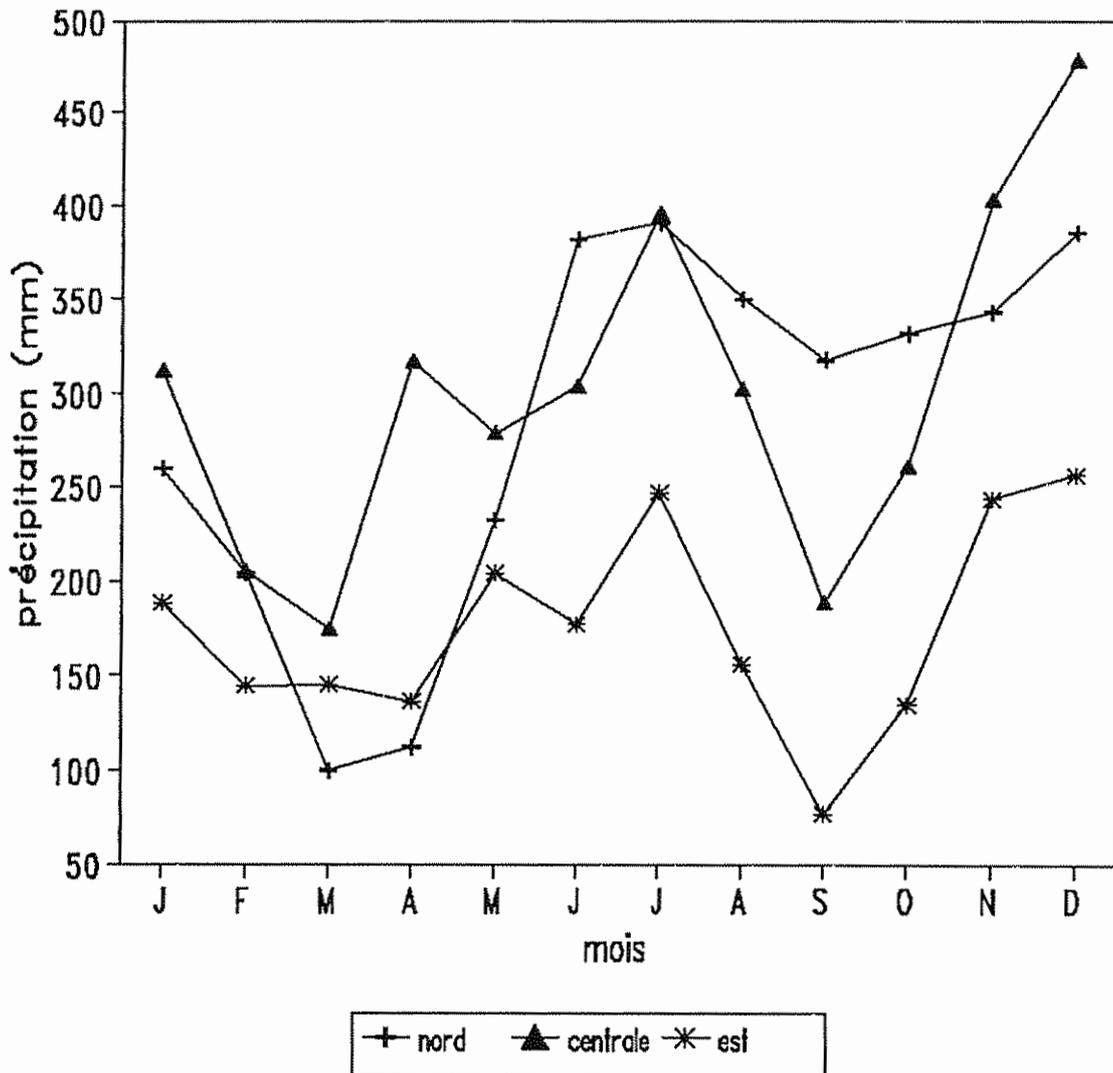


Figure 4. Régime de précipitation dans la région sud, centrale et nord du versant pacifique.



**Figure 5. Régime de précipitation dans la région nord, centrale et de l'est du versant atlantique.**

Le régime pluviométrique du Costa Rica dépend principalement de la zone de convergence intertropicale (ZCI), des ondes de l'est et des fronts froids.

La ZCI définit en grande partie le régime pluviométrique du Costa Rica de mai jusqu'à la fin de l'année, principalement dans la région pacifique. Les mouvements de la ZCI, soit vers le nord ou le sud de l'Amérique Centrale, sont à l'origine de différentes saisons. D'après Trojer (1966) dans les tropiques américains, la ZCI est située à 12° de latitude Sud au début de l'année. Dans ces conditions le début des pluies a lieu entre 6° et 20° Sud. Cette position explique en grande partie la période sèche qui caractérise le régime pacifique de pluie du Costa Rica de décembre à avril. En mai, la ZCI se déplace vers le nord, près de 6° de latitude Nord en occasionnant des pluies entre 14° Nord, et 2° Sud. En juillet, la ZCI se trouve entre 18° et 20° Nord et l'influence pluvieuse est observée entre 10° et 12° Nord.

En décembre, avec le début de l'hiver dans l'Hémisphère Nord et le déplacement de l'anticyclone des Bermudes plus au sud, se produisent des vents forts (alizés) qui transportent des masses d'air polaire. Ces masses d'air causent, à leur passage de fortes précipitations dans la région atlantique du fait qu'elles sont retenues par les cordillères du système montagneux central, avec des vents forts et un ciel clair dans la région pacifique. Parfois les vents alizés transportent des masses provenant de fronts froids très modifiés qui provoquent des précipitations abondantes et inondations dans la région atlantique.

Les ondes de l'est se présentent au Costa Rica principalement de mai à octobre en occasionnant du mauvais temps dans toute la région atlantique, des pluies faibles et une nébulosité considérable et persistante dans les montagnes et dans les parties basses des vallées intermontagneuses.

### 1.1.3 Caractéristiques de la région atlantique

La région qui nous intéresse plus particulièrement se situe au nord et à l'est du pays (figure 6), là où se trouvent les principales zones productrices de bananier plantain et de bananier. C'est une région de relief très homogène, constituée par une série de plaines légèrement ondulées, interrompues parfois par de petits massifs de relief plus fort, de 200 à 350 m d'altitude. Au sud, on rencontre un piémont qui remonte jusqu'aux versants des chaînes montagneuses à une altitude de 600 m environ.

Les figures 7 et 8 montrent, à titre d'exemple, les conditions climatiques (précipitation, évapotranspiration potentielle, humidité relative, vitesse du vent, température, durée d'insolation et rayonnement solaire) typiques de la région atlantique du Costa Rica, en prenant comme référence la station météorologique "los diamantes" située à Guápiles.

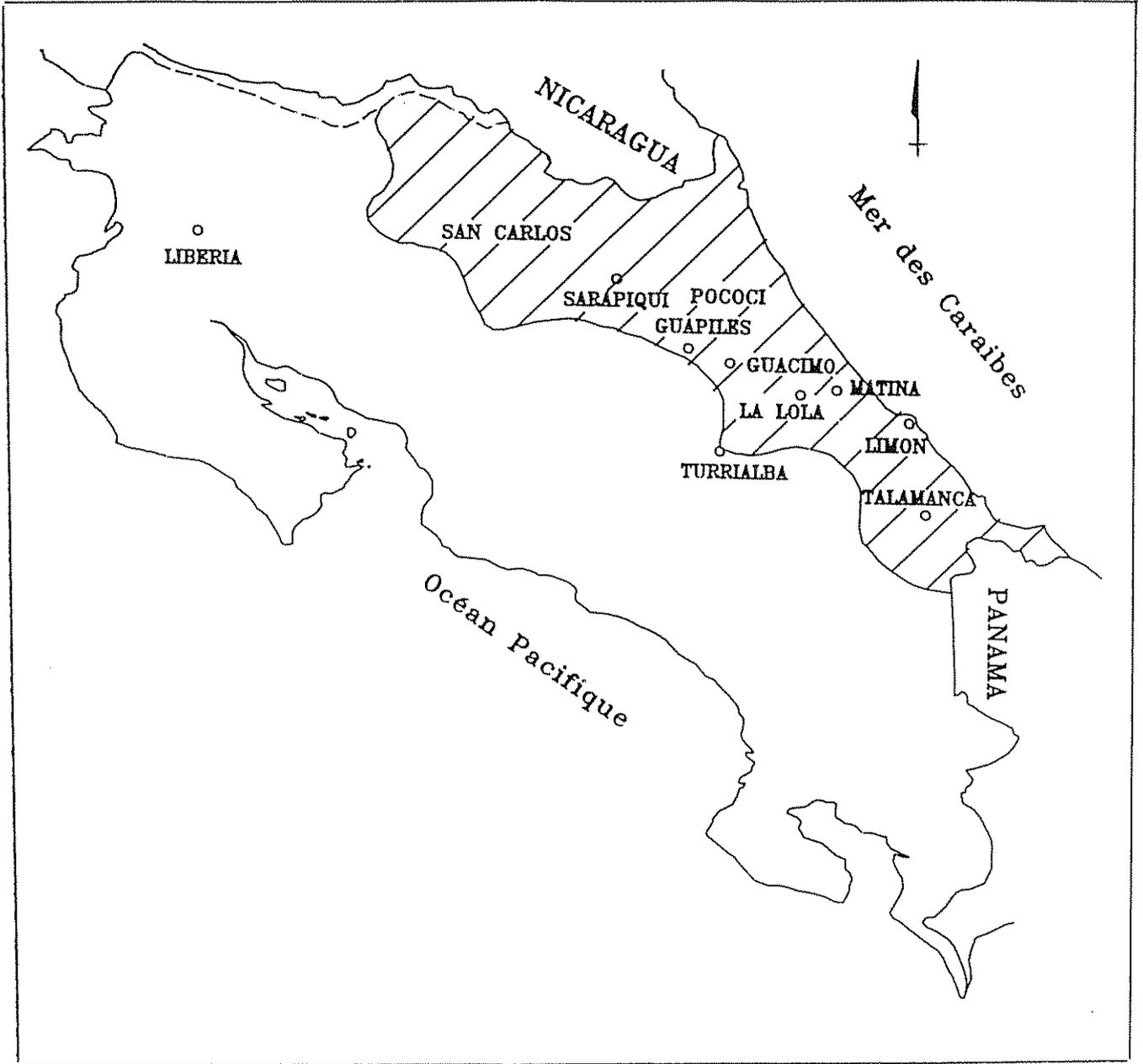


Figure 6. Région nord-est du Costa Rica (partie hachurée de la carte) dans laquelle se trouve la plupart des plantations de Musacées.

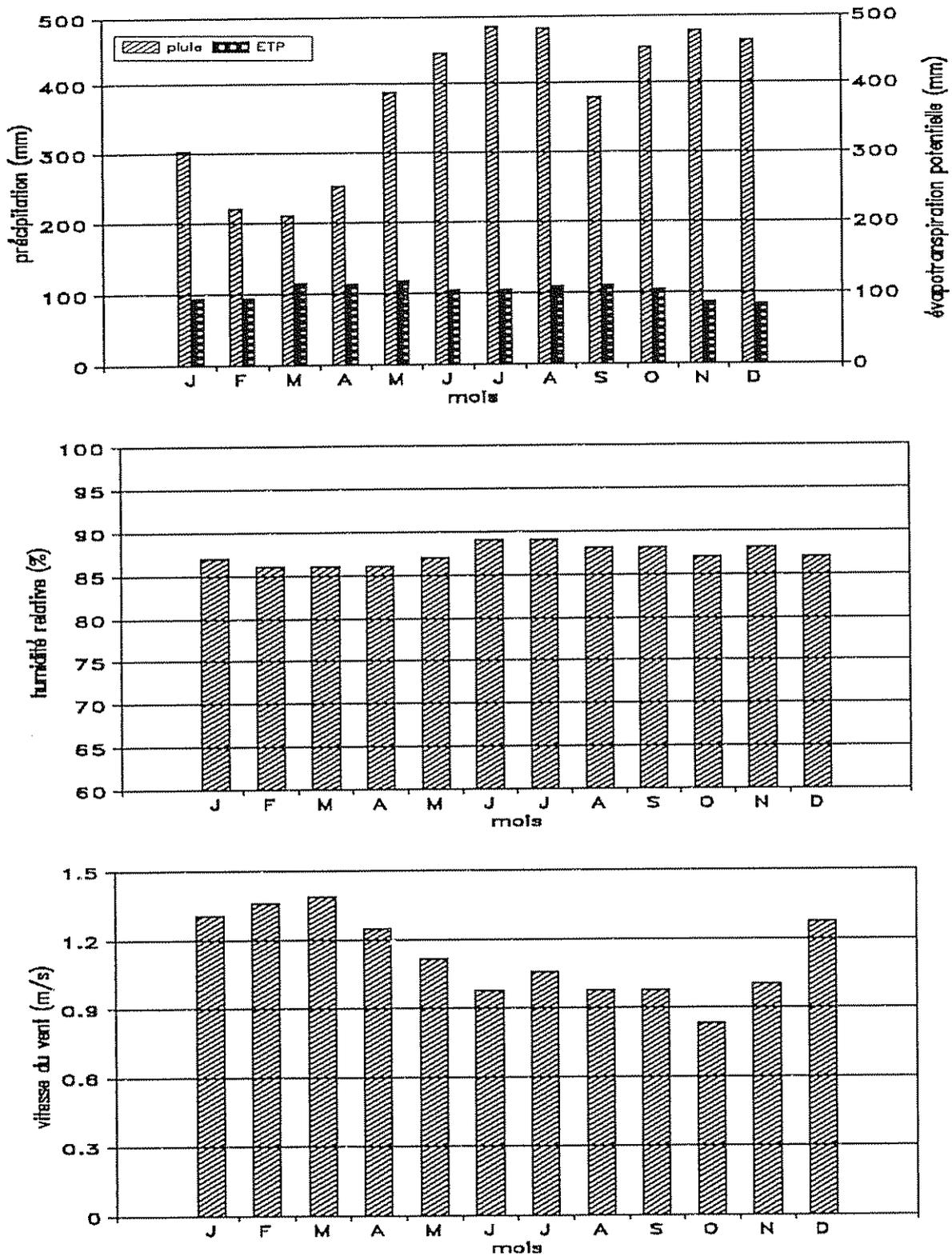


Figure 7. Conditions typiques de pluviométrie, d'évapotranspiration potentielle, d'humidité relative et de vitesse du vent rencontrées dans la région atlantique du Costa Rica (station météorologique "diamantes" Lat. 10° 13' N., Long. 83° 46' O., Alt. 249 m).

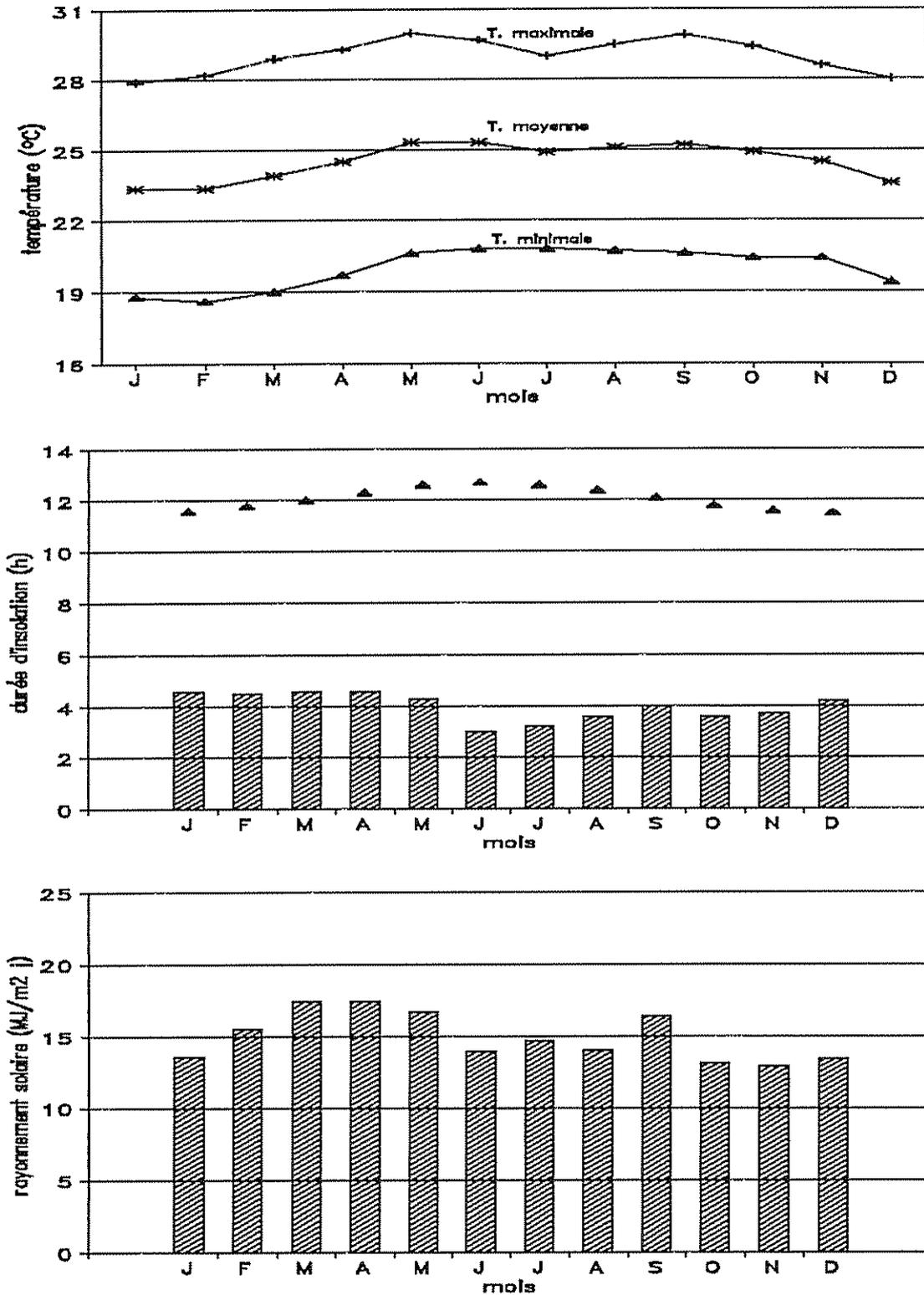


Figure 8. Conditions typiques de température, de durée d'insolation et de rayonnement solaire rencontrées dans la région atlantique du Costa Rica (station météorologique "diamantes" Lat. 10° 13' N., Long. 83° 46' O., Alt. 249 m).

## 1.2 L'hôte

### 1.2.1 Classification taxinomique et nomenclature.

D'après Simmonds (1962), les Musacées appartiennent à la classe des monocotylédones, ordre des Zingibéracées ou des Escitaminaes, famille des Musacées, genre *Musa*. Ce genre se divise en quatre sections dont une: Eumusa, comprend les espèces sauvages: *Musa acuminata* et *Musa balbisiana*, desquelles dérivent les plantains et les bananiers cultivés. Les fruits comestibles appartenant au genre *Musa* ont 22, 33 ou 44 chromosomes,  $n=11$  étant le nombre de base, par conséquent, ces variétés sont respectivement diploïdes, triploïdes et tétraploïdes. Les variétés triploïdes sont les plus communes (Stover et Simmonds 1987, León 1987).

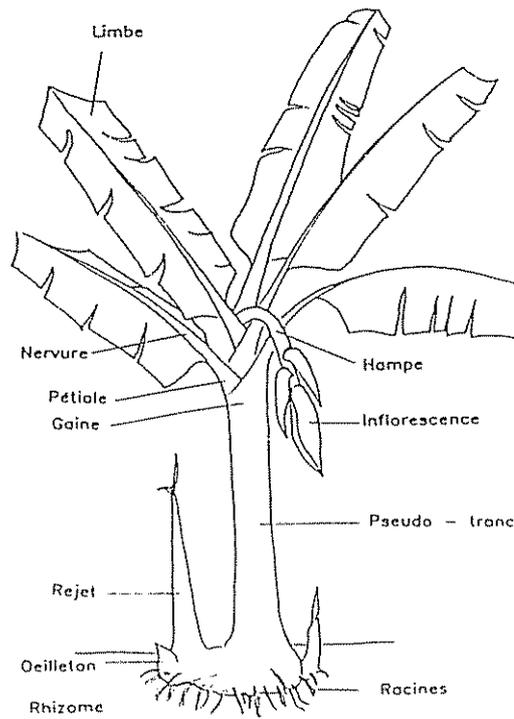
Simmonds et Shepherd (1955) ont proposé une méthode pour caractériser la contribution relative des deux espèces sauvages à la constitution des différentes espèces cultivées. A désigne le groupe de chromosomes provenant de la *M. acuminata* et B celui de la *M. balbisiana*. Ainsi, par exemple, les variétés de bananier du sous-groupe Cavendish ont seulement des génomes *acuminata*, et sa nomenclature est *Musa* (Groupe AAA), alors que le bananier plantain est un hybride qui présente une prédominance de génome *acuminata* sur le génome *balbisiana* et se nomme *Musa* (Groupe AAB).

### 1.2.2 Morphologie générale.

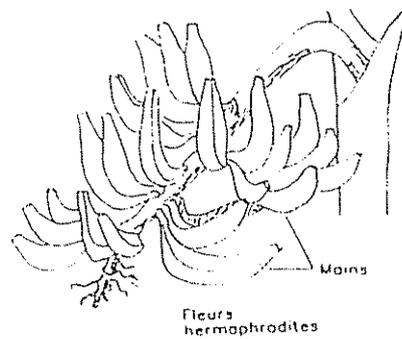
Le bananier plantain est une plante herbacée, pérenne, de port généralement haut (figure 9a). Des tiges souterraines poussent des pseudo-tiges aériennes, formées par les gaines foliaires qui se trouvent fortement imbriquées en forme hélicoïdale et par le centre desquelles croît l'axe floral (Champion 1968, León 1987). La tige souterraine se compose d'un rhizome formé par de nombreux entre-noeuds courts, de croissance apicale. Des noeuds poussent les racines en groupes de trois ou quatre. Le premier corme développe une pseudo-tige à partir de laquelle se produisent de nouveaux cormes. La plante croît ainsi dans le sens longitudinal et radial, de manière qu'autour de la première pseudo-tige, il y ait plusieurs bourgeons (oeilletons) et rejets d'âges divers.

L'inflorescence terminale naît sur la tige dans le sol, pousse à l'intérieur de la pseudotige et sort à son extrémité au centre du bouquet foliaire et se retourne vers le bas: c'est la formation du régime (figure 9b).

L'inflorescence portée par la hampe est recouverte de bractées qui, se soulevant les unes après les autres, laissent apparaître en premier des rangées de fleurs qui sont dites "femelles" car les organes floraux femelles (ovaire, style et stigmate) sont plus développés que les organes floraux mâles (étamines). Ce sont les ovaires de ces fleurs "femelles" qui se développent en plantains. Les fleurs mâles et femelles des plantains étant stériles, il n'y a pas de fécondation. Les ovules dégénérés contenus dans les ovaires ne se développent donc pas en graines et les plantains sont des fruits dits parthénocarpiques (sans graines). Après l'émission d'un certain nombre de mains de fleurs femelles, le bourgeon différencie des mains de fleurs hermaphrodites puis mâles (Champion 1968, Soto 1985, León 1987).



(a)



(b)

Figure 9. La plante (a) et le régime (b) du bananier plantain (d'après Tezenas du Montcel 1985).

### 1.2.3 Le système foliaire.

Le système foliaire du bananier plantain est formé par l'ensemble des feuilles issues de la pseudo-tige principale et des rejets. Une feuille développée est composée de cinq éléments: la gaine, le pétiole, la nervure centrale, la lame et l'appendice (Stover et Simmonds 1987, León 1987).

La gaine est la partie basale et enveloppante de la feuille qui fait partie de la pseudo-tige (Sandoval 1989). Elle est unie à la lame foliaire par un pétiole cannelé qui présente des nombreux faisceaux vasculaires minces, avec des cordons de fibres qui constituent le tissu de soutien. La nervure centrale prolonge le pétiole et s'amincit progressivement jusqu'à la pointe de la feuille. L'appendice est une prolongation de la nervure centrale qui permet à la feuille de s'ouvrir un passage à l'intérieur de la pseudo-tige (León 1987, Soto 1985).

La lame foliaire est dorso-ventrale et glabre (Flores *et al* 1985) et est divisée en deux semi-limbes par la nervure centrale. L'épaisseur de la lame varie entre 0,35 mm et 1 mm, en fonction de la partie du limbe, de la variété et de la ploïdie (Stover et Simmonds 1987), 0,5 mm étant la moyenne (Sandoval, 1989). Avant de s'ouvrir, la moitié droite de la feuille (vue de face) s'enroule sur elle-même et s'installe dans la cavité de la nervure centrale. La partie gauche s'enroule sur la droite et sur la nervure centrale. L'ensemble des deux parties de la feuille constitue un cylindre appelé cigare (figure 10) (León 1987). Cet enroulement a pour conséquence l'exposition de la face inférieure au milieu environnant.

Quand la feuille est sortie aux deux tiers, les semi-limbes commencent à se développer, en premier celui de gauche et ensuite celui de droite et de la pointe jusqu'à la base. La croissance des feuilles est continue et à une feuille lui succède immédiatement la suivante, de sorte que, alors que la feuille antérieure n'a pas fini de se développer, la suivante est en train de sortir (León 1987, Soto 1985)

La période entre l'apparition d'une feuille et de la suivante, varie de 7 à 11 jours pour la majorité des variétés. Cette durée dépend aussi des conditions climatiques de chaque site. Dans des conditions tropicales humides de Costa Rica, Sattler (1990) a trouvé un taux d'émission foliaire égal à 7,23 jours par feuille pour le bananier plantain type faux corne cv. 'curraré', tandis que Gauhl (1990), au Costa Rica également, a obtenu une émission foliaire moyenne d'une feuille tous les 7,6 jours. Une plante produit jusqu'au moment de sa floraison de 25 à 40 feuilles. Au Costa Rica, pour le bananier plantain cv. 'curraré', Sattler (1990) rapporte une moyenne de 36 feuilles.

Les dimensions des feuilles sont variables. Au Costa Rica, Gauhl (1990) a obtenu pour des plantes adultes de bananier plantain cv. 'curraré', avant floraison, une longueur moyenne des feuilles de 206 cm et une largeur moyenne de 81 cm, alors que Sattler (1990) dans la même région, pour le même variété et état phénologique, rapporte une longueur moyenne des feuilles de 212 cm et une largeur moyenne de 88 cm.

L'indice foliaire (IF) du bananier plantain dépend du système de culture et de la densité de plantation. A Trinité, Rao et Edmunds (1985) ont obtenu à la floraison, pour le type faux corne, planté à une densité de 1375 unités par hectare, un IF moyen de 2,8, avec 15,9 m<sup>2</sup> pour la plante mère et 2,1 m<sup>2</sup> pour le rejet. Pour le même état phénologique et pour une densité de plantation de 1710 unités par

hectare, Sattler (1990) a obtenu au Costa Rica une moyenne de 12,8 m<sup>2</sup> par plante, ce qui donne un IF de 2,2, tandis que Martínez (1982) a obtenu en Colombie une surface foliaire de 13,2 m<sup>2</sup> par plante, soit un IF de 2,3.

La figure 11 montre le profil de densité de surface foliaire obtenu dans une plantation de bananier plantain cv. 'curraré' à Turriaba, Costa Rica. La totalité de la surface foliaire (IF= 3.4) se situe entre 1 et 5 m. La plupart de la densité se trouve entre 3 et 5 m. La surface foliaires est calculée à l'aide de la relation suivante:  $S= 0.81(l \times L)$ , où l et L désignent respectivement, la plus grande largeur et la longueur de la feuille. Dans le cas où une feuille appartient à deux strates, les surfaces foliaires ont été estimées par planimétrie.

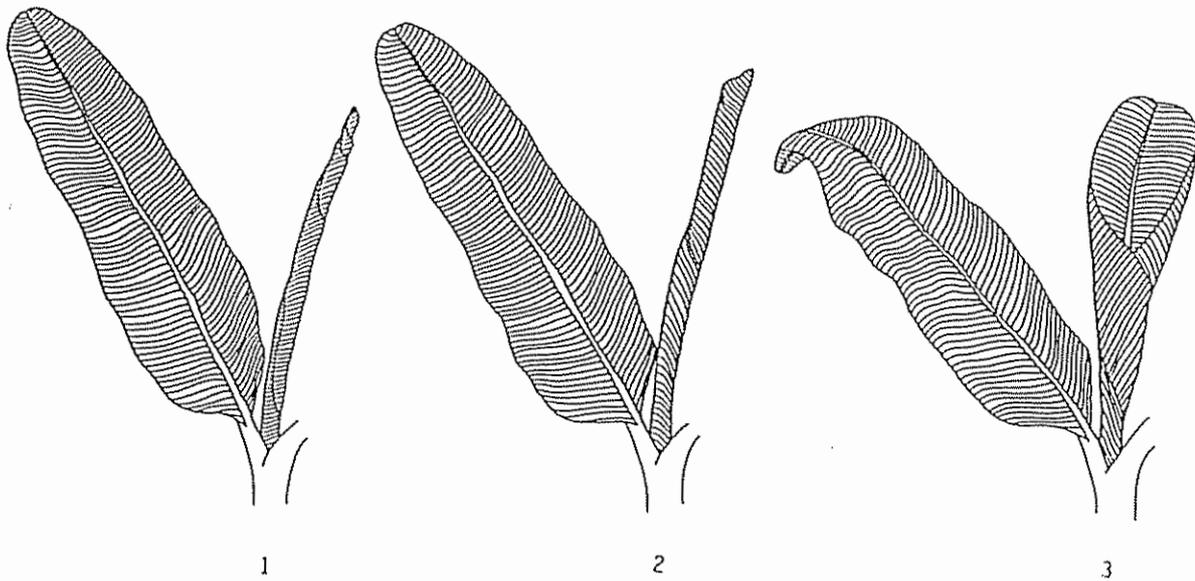


Figure 10. Différents stades de développement de la feuille cigare du bananier plantain.

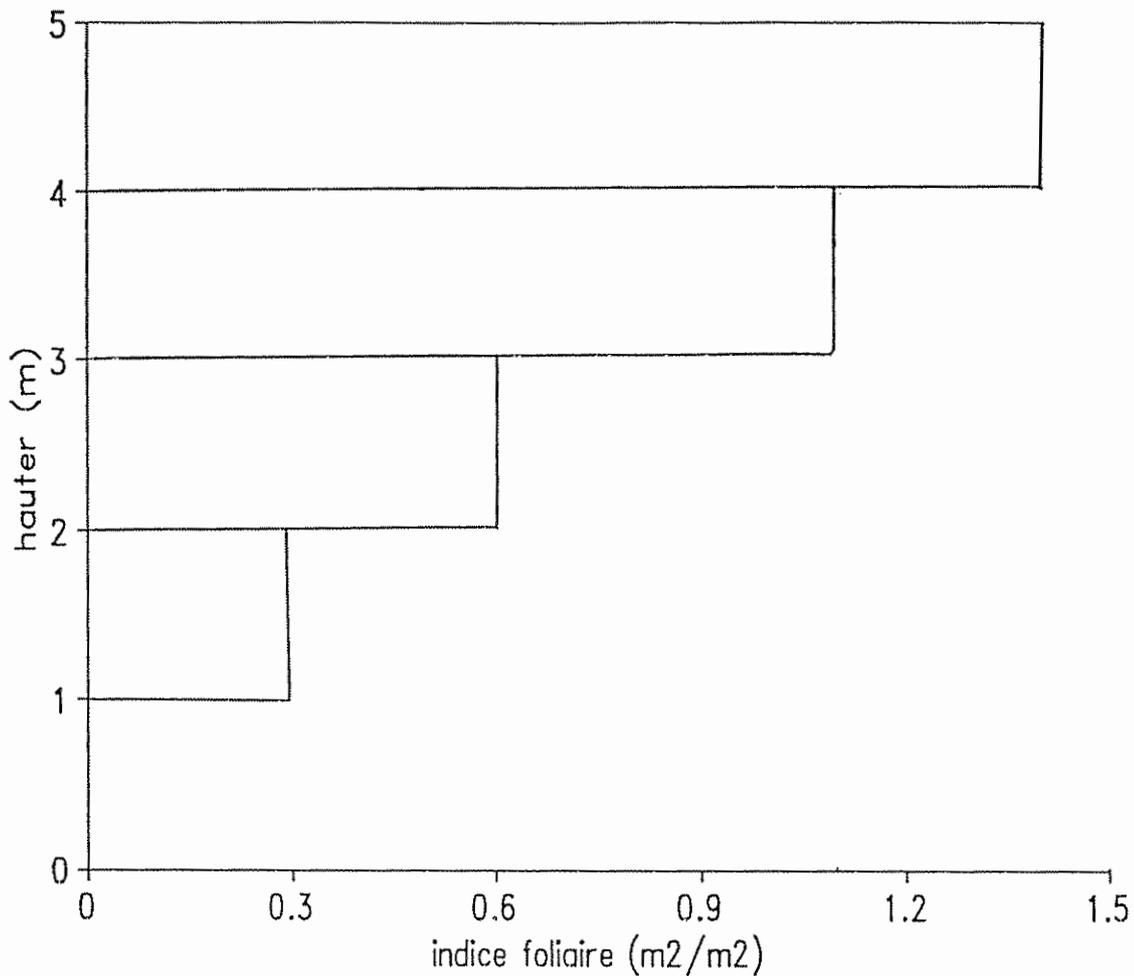


Figure 11. Profil de densité de surface foliaire d'un couvert de bananier plantain type faux corne, cv. 'currare'. Turrialba, Costa Rica, 1991.

Les feuilles de bananier plantain sont amphistomatiques, mais les stomates sont plus nombreux sur la face inférieure que sur la supérieure (Lorenzo *et al* 1978, Stover et Simmonds 1987). La densité stomatique dépend du cultivar (Flores *et al*, 1985). Soto (1985) indique qu'une feuille peut avoir 150 à 300 millions de stomates. Le nombre et la taille des stomates est aussi en relation avec la ploïdie. Borges (1971) a trouvé une relation inverse entre la ploïdie et la densité stomatique, mais directe avec la taille des stomates. A titre d'illustration le tableau 1 présente les données de densité stomatique que nous avons obtenues à Turrialba, pour différentes feuilles, différentes parties de la feuille et différentes surfaces de la feuille de bananier plantain type faux corne cv. 'curraré'.

Tableau 1. Densité stomatique moyenne\* (nombre de stomates mm<sup>-2</sup>) sur différentes feuilles et parties de la feuille du bananier plantain, type faux corne cv. 'curraré'. Turrialba, Costa Rica, 1992. (Jiménez et Vásquez, données non publiées).

Parties de l'extrémité distale de la feuille						
Feuille	Près du bord		Partie centrale		Proche de la nervure centrale	
	Surface supérieure	Surface inférieure	Surface supérieure	Surface inférieure	Surface supérieure	Surface inférieure
Cigare	13	164	14	176	6	180
Feuille 1	14	119	13	169	4	198
Feuille 4	19	132	24	188	14	203

Parties de la section centrale de la feuille						
Feuille	Près du bord		Partie centrale		Proche de la nervure centrale	
	Surface supérieure	Surface inférieure	Surface supérieure	Surface inférieure	Surface supérieure	Surface inférieure
Cigare	7	106	9	236	24	203
Feuille 1	5	120	5	225	14	193
Feuille 4	9	112	19	208	17	148

Parties de l'extrémité proximale de la feuille						
Feuille	Près du bord		Partie centrale		Proche de la nervure centrale	
	Surface supérieure	Surface inférieure	Surface supérieure	Surface inférieure	Surface supérieure	Surface inférieure
Cigare	16	182	29	242	22	273
Feuille 1	4	167	3	234	9	181
Feuille 4	10	115	20	206	21	161

\* Moyenne de 10 champs optiques.

### 1.3. La maladie et l'agent pathogène.

#### 1.3.1 Importance de la maladie.

La Sigatoka noire, maladie causée par le champignon *Mycosphaerella fijiensis*, est le principal problème phytopathologique des cultures de bananier plantain et de bananier en Amérique, Afrique et Asie. Elle attaque les feuilles et si elle n'est pas combattue opportunément, elle produit une détérioration rapide de la surface foliaire. Elle affecte la croissance et la productivité des plantes en réduisant la surface foliaire et l'assimilation photosynthétique. Elle occasionne également une diminution de la qualité du fruit, en favorisant le mûrissement prématuré des régimes (Marín et Romero 1992).

Cette maladie a été identifiée en 1963 dans les îles Fidji (Rhodes 1964), bien qu'elle ait été largement dispersée dans le Pacifique bien avant son identification (Stover 1987). Elle est apparue pour la première fois en Amérique Centrale, en 1972, au Honduras. Elle est arrivée au Costa Rica, en 1979 et s'est disséminée rapidement, de manière qu'en 1980, elle se trouvait dans toutes les zones principales de production de bananier et de bananier plantain du pays.

La Sigatoka noire a remplacé progressivement la Sigatoka jaune (*Mycosphaerella musicola*) dans beaucoup d'endroits (figure 12), et étant donnée sa distribution actuelle, on considère que son importance est probablement sous-estimée. Les taux de dispersion observés dans différentes régions font penser que dans la prochaine décennie, cette maladie sera présente dans toutes les régions du monde où poussent les Musacées comestibles (Mourichon et Fullerton 1990). Cependant, malgré son activité parasitaire élevée dans les zones de production traditionnelles de basse altitude, elle est absente des sites de production d'altitude, où l'unique espèce présente est la *M. musicola* (Stover 1980, Jones 1990). Les températures basses semblent être un des facteurs expliquant ce comportement parasitaire particulier (Moulion-Pefoura et Mourichon 1990).

Au Costa Rica, comme dans d'autres pays, la présence de la Sigatoka noire a obligé à modifier les stratégies de lutte en vigueur jusque là contre la Sigatoka jaune. Il a été nécessaire d'augmenter le nombre d'applications fongicides, d'améliorer les équipements et les techniques d'application, d'utiliser de nouveaux produits fongicides plus efficaces, et d'encourager une application stricte des pratiques de culture. Tous ces facteurs réunis ont occasionné une augmentation des coûts de lutte contre la maladie, qui sont estimés, pour l'année 1990 à un montant de, entre 600 à 800 US\$ par hectare, et pour 1993, à un montant de 1000 à 1200 US\$ (principalement à cause de l'augmentation du nombre d'applications, figure 13). Cependant, pour le bananier plantain, principalement culture de subsistance et d'approvisionnement du marché interne, ses caractéristiques d'exploitation n'ont pas permis d'adapter un système de lutte similaire à celui du bananier.

#### 1.3.2 Symptômes.

Les symptômes de la S. noire ont été étudiés par différents auteurs (Rhodes 1964, Leach 1964, Meredith et Lawrence 1969, Stover et Dickson 1976, Mulder et Stover 1976, Foure *et al* 1984, Gauhl 1990). La maladie évolue à l'intérieur de la plante selon la succession de stades suivante:

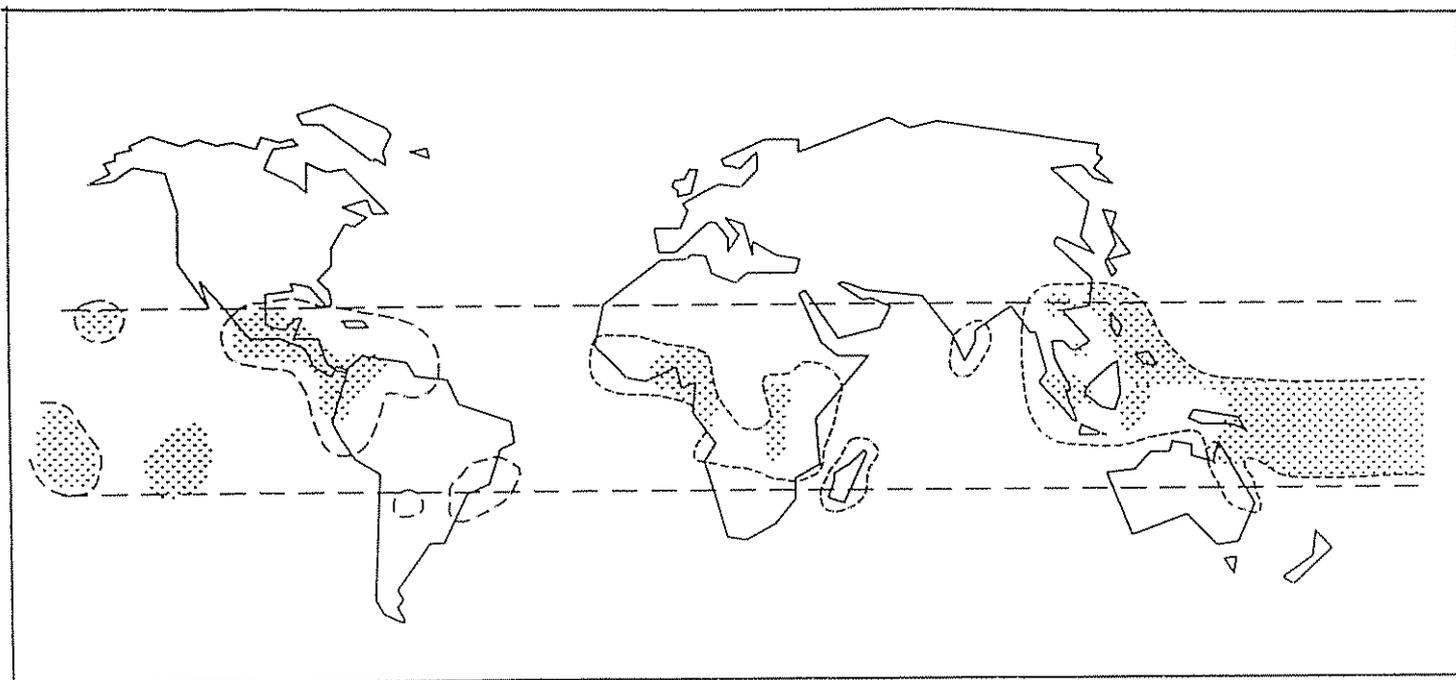


Figure 12. Distribution géographique de la Sigatoka noire (zone gris) et de la Sigatoka jaune (zone blanche) dans le monde (d'après Mourichon et Fullerton 1990).

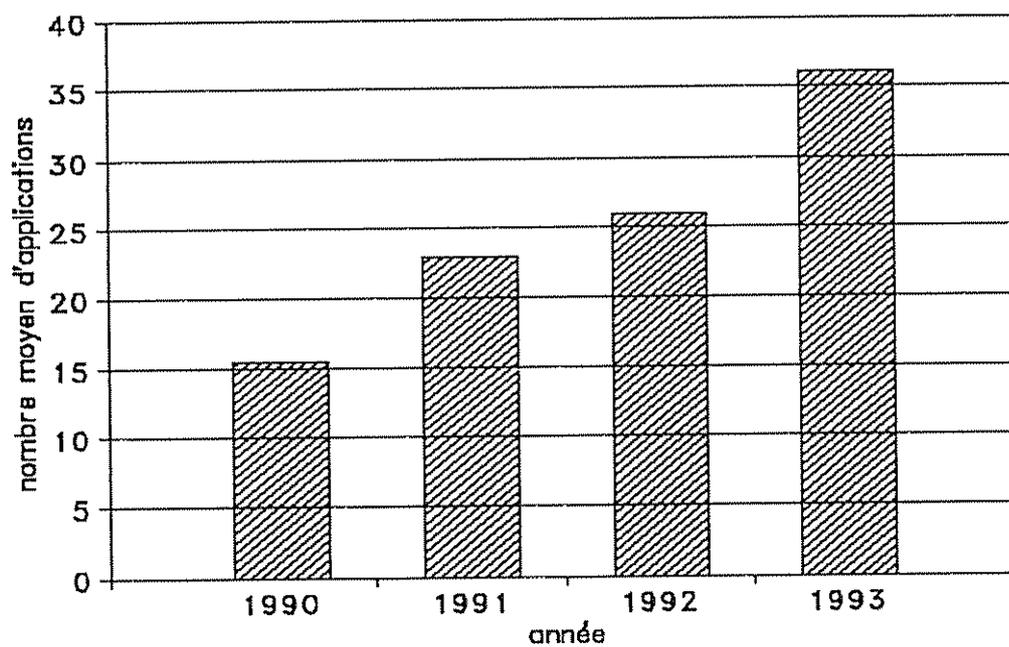


Figure 13. Variation annuelle du nombre moyen d'applications fongicides effectuées dans la lutte contre la Sigatoka noire au Costa Rica depuis 1990.

Stade 1: il correspond à de petites décolorations blanches ou jaunes, de moins d'1 mm de long, visibles uniquement à l'envers de la feuille et appelées tirets. En conditions naturelles, elles apparaissent principalement près du bord du côté gauche de la feuille, et spécifiquement vers l'extrémité. Quand l'infection est sévère, ces symptômes apparaissent sur la deuxième feuille des plantes sans fructifier et sur la première feuille des plantes naissantes.

Stade 2: avec le temps, les tirets s'allongent en formant des stries de 2 à 3 mm de long, parallèles à la veinure, de couleur café-rougeâtre et visibles sur les deux faces la feuille. Les stries peuvent présenter une disposition; vers l'extrémité, sur les deux bords de la feuille, ou bien sur un ou les deux côtés le long de la nervure centrale, cette dernière disposition étant la plus commune.

Stade 3: les stries augmentent jusqu'à atteindre une longueur de 5 à 20 mm, en changeant leur coloration en un ton café foncé, presque noir. A partir de ce stade apparaissent les conidiophores qui sont les organes de production des conidies.

Stade 4. les stries croissent en longueur et en largeur et acquièrent une forme elliptique. Plusieurs stries peuvent coalescer, en donnant naissance à une tache irrégulière, noire sur la face adaxiale et marron (ou café) sur la face abaxiale. A ce stade il est courant de trouver, en présence de rosée ou après une pluie, un bord aqueux autour de la tache.

Stade 5: les taches commencent à sécher, occasionnant une dépression dans le tissu malade. Parfois, il peut se présenter un léger jaunissement du tissu autour de la lésion, mais fréquemment aussi, les lésions coalescent en une grande tache noire sans montrer de zones jaunâtres à ses alentours.

Stade 6: finalement le centre de la lésion sèche, devient légèrement gris et la dépression augmente. La tache s'entoure d'un bord sombre, noir, bien défini. A ce stade, on peut apprécier clairement la présence des périthèces. Dans les cas d'infection sévère, les feuilles malades sèchent et meurent dans les trois ou quatre semaines suivant l'apparition des premiers symptômes.

En général, on peut dire que les effets de la maladie sur la plante sont la défoliation, la réduction de la vigueur végétative, la perte de poids des régimes, le mûrissement prématuré et la perte de qualité du fruit. Il est important aussi de mentionner que l'efficacité des produits fongicides se concentre sur les stades 1 et 2, sachant qu'à partir du stade 3 l'action curative est très limitée.

### 1.3.3 Virulence.

La *M. fijiensis* est une espèce hautement pathogène pour un large éventail d'hôtes (Mourichon et Fullerton 1990) et a une activité parasitaire très supérieure à la *M. musicola* (Moulion-Pefoura et Mourichon 1990). Dans les endroits où la S. noire est arrivée, la S. jaune a été remplacée en trois ans approximativement (Stover 1987). Au Honduras, la S. noire s'est transformée en épidémie en 1973-1974 et a remplacé la S. jaune en deux ans (Stover et Dickson 1976).

La virulence est mesurée en fonction du taux d'apparition des taches sur la feuille infectée la plus jeune (Stover 1971). Au Honduras, quand la S. noire s'est présentée, les lésions apparaissaient sur les feuilles 4 ou 5 des plantes de bananier en l'absence de traitements. Quand la S. noire a remplacé la S. jaune dans la même

zone, les lésions sont apparues sur les feuilles 3–4 et parfois sur les feuilles 2–3 (Stover 1980a).

Les inoculations réalisées au Honduras et les observations sur le terrain ont montré que les taches ou les lésions apparaissaient de 8 à 10 jours plus rapidement avec la *S. noire* qu'avec la *S. jaune* (Stover 1980a) et que leur maturité est acquise 6 à 7 jours plus tôt (Mulder et Stover 1976).

Stover et Simmonds (1987) mentionnent que, dans les zones où la *S. jaune* était encore présente (par exemple dans les îles des Caraïbes), elle était combattue avec 6 à 15 pulvérisations par an, alors que là où la *S. noire* l'avait remplacée (par exemple en Amérique Centrale, au Mexique et en Colombie), 35 à 45 applications de la même formulation étaient nécessaires.

### 1.3.4 Le pathogène responsable de la Sigatoka noire.

La Sigatoka noire est causée par le champignon ascomycète *Mycosphaerella fijiensis* Morelet qui correspond à la forme parfaite du *Pseudocercospora fijiensis* (Morelet) Deighton (Pons 1990).

Le cycle de vie du pathogène présente deux types de reproduction: sexuée et asexuée (figure 14), et produit trois types de structures reproductives: durant la phase asexuée, les conidiophores sur lesquels se produisent les conidies; durant la phase sexuée, les spermogonies qui sont les organes masculins qui contiennent les spermacies, et les périthèces qui sont les organes féminins qui contiennent les ascospores (Bustamante et López 1982). Les ascospores et les conidies sont les seuls capables de germer et de pénétrer dans les tissus foliaires.

### 1.3.5 Importance du type de spore dans l'évolution de la maladie.

Des observations réalisées sur la production de conidies, les dénombrements dans des pièges à spores et la décharge de spores de tissus nécrosés, indiquent que les ascospores sont la principale et plus grande source d'inoculum de *M. fijiensis*, tandis que les conidies ont un rôle secondaire dans la dissémination et le développement de la maladie (Stover 1980a). Des résultats similaires sont rapportés par Blanco (1987), Leach (1964) et Gauhl (1990). Par exemple, Gauhl (1990), dans une étude réalisée au Costa Rica, rapporte que les concentrations de conidies dans l'air ont été jusqu'à 100 fois moins importantes que celles des ascospores.

La feuille cigare est la principale cible des spores de la *M. fijiensis* (Stover, 1990). D'autres auteurs (Stahel 1937, Leach 1946) ont aussi rapporté que la surface inférieure du cigare et les feuilles les plus jeunes sont les plus propices à la contamination.

### 1.3.6 Production et dispersion des spores.

Pour la *M. fijiensis*, les premiers conidiophores se développent à l'état de jeunes stries et émergent des stomates sur la surface inférieure de la feuille (Meredith et Lawrence 1969, Stover et Simmonds 1987). Les conidies formées sur les conidiophores sont ensuite déplacées rapidement par le vent ou l'eau (Stover et Simmonds 1987), action facilitée pour cette espèce, par la formation d'un hile ou cicatrice dans la base des conidies (Stover 1987).

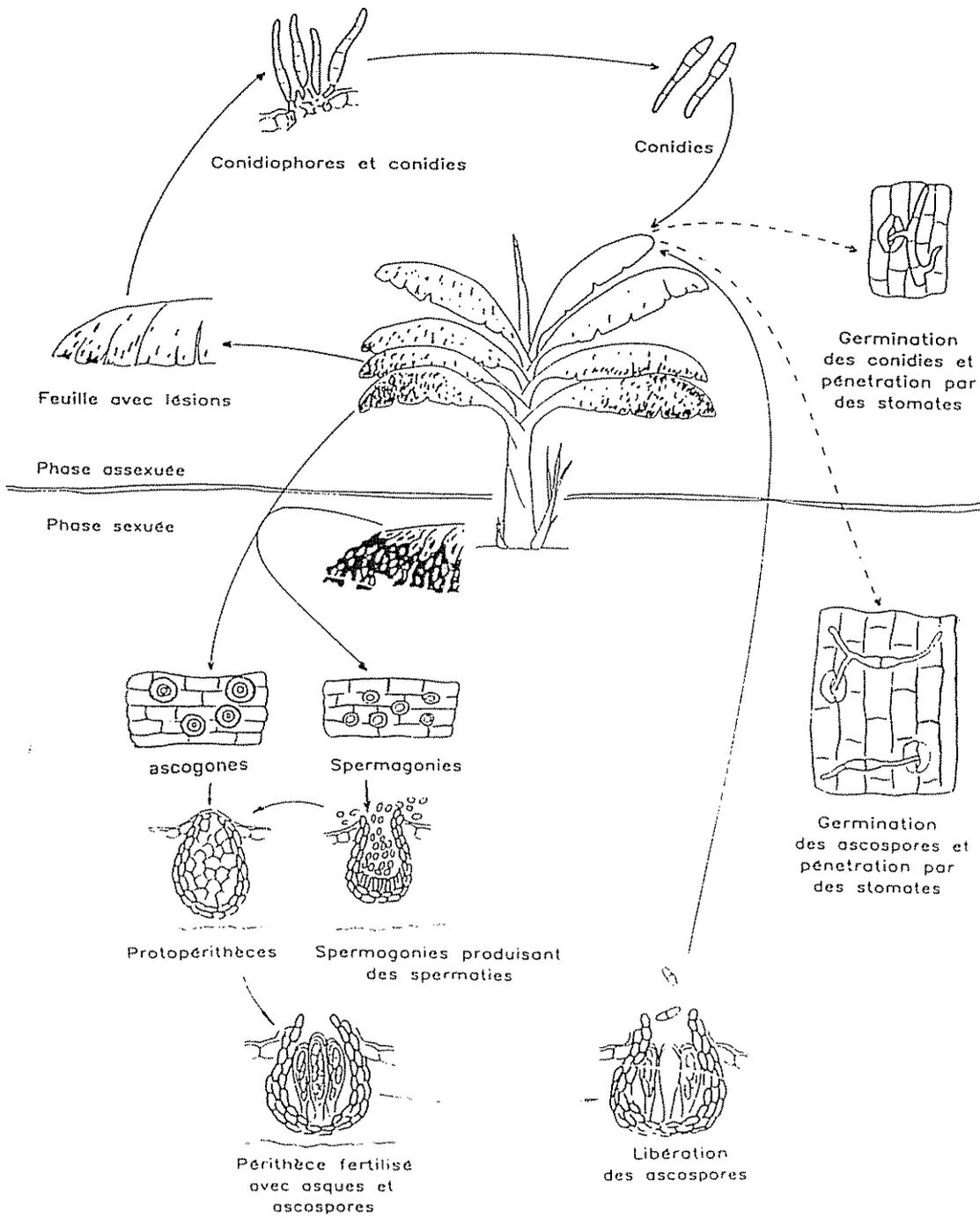


Figure 14. Le cycle de la Sigatoka noire (adapté d'après González 1979).

La production de conidiophores pour cette espèce est de courte durée, du fait que les chambres sous-stomatiques sont rapidement utilisées pour la production de périthèces et de spermogonies (Stover 1980a).

Les spermogonies se développent entre le second stade de stries et le premier stade de taches, et sont plus abondantes sur la face inférieure de la feuille que sur la face supérieure (Meredith et Lawrence 1969). Une fois mûres, les spermaties sont libérées des spermogonies et transportées par l'eau (rosée, pluie) en mouvement jusqu'aux périthèces. La fertilisation des périthèces par les spermaties conduit à la formation des ascospores (Bustamante et López 1982).

Les périthèces se trouvent en plus grande abondance sur la surface inférieure de la feuille, sur une tache isolée, mais lors d'une infection massive, ils peuvent se présenter sur les deux faces (Stover 1972). Durant l'époque pluvieuse et avec des températures supérieures à 20 °C, les périthèces se forment massivement dans les tissus foliaires sur lesquels il y a coalescence des lésions ou qui sont les plus densément affectés (Stover 1964, Stover 1968, Pérez 1978).

Les ascospores ont besoin d'eau libre sur les feuilles pour être libérées des périthèces, puis elles sont disséminées par le vent à l'intérieur de la même plantation et vers d'autres zones. Ainsi, les modèles de libération dépendent de la pluie et de la rosée (Meredith *et al* 1973, Stover 1987, Stover 1980a). Martínez (1989) a obtenu que les précipitations et le nombre de jours de pluie sont les facteurs climatiques qui influent le plus sur la production de conidies, la période de production conidiale, l'apparition des périthèces et la libération d'ascospores de *S. noire*.

### 1.3.7 L'évolution de la maladie.

Quand l'agent pathogène est entré en contact avec l'hôte et que les conditions sont favorables, la maladie se développe. On peut distinguer trois étapes principales:

#### a) La contamination

C'est une période durant laquelle le parasite se développe à l'extérieur de l'hôte puis pénètre à l'intérieur de celui-ci. Elle comprend trois étapes successives: la germination, la croissance du tube germinatif et la pénétration de ce dernier dans le tissu foliaire. Pour caractériser la germination, la plupart des auteurs retiennent un critère de longueur du tube germinatif. Une conidie est considérée germée lorsque le tube germinatif atteint un quart de la longueur de la spore; une ascospore est considérée germée quand le tube germinatif atteint une longueur égale au diamètre de la spore. Dans des conditions très favorables (présence d'eau libre et température optimale), la germination des spores peut survenir sur la surface inférieure de la feuille en deux heures (Stover 1980a), quoique généralement elle nécessite plus de temps. Pour obtenir un pourcentage de germination des conidies voisin de 90 à 100%, Jacome *et al* (1991) estiment une durée de 16 à 24 heures; dans le cas des ascospores, ces auteurs trouvent que 8 heures sont suffisantes pour atteindre un pourcentage de germination de l'ordre de 90%. Jacome *et al* (1991) mentionnent que bien que la germination soit maximale en eau libre, les ascospores peuvent germer à des humidités relatives comprises entre 98 et 100 %, et les conidies entre 92 et 100 %. Certains auteurs (Stover 1983, Jacome *et al* 1991) mentionnent que, la température optimale pour la germination des spores se situe entre 25 et 28 °C.

Après la germination, les spores développent des tubes germinatifs qui croissent sur la surface de la feuille, mais la pénétration dans les stomates n'intervient pas avant 2 à 3 jours, avec une humidité proche de la saturation et des températures supérieures à 20 °C (Stover 1980a); ce laps de temps peut être nécessaire pour que se produisent des modifications physiques de la membrane du tube germinatif qui permettent la différenciation de l'apressorium (Brun 1963). En général, la pénétration du tube germinatif intervient entre 4 et 6 jours après la germination, suivant les conditions d'humidité et de température.

La pénétration se produit uniquement à travers les stomates. Cependant, les tubes germinatifs ne se dirigent pas nécessairement vers le stomate le plus proche de la spore germée. Fréquemment, ils grandissent d'une manière aléatoire ou passent directement sans pénétrer, jusqu'à ce qu'un stomate plus éloigné soit atteint (Foure 1990). Pour la pénétration, des conditions proches de la saturation sont requises, quoique l'alternance de cette condition avec des périodes de haute humidité relative, mais non saturante, paraissent être les plus favorables pour ce processus (Brun 1963).

#### b) L'incubation

C'est la période qui suit immédiatement la pénétration et prend fin avec l'apparition des premiers symptômes de la maladie. Elle dépend essentiellement de deux facteurs: la température des tissus foliaires et la quantité d'inoculum (Brun, 1963, Pérez 1983, Foure et Moulion Pefoura 1988). Sous l'effet d'une grande quantité d'inoculum la période d'incubation est écourtée jusqu'à 50% par rapport à sa durée pour une faible quantité d'inoculum (Pérez 1983). Les températures hautes ou basses augmentent la durée de cette phase du cycle de la maladie (Brun 1963). Immédiatement après la pénétration du tube germinatif, il se produit des hyphes qui se dirigent vers l'intérieur des tissus, où ils se ramifient et avancent à travers les espaces intercellulaires. Après que l'infection soit établie, les hyphes sortent des stomates et développent des conidiophores, ou bien poussent à la surface pour contaminer les stomates adjacents. Les premières lésions apparaissent autour du stomate près de 10–14 jours après l'infection.

#### c) Développement des lésions.

Cette étape débute avec l'apparition des premiers symptômes et peut évoluer progressivement jusqu'à la destruction totale ou partielle de l'hôte. Durant cette période apparaissent les différentes formes de reproduction qui permettent la continuité du cycle. Les infections sont plus importantes sur l'envers de la feuille, du fait principalement que les stomates sont plus nombreux sur ce côté de la feuille et que, quand celle-ci se déroule, l'envers est la partie qu'elle expose en premier aux spores. La vitesse d'évolution des symptômes dépend aussi de la quantité d'inoculum et du climat (Brun 1963, Foure et Moreau 1992). Plus grande sera la quantité d'inoculum, plus rapide sera l'évolution des symptômes. De même, durant les époques pluvieuses et avec des températures comprises entre 22 et 30 °C, le temps de développement de la maladie à l'intérieur de l'hôte se réduit.

Généralement tous les états de la maladie se trouvent présents sur une seule plante en même temps. Lors d'attaques sévères de *S. noire*, seuls le cigare et la première feuille ouverte demeurent sans symptôme visible.

### 1.3.8 Effet du climat sur le développement de la maladie.

Plusieurs auteurs ont souligné l'importance des facteurs hydriques, principalement de la pluie, dans le développement de la Sigatoka noire. Sastry (1988) mentionne que la pluie, la rosée et la température déterminent le moment de l'apparition, l'intensité de la production, le mouvement de l'inoculum, et en grande partie le développement de la maladie.

Aux Philippines, la réduction de la sévérité de la S. noire durant quelques mois, dans la zone de Davao, peut être attribuée à la diminution des pluies et à l'occurrence de hautes températures (Quiñon 1972). Selon Romero (1985), le comportement de la maladie dans la région Atlantique du Costa Rica est lié à la répartition temporelle des pluies, présentant de hauts niveaux d'infection durant les périodes les plus pluvieuses et des baisses de ces niveaux, lors de la diminution des pluies. Gaulh (1990) a rapporté des résultats similaires dans ce même pays.

D'après Stover (1987), le niveau de tache des feuilles est relié étroitement aux précipitations; en général la courbe de la feuille nécrosée la plus jeune suit de 4 à 6 semaines la courbe de précipitation dans les zones où il ne s'effectue aucun contrôle. Martínez (1989) mentionne que dans le sud du Mexique, durant l'époque la plus pluvieuse, la durée total du cycle de la Sigatoka noire peut diminuer à moins de 50% du temps requis pendant l'époque de plus faible humidité. Leach (1946) indique que les fortes rosées durant l'époque sèche sont importantes dans l'épidémiologie de la maladie parce qu'elles maintiennent la surface de la feuille avec de l'eau libre durant plusieurs heures, ce qui fournit l'humidité suffisante pour assurer la contamination.

Le climat sec accompagné de températures nocturnes au-dessous de 20 °C freine le développement de la maladie (Stover 1987). Pour le développement des taches, en conditions naturelles, la température optimale est comprise entre 26 et 28 °C (Stover et Simmonds 1987). La figure 15 présente les principaux facteurs qui interviennent dans le développement et la dispersion de la Sigatoka noire.

Postérieurement au début des travaux exposés dans cette thèse (1988), certains résultats relatifs à l'écologie de *Mycosphaella fijiensis* ont été publiés en 1991–1992. D'une part, Jacome *et al* (1991) ont étudié l'effet de la température et de l'humidité relative sur la germination des spores de *M. fijiensis*. D'autre part, Jacome et Schuh (1992) ont étudié l'effet de la durée d'humectation et de la température sur le développement de la maladie. Les résultats de ces études en conditions contrôlées sont synthétisés ci-dessous et fournissent les éléments d'une discussion sur l'influence de l'alternance des périodes humides et sèches.

a) Effet de la température et de l'humidité relative sur la germination en conditions contrôlées.

D'après les résultats de Jacome *et al* (1991), les conidies et les ascospores germent entre 20 et 35 °C. La germination des spores est maximale en présence d'eau libre. La germination des conidies (moyenne de 3 isolats) et des ascospores (1 isolat) a été maximale pour des températures voisines de 25 à 30 °C (figure 16). La germination de conidies, mesurée 24 heures après l'inoculation présente une réponse parabolique en fonction de la température, avec un optimum estimé à 26.5 °C.

Les ascospores ont germé à des humidités relatives supérieures ou égales à 98%, tandis que les conidies peuvent

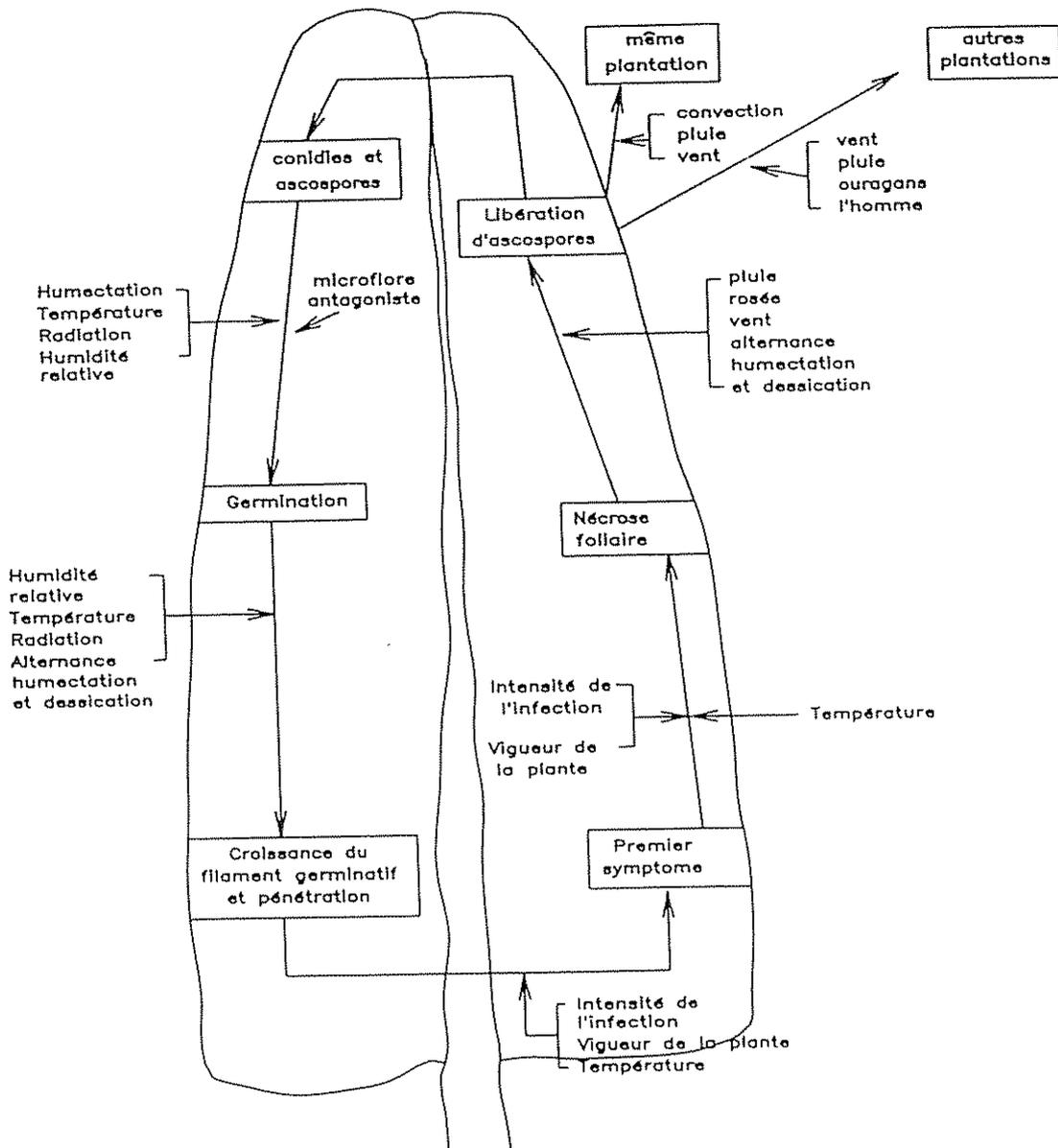


Figure 15. Les principaux facteurs qui interviennent dans la dispersion et développement de la Sigatoka noire au cours de ses différents stades.

germer à partir de 92% d'humidité relative. Cependant, le pourcentage de germination des ascospores a été plus élevé que pour les conidies (figure 17). Les ascospores ont une capacité de germination supérieure à celle des conidies à des humidités relatives proches de la saturation ( $\geq 98\%$ ); cela signifie que les ascospores sont aptes à utiliser plus efficacement ces conditions d'humidité, ce qui leur confère un avantage épidémiologique par rapport aux conidies.

Pour les ascospores, la croissance maximale du tube germinatif a été obtenue dans la gamme 25 à 30 °C (figure 18). Des résultats similaires ont été obtenus par Stover (1983). La longueur du tube germinatif a été similaire à 100% d'humidité relative et en présence d'eau libre, mais a diminué à des humidités plus basses (figure 19). Le nombre maximal de tubes germinatifs par conidie (2 ou 3) a été obtenu en eau libre à 25 °C.

b) Effet de la durée d'humectation et de la température sur le développement de la Sigatoka noire en conditions contrôlées.

D'après les résultats de Jacome et Schuh (1992), un film d'eau sur la surface de la feuille est requis pour la contamination par les ascospores. En ce qui concerne les conidies, la contamination des feuilles a été observée pour des durées d'humectation de 0, 9 et 18 heures. Après le traitement d'humectation, les plantes inoculées étaient transférées dans une chambre de croissance pendant 10 semaines. Les premiers symptômes ont été observés 14 jours après l'inoculation des plantes soumises à 18 heures de durée d'humectation. La manifestation de la maladie a été retardée de 7 et 14 jours respectivement, pour les plantes soumises à 9 et 0 heures de durée d'humectation. Les symptômes de la maladie sont apparus à des températures de 22 à 31 °C. Pour les durées d'humectation de 0 et 9 heures, la sévérité a été maximale à 28 °C ; pour la durée d'humectation de 18 heures, la sévérité a été maximale à 25 °C. La sévérité de la maladie croît à toutes les températures lorsque la durée d'humectation augmente. La température optimale a été 28 °C pour les durées 0 et 9 heures, et 25 °C pour la durée de 18 heures.

c) Effet de l'alternance des conditions sèches et humides sur la contamination en conditions naturelles.

Après une période en conditions favorables de l'ordre de 2 à 8 h, une proportion importante ( $> 50\%$ ) des conidies et des ascospores a achevé la germination. La pénétration n'intervient pas avant 2 à 6 jours en fonction des conditions environnementales. Sachant qu'il existe dans la région atlantique du Costa Rica une alternance quotidienne des conditions d'humectation ou d'hygrométrie saturante, pendant au moins 12 heures et des conditions d'hygrométrie moyenne (humidité relative de l'ordre de 60 à 90%), on en déduit que le filament germinatif n'est pas détruit par une période relativement sèche, mais que l'allongement de celui-ci, réduit ou interrompu pendant cette période sèche, pourra reprendre à l'occasion de la période d'hygrométrie saturante suivante.

Dans les conditions du Cameroun (12–14 heures d'hygrométrie saturante par jour, et humidité relative journalière minimale voisine de 60%), Foure et Moreau (1992) ont montré que la pénétration stomatique peut s'effectuer 42 heures après le dépôt des spores. Ces résultats suggèrent que le tube germinatif peut supporter une période d'interruption de l'humectation (ou d'hygrométrie saturante) par une période d'humidité relative faible.

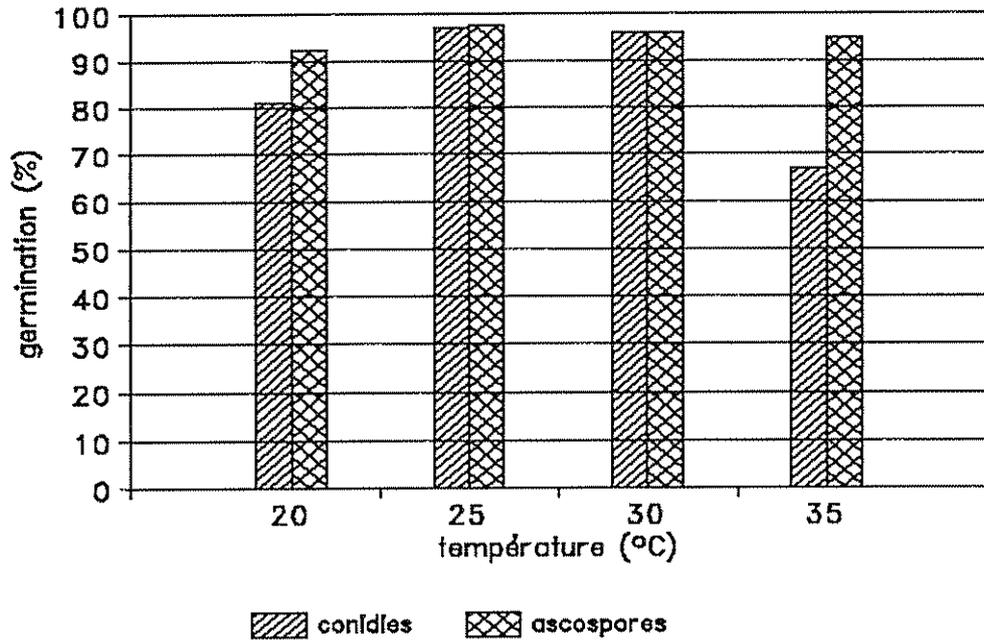


Figure 16. Effet de la température sur la germination des conidies et des ascospores de *M. fijiensis* en présence d'eau libre (d'après Jacome *et al* 1991).

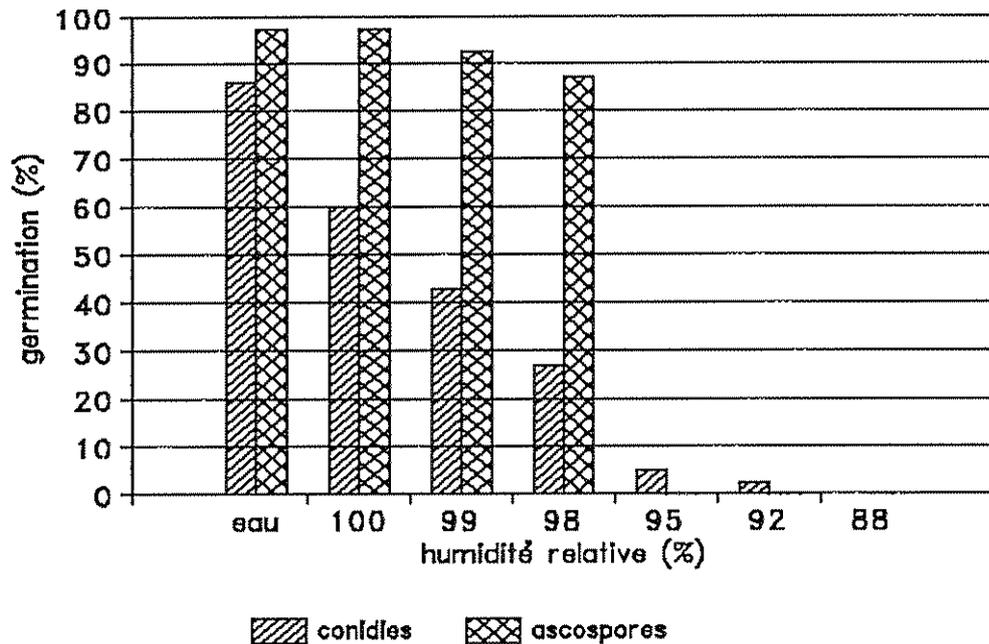


Figure 17. Effet de l'humidité relative sur la germination des conidies et des ascospores de *M. fijiensis* à une température de 25 °C (d'après Jacome *et al* 1991).

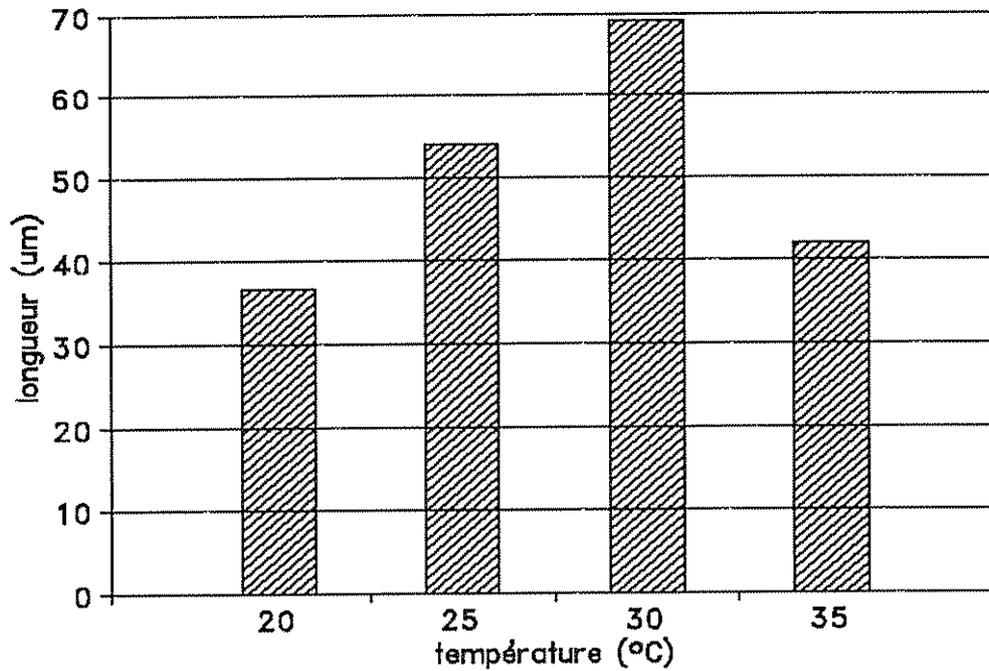


Figure 18. Effet de la température sur la croissance du tube germinatif des ascospores de *M. fijiensis* (d'après Jacome *et al*, 1991)

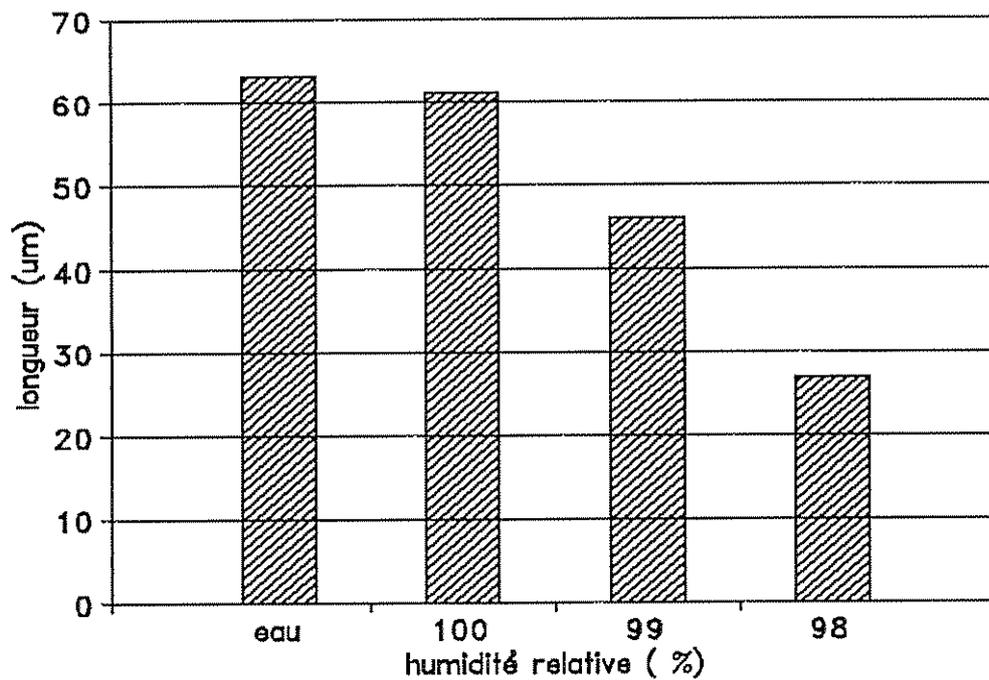


Figure 19. Effet de l'humidité relative sur la croissance du tube germinatif des ascospores de *M. fijiensis* (d'après Jacome *et al*, 1991).

## **CHAPITRE 2**

**MODELISATION DE LA DUREE DE ROSEE SUR LE CIGARE  
ET SUR LA PREMIERE FEUILLE DU BANANIER PLANTAIN**

## CHAPITRE 2

### MODELISATION DE LA DUREE DE ROSEE SUR LE CIGARE ET SUR LA PREMIERE FEUILLE DU BANANIER PLANTAIN.

(Article publié: Lhomme, J.P. et Jiménez, F. 1992. *Agricultural and Forest Meteorology* 62 (1992): 263–274.

#### 2.1 Introduction

Le phénomène du dépôt de rosée est reconnu comme très important en écologie végétale et animale. La présence d'eau libre sur les feuilles est un facteur particulièrement important dans l'épidémiologie des maladies fongiques aériennes. Elle doit être prise en compte dans l'élaboration de systèmes de prévision (Royle et Butler 1986, Friesland et Schrodter 1988, Huber et Gillespie 1992).

Du point de vue du développement de la maladie, la durée de rosée est beaucoup plus importante que le taux de dépôt ou que la quantité déposée (Burrage 1972, Van der Wal 1978). En effet, une durée minimale de présence d'eau libre sur la surface végétale est une condition nécessaire pour que les spores d'une majorité de champignons puissent germer avec succès et infecter l'hôte (Jones 1986, Huber 1988); il en est de même pour le développement de nombreuses bactéries foliaires (Wallin 1963).

La rosée est l'eau condensée sur la végétation et les autres objets au voisinage du sol quand leur température devient inférieure à la température du point de rosée de l'air environnant, mais reste supérieure à la température du point de congélation (Huschke 1959). La source immédiate d'eau pour la condensation sur les feuilles des plantes est la vapeur d'eau de l'air environnant, mais s'il y a une condensation continue durant la nuit, cette vapeur doit être remplacée à partir de l'atmosphère libre, du sol, ou des deux. On distingue alors les termes "dewfall" ou condensation de vapeur d'eau provenant de l'atmosphère et distillation ou condensation de vapeur d'eau provenant de la surface du sol (Monteith 1957, 1963). Pour des conditions atmosphériques humides, la formation de rosée provient principalement de l'air qui est au-dessus du couvert, alors que dans des conditions semi-arides, le dépôt de rosée provient principalement du sol.

Les conditions favorables à la formation de rosée sont un ciel clair qui permet une perte suffisante de rayonnement pour refroidir la surface, un faible niveau de turbulence de l'air qui facilite l'abaissement de température et une humidité relative élevée dans l'air environnant les surfaces végétales.

Au niveau des feuilles, la quantité de rosée cumulée dépend fortement de leurs caractéristiques spatiales (taille, hauteur, inclinaison, azimuth) et de la structure du couvert (indice foliaire, hauteur du couvert, etc.). Par conséquent, la mesure de la formation de rosée par un seul capteur sur le couvert peut produire de graves erreurs dans le calcul de la durée d'humectation (Huber et Gillespie 1992). Il y a eu plusieurs tentatives pour développer des instruments pour mesurer la durée d'humectation par la rosée. Cependant, la plupart de ceux-ci ne sont pas d'usage courant, du fait qu'ils nécessitent une maintenance spécifique ou ont une fiabilité limitée. Ainsi, tant par le passé qu'actuellement ces données sont peu disponibles (Pedro 1980). Par exemple, dans toute l'Amérique Centrale il n'existe aucune station météorologique

équipée d'un capteur pour mesurer la rosée. Différentes revues sur les méthodes de mesure de la durée d'humectation sont disponibles (Howard et Gillespie 1985, Huber 1991).

Il y a une réelle nécessité de techniques fiables avec lesquelles on puisse déterminer la durée d'humectation à partir de données d'une station météorologique standard. Durant les 15 dernières années, quelques modèles basés sur le bilan d'énergie ont été élaborés, dans le but de simuler la durée de rosée ou la durée d'humectation par la rosée et la pluie, sur certains organes végétaux spécifiques ou sur le couvert considéré globalement. Dans le premier cas, nous avons trois exemples: a) un modèle développé pour estimer la durée de rosée sur une feuille du sommet d'une plantation de pommiers, ou d'un couvert de soja, et de maïs (Pedro 1980, Pedro et Gillespie 1982 a, b); b) un modèle de formation de rosée sur les cabosses de cacao (Monteith et Butler 1979, Butler 1980); c) un modèle pour simuler les périodes d'humectation dues aux pluies et rosées sur le capitule de tournesol (Payen 1983). Dans le second cas, nous avons à faire à des modèles dits multicouches parmi lesquels ceux développés par Goudrian (1977), Norman (1982) et Huber (1987). Huber et Gillespie (1992) ont réalisé une revue sur le thème de la modélisation de la durée d'humectation en relation avec l'épidémiologie des maladies des plantes.

Dans la région atlantique du Costa Rica, la durée quotidienne de rosée sur les plantes est rarement inférieure à 7 heures. Ces conditions sont donc très favorables à la germination des spores (cf 1.3.8 a). Par contre, dans des autres régions plus sèches du pays (par exemple Guanacaste) il est importante de pouvoir estimer la durée de rosée si celle-ci devient limitante (possibilité de prévision négative).

Du point de vue de la simulation épidémiologique de la Sigatoka noire, la prévision de la durée de rosée est essentielle (Arneson, communication personnelle, 1988). D'une part, il est raisonnable de penser que la contamination (du début de la germination jusqu'à la pénétration) dépend en grande partie de la durée cumulée d'humectation ayant lieu pendant les 2 à 6 jours nécessaires à la pénétration. D'autre part, la phase de libération des ascospores est influencée par l'occurrence de rosée. Cette influence mise en évidence qualitativement par Foure et Moreau (1992) est confirmée de manière plus quantitative par les résultats exposés dans le chapitre 3.

Notre étude de modélisation se rapporte au cas de la durée d'humectation par la rosée. La rosée n'est pas la seule cause d'humectation des organes végétaux; l'irrigation par aspersion mais surtout la pluie jouent un rôle également important dans l'humectation des plantes. Une situation classique dans la région atlantique au Costa Rica et importante vis-à-vis de la Sigatoka noire correspond à la succession d'une période d'humectation due à une pluie (commençant le plus souvent dans le courant de l'après midi) suivie par une période d'évaporation nulle ou de formation de rosée pendant la nuit, ce qui assure la permanence d'eau libre sur la feuille. Dans cette situation, la durée d'humectation totale peut atteindre 15 à 20 heures sans interruption. Des études spécifiques de modélisation ont été menées dans le cas de l'humectation par la pluie (Butler 1986, Huber 1987). Ce travail présentera plus loin (cf. 3.5) une approche simplifiée de la durée d'humectation due à un événement pluvieux ou à la succession d'une pluie et d'une rosée.

Cette étude utilise la méthode du bilan d'énergie pour développer un modèle simple d'estimation de la durée de rosée sur la feuille cigare et sur la première feuille la plus jeune du bananier plantain, à partir de données météorologiques d'une station standard. A partir des valeurs des flux, on calcule la durée de rosée.

Le modèle de durée de rosée qu'on décrit ci-dessous constitue un outil utilisable pour d'autres maladies du bananier plantain ou du bananier. Il présente aussi l'avantage de fournir une estimation de la température de la feuille pendant la période d'humectation.

## 2.2 Description du modèle ROCIO.

Ce modèle estime sur un pas de temps horaire, les flux de condensation ou d'évaporation sur la feuille cigare et la première feuille la plus récemment déroulée du bananier plantain.

### 2.2.1 Estimation de la température de la feuille.

La température de la feuille est une donnée nécessaire pour l'estimation de la durée de rosée. Elle peut être estimée à partir du bilan d'énergie d'une unité de surface foliaire. En considérant que le stockage de chaleur est négligeable, le bilan d'énergie peut s'écrire:

$$R_n = H + \lambda E \quad (2.1)$$

où  $R_n$  est le rayonnement net absorbé par la feuille,  $H$  et  $\lambda E$  sont respectivement, les flux de chaleur sensible et de chaleur latente échangés entre la feuille et l'air environnant. Avant le dépôt de rosée, quand la surface de la feuille est sèche, le flux de chaleur latente peut être négligé du fait que le début de la formation de rosée intervient normalement durant la nuit, quand les stomates sont fermés. Dans ce cas, l'équation de bilan d'énergie est simplement  $R_n = H$ .

Les flux convectifs de chaleur sensible et de chaleur latente sont classiquement écrits de la manière suivante:

$$H = n \rho c_p g_b (T_L - T_a) \quad (2.2)$$

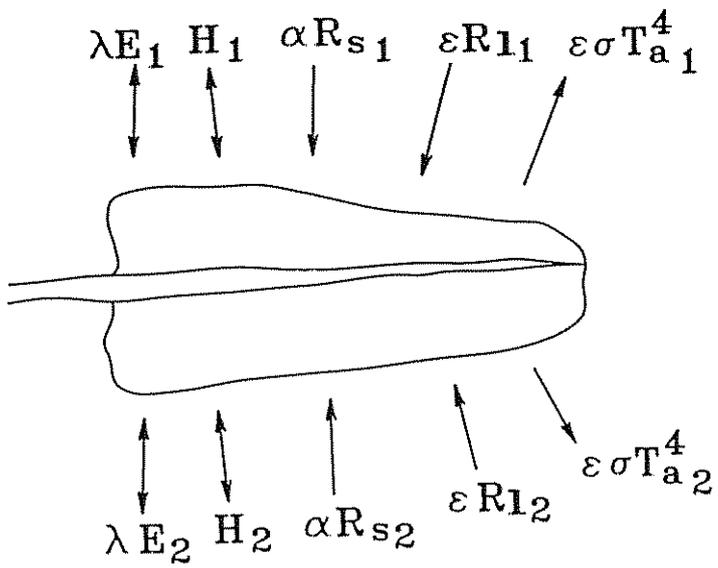
$$\lambda E = n (\rho c_p / \gamma) g_b [e^*(T_L) - e_a] \quad (2.3)$$

où  $T_a$  est la température de l'air,  $e_a$  est la pression de vapeur dans l'air,  $e^*(T)$  est la pression de vapeur saturante à la température  $T$ ,  $T_L$  est la température de la feuille exprimée en Kelvin,  $g_b$  est la conductance de couche limite de la feuille,  $\rho$  est la masse volumique de l'air,  $c_p$  est la chaleur massique de l'air à pression constante,  $\gamma$  est la constante psychrométrique et  $n$  (= 1 ou 2) représente le nombre des faces de la feuille participant aux échanges (figure 20).

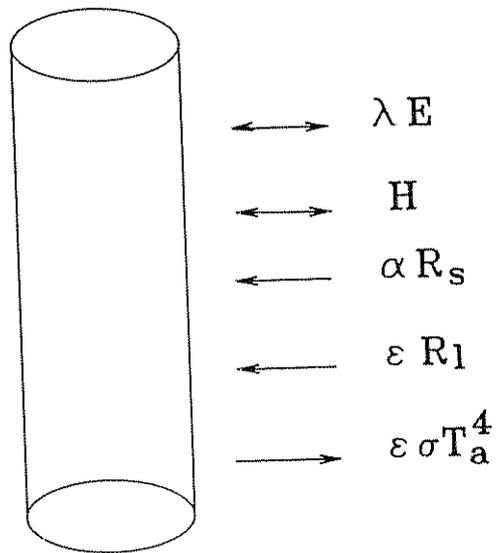
La feuille cigare est complètement enroulée sur elle-même, en exposant la face inférieure. On peut considérer que la feuille cigare n'échange pas d'énergie ou de vapeur avec l'air qui est à l'intérieur du cylindre, mais uniquement par le côté extérieur ( $n=1$ ), alors que la première feuille déroulée les échange par les deux côtés ( $n=2$ ).

Le rayonnement net d'une unité de surface foliaire de la feuille (cigare ou première feuille) peut s'écrire:

$$R_n = \alpha R_s + \epsilon R_l - n \epsilon \sigma (T_L)^4 \quad (2.4)$$



(a)



(b)

Figure 20. Flux d'énergie qui interviennent dans le bilan d'énergie de la première feuille (a) et de la feuille cigare (b).

où  $R_s$  est le rayonnement incident de courte longueur d'onde,  $R_l$  est le rayonnement incident de grande longueur d'onde (sur les deux côtés pour le cas de la première feuille),  $\alpha$  est le coefficient d'absorption du rayonnement de courte longueur d'onde par la feuille,  $\varepsilon$  est l'émissivité de la feuille et  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann.

En posant  $\delta T = T_L - T_a$  et en utilisant un développement au premier ordre pour  $T_L^4$  et  $e^*(T_L)$ , l'équation du bilan d'énergie (équation 2.1) peut être résolue par rapport à  $\delta T$  (Kreith et Sellers 1975, Pedro et Gillespie 1982) de sorte que pour une feuille mouillée:

$$\delta T = \frac{\alpha R_s + \varepsilon R_l - n\varepsilon\sigma T_a^4 - n\rho c_p g_b D_a / \gamma}{4n\varepsilon\sigma T_a^3 + n\rho c_p g_b (1 + s/\gamma)} \quad (2.5)$$

où  $D_a$  est le déficit de saturation de l'air ( $e^*(T_a) - e_a$ ) et  $s$  est le taux de changement de  $e^*$  avec la température de l'air.

Pour une feuille sèche, en l'absence de transpiration, et avant le dépôt de rosée ou l'humectation par la pluie, l'équation 2.5 se transforme en:

$$\delta T = \frac{\alpha R_s + \varepsilon R_l - n\varepsilon\sigma T_a^4}{4n\varepsilon\sigma (T_a)^3 + n\rho c_p g_b} \quad (2.6)$$

La conductance de la couche limite de la feuille ( $g_b$ ) a été considérée comme étant identique pour la vapeur d'eau et la chaleur, et a été estimée à partir de la relation classique qui fait intervenir le nombre de Nusselt (Nu):

$$g_b = k \text{ Nu} / d \quad (2.7)$$

où  $k$  est la diffusivité thermique de l'air et  $d$  une dimension caractéristique du corps (la largeur pour une feuille plane et le diamètre pour un cylindre). En condition de convection forcée, le nombre de Nusselt peut être calculé à partir du nombre de Reynolds (Re), de sorte que:

$$\text{Nu} = A \text{ Re}^n \quad (2.8)$$

$A = 0,6$  et  $n = 0,5$  pour une lame plate et  $A = 0,25$  et  $n = 0,6$  pour un cylindre vertical (Monteith et Unsworth 1990). Dans cette étude, la largeur moyenne de la première feuille était de 70 cm et le diamètre moyen de la feuille cigare était de 5 cm.

## 2.2.2 Formation de rosée et estimation de sa durée

Le dépôt de rosée se produit chaque fois que la température de la feuille  $T_L$  ( $T_L = T_a + \delta T$ ) est inférieure à la température de point de rosée de l'air, ceci signifie que  $e^*(T_L) < e_a$ .

La durée de rosée correspond au temps écoulé entre le début de sa formation sur la surface foliaire jusqu'à son évaporation complète.

Le début de la formation de rosée sur une feuille sèche peut être déterminé à partir de  $T_L$  calculé grâce à l'équation 2.6. Ensuite, le taux de dépôt ou d'évaporation d'eau libre est donné par l'équation classique du flux de chaleur latente (équation 2.3) avec  $T_L$  calculée grâce à l'équation 2.5 (Pedro et Gillespie 1982a). La fin de la rosée se produit quand l'eau condensée et accumulée durant toute la nuit s'est complètement évaporée.

## 2.3 Calcul du bilan radiatif

### 2.3.1 Estimation des rayonnements standard sur un plan horizontal.

Le rayonnement de grande longueur d'onde ascendant est estimé de manière classique à partir de la température de l'air  $T_a$  (K) grâce à l'équation suivante:

$$R_{1\uparrow} = \varepsilon \sigma T_a^4 \quad (2.9)$$

Le rayonnement de grande longueur d'onde descendant peut être estimé à partir de la température de l'air, la pression de vapeur de l'air  $e_a$  (hPa) et la fraction de ciel couvert ( $c$ ) grâce à l'équation suivante donnée par Monteith (1973):

$$R_{1\downarrow} = (1-c) \varepsilon_a(0) \sigma T_a^4 + c(\sigma T_a^4 - 9) \quad (2.10)$$

avec l'émissivité du ciel en conditions de ciel clair ( $c=0$ ) égale à:

$$\varepsilon_a(0) = 0,53 + 0,06 \sqrt{e_a} \quad (2.11)$$

Le facteur 9 dans l'équation 2.10 est dû que la température radiative moyenne des nuages est proche de 2 °C inférieure à celle mesurée dans la station météorologique, ce qui correspond à une différence de flux de près de 9 W/m<sup>2</sup>.

D'après Campbell (1977), les rayonnements solaire, direct et diffus, en condition de ciel clair peuvent être estimés à partir des équations suivantes:

$$R_{b\downarrow} = Q a^m \sin\beta \quad (2.12)$$

$$R_{d\downarrow} = 0,5 Q (1 - a^m) \sin\beta \quad (2.13)$$

où  $Q$  est la constante solaire (1353 W/m<sup>2</sup>),  $\beta$  est l'élévation solaire,  $a$  est un coefficient de transmission atmosphérique (0,84) et  $m$  est la profondeur optique de la masse d'air ( $1/\sin\beta$ ).

Dans cette étude, le rayonnement solaire total ( $R_{s\downarrow} = R_{b\downarrow} + R_{d\downarrow}$ ) a été mesuré. En posant  $r = R_{b\downarrow}/R_{d\downarrow}$  on peut écrire:

$$R_{b\downarrow} = r R_{s\downarrow} / (1+r) \quad (2.14)$$

et

$$R_{d\downarrow} = R_{s\downarrow} / (1+r) \quad (2.15)$$

Pour un ciel clair,  $r$  est obtenu par la combinaison des équations 2.12 et 2.13:  $r_x = 2a^m/(1-a^m)$  et pour un ciel complètement couvert  $r = 0$ . Pour un ciel

partiellement couvert on considère que la relation linéaire suivante, fonction de la fraction de ciel couvert ( $c$ ), est valable:

$$r = r_x(1-c) \quad (2.16)$$

La hauteur solaire  $\beta$  a été calculée en utilisant la formule astronomique classique qui relie  $\beta$  à la latitude  $\phi$ , à la déclinaison solaire  $\delta$  et à l'angle horaire  $H$  mesuré à partir du midi solaire:

$$\sin\beta = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H \quad (2.17)$$

$H$  peut être exprimé comme une fonction du temps solaire  $t$  sur un cycle de 24 heures, comme  $H = \pi(12-t)/12$ .

### 2.3.2 Estimation du rayonnement incident sur les feuilles.

Le rayonnement solaire incident est la somme du rayonnement solaire diffus  $R_d$  et rayonnement solaire direct  $R_b$ , soit  $R_s = R_d + R_b$ . Dans cette étude, pour estimer le rayonnement incident sur les feuilles, la première feuille a été considérée comme une surface plane inclinée et la feuille cigare comme la surface courbe d'un cylindre vertical.

#### Estimation du rayonnement diffus

##### a) Pour la première feuille

La première feuille reçoit le rayonnement diffus de courte longueur d'onde depuis le ciel et depuis le sol. Si  $R_{d\downarrow}$  est le rayonnement diffus descendant et  $R_{d\uparrow}$  le rayonnement diffus ascendant reçus sur un plan horizontal, le rayonnement diffus de courte longueur d'onde reçu sur les deux côtés d'une unité de surface d'une feuille inclinée est donné par l'équation suivante (Monteith et Unsworth 1990):

$$R_d = R_{d\downarrow} + R_{d\uparrow} \quad (2.18)$$

Le rayonnement diffus ascendant est égal au rayonnement solaire total descendant ( $R_{s\downarrow}$ ) multiplié par l'albédo ( $a$ ) de la surface sous la feuille:  $R_{d\uparrow} = aR_{s\downarrow}$ .

Le rayonnement diffus de grande longueur d'onde reçu sur une feuille inclinée (des deux côtés) est la somme des rayonnements ascendants et descendants, de la même façon que dans le cas du rayonnement diffus de courte longueur d'onde (Monteith et Unsworth 1990).

##### b) Pour la feuille cigare

Les rayonnements diffus de courte et grande longueur d'onde reçus sur la surface verticale ( $\alpha = \pi/2$ ) sont égaux à la moitié du rayonnement reçu sur un plan horizontal (Monteith et Unsworth 1990).

## Estimation du rayonnement direct.

a) Pour la première feuille

Le rayonnement direct est plus complexe à calculer. Le flux moyen direct de rayonnement  $R_b$  reçu sur n'importe quel objet solide par unité de surface peut s'écrire:

$$R_b = f R_{b\downarrow} \quad (2.19)$$

où  $R_{b\downarrow}$  est le rayonnement direct mesuré sur un plan horizontal et  $f$  est un facteur de forme, qui peut être calculé par des principes géométriques (Monteith et Unsworth, 1990):  $f = A_h / A$ , où  $A$  est l'aire de l'objet et  $A_h$  est l'aire de l'ombre projetée sur une surface horizontale.

Pour une surface plane et inclinée (angle  $\alpha$  au-dessus de l'horizontale) le facteur de forme est (Reeve 1960, Monteith et Unsworth 1990):

$$f = |\cos\alpha - \sin\alpha \cot\beta \cos\theta| \quad (2.20)$$

où  $\beta$  est l'inclinaison solaire et  $\theta$  l'angle entre la direction des rayons solaires et la normale à la surface de la feuille.

Les feuilles 1 dans une plantation de bananier plantain font un angle  $\alpha$  avec l'horizontale, et n'ont pas d'orientation préférentielle (mesures réalisées dans cette étude). La valeur moyenne du rayonnement direct intercepté par les feuilles 1 est:

$$\bar{R}_b = \bar{f} R_{b\downarrow} \quad (2.21)$$

où  $f$  est la valeur moyenne de  $|\cos\alpha - \sin\alpha \cot\beta \cos\theta|$  avec  $\theta$  variant de 0 à  $2\pi$ . Les feuilles 1 peuvent être re-disposées sur la surface courbe d'un cône et le facteur de forme (Reeve 1960) s'obtient de la manière suivante:

Quand  $\alpha \leq \beta$ ,  $\beta$  étant l'inclinaison solaire, seule la surface supérieure des feuilles est éclairée, alors

$$\bar{f} = \cos \alpha \quad (2.22)$$

Quand  $\alpha > \beta$ , suivant la valeur de son azimut, la surface inférieure ou supérieure de la feuille est éclairée, alors on écrit:

$$\bar{f} = [(\pi - 2\theta_0) \cos\alpha + 2\sin\alpha \sin\theta_0 \cot\beta] / \pi \quad (2.23)$$

où  $\theta_0$  est la valeur de  $\theta$  entre 0 et  $\pi/2$  (c'est à dire entre les rayons solaires et la normale à la surface de la feuille) qui satisfait l'équation  $\cos\theta = \cot\alpha \tan\beta$ . Si cette valeur n'existe pas,  $f$  est donné par l'équation 2.22.

## b) Pour la feuille cigare

Le rayonnement direct intercepté par le cigare peut être estimé grâce à l'équation 2.19, en modifiant le facteur de forme. Pour un cylindre vertical, le facteur de forme est indépendant de l'inclinaison et de l'azimut, et dépend seulement de la hauteur du soleil. Cette valeur est constante pour toutes les plantes et est donnée par l'expression suivante (Monteith et Unsworth 1990):

$$f = \cotg \beta / \pi \quad (2.24)$$

## 2.4 Site expérimental et mesures de terrain

Le site expérimental était localisé au Centre Agronomique Tropical de Recherche et d'Enseignement (CATIE), dans la vallée de Turrialba, Costa Rica. Les coordonnées géographiques sont 9°53' N. et 82°38' O. L'altitude du lieu est de 600 mètres au-dessus du niveau de la mer. Le climat de la vallée est tropical humide avec une précipitation annuelle de 2660 mm distribuée sur pratiquement toute l'année; il y a une diminution des pluies seulement de février à avril. La température moyenne est de 21,5 °C avec un maximum moyen de 26,5 °C et un minimum moyen de 18,0 °C. L'humidité relative moyenne est de 88%. L'énergie solaire journalière moyenne annuelle est de 17 MJ/m<sup>2</sup>; la vitesse moyenne du vent est de 1,0 m/s et l'évapotranspiration potentielle (Penman) est de 3,0 mm/j. La topographie du terrain où ont été réalisées les expérimentations, est plane.

Le modèle a été testé en utilisant les données expérimentales obtenues dans deux plantations de bananier plantain (*Musa* AAB, type faux corne, cv. 'curraré') situées à 200 m d'une station météorologique. La première de celles-ci comprenait des plantes de première génération. Elle avait une superficie de 0,6 hectare et était cultivée avec une densité de 1150 plantes par hectare. L'indice foliaire était légèrement supérieur à 1 et le sol était couvert de jeunes plantes de café. Pour la seconde plantation, il s'agissait de plantes de deuxième génération qui couvraient une superficie proche de 0,7 hectare et qui était cultivée avec une densité de 1670 plantes par hectare. Dans ce cas, l'indice foliaire était proche de 1,8 et le sol était maintenu nu. Dans les deux plantations, la hauteur moyenne de l'extrémité distale de la feuille la plus haute était d'environ 5,4 m.

Dans la station météorologique, on a mesuré la température et l'humidité de l'air (hygrothermographe Wilh Lambrecht), le rayonnement solaire (pyranomètre Kipp and Zonen) et la durée d'insolation (héliographe Wilh Lambrecht). La vitesse du vent a été enregistrée directement par un anémographe (Wilh Lambrecht) installé à l'intérieur de la culture au niveau moyen de la première feuille (approximativement 4,5 m).

Le début et la fin de la présence de rosée sur les feuilles a été déterminée visuellement dans toute la plantation, en utilisant une échelle mobile. Les observations ont été réalisées durant 18 nuits, entre novembre 1990 et janvier 1991.

## 2.5 Opération et validation du modèle.

Le modèle fonctionne sur une base horaire. Les moments estimés de début et de fin de rosée ont toujours été arrondis à la demi-heure correspondante. Ainsi par

exemple, si le modèle indique que la rosée a débuté entre 18 h et 19 h, on a pris 18h30 comme heure estimée de début. Les données de rayonnement solaire, de température, d'humidité de l'air utilisées comme variables d'entrée du modèle, ont été obtenues à partir de la station météorologique, en considérant qu'elles sont similaires aux valeurs observées au niveau de la feuille cigare et de la première feuille.

Le pourcentage du couverture nuageuse a été déterminé visuellement à la tombée de la nuit et dans la matinée. Après le début de formation de la rosée, il n'a pas été effectué d'autres observations durant la nuit, jusqu'au lever du jour du lendemain. Une interpolation linéaire simple a été utilisée entre la dernière observation à la tombée de la nuit et la première observation de la matinée.

La durée d'insolation a été utilisée pour déterminer la présence ou l'absence de rayonnement direct. Quand la fraction d'insolation pendant une heure donnée était inférieure à 50%, on a considéré qu'il n'y avait pas eu de rayonnement direct pendant cette heure-là.

L'absorptivité ( $\alpha$ ) de la feuille et l'albédo du couvert ( $a$ ) ont été mesurés en utilisant des capteurs Li-cor. La valeur de  $\alpha$  trouvée a été de 0,3 et celle de  $a$  égale à 0,25. L'émissivité ( $\epsilon$ ) de la feuille est supposée égale à 0,95.

L'absorptivité a été déterminée par différence en mesurant sur une grande feuille horizontale le rayonnement incident ( $R_i$ ), le rayonnement réfléchi ( $R_r$ ) et le rayonnement transmis ( $R_t$ ).  $\alpha = R_a/R_i$ , avec  $R_a = R_i - R_r - R_t$ .

L'albédo du couvert a été mesuré en installant à 2 m au-dessus de sa surface deux pyranomètres Li-cor inversés l'un par rapport à l'autre, l'un mesurant le rayonnement incident et l'autre le rayonnement réfléchi.

La valeur moyenne trouvée de l'angle d'inclinaison de la première feuille par rapport à l'horizontale est de 50°. La largeur moyenne de la première feuille est de 70 cm et la valeur moyenne du diamètre de la feuille cigare est de 5 cm.

On a considéré que la lame de rosée ne pouvait pas excéder une valeur maximale, qui fut obtenue expérimentalement à l'aide du procédé suivant. Quand la hauteur de rosée pouvait être considérée proche de la hauteur maximale pour la nuit considérée, les surfaces foliaires ont été séchées soigneusement avec des feuilles de papier absorbant qui furent pesées dans des sacs en polyéthylène avant et après l'opération. Ensuite, on a mesuré les dimensions des feuilles pour ramener la quantité mesurée à l'unité de surface. La valeur maximale de dépôt de rosée retenue a été celle correspondant à la valeur maximale observée durant l'ensemble des expériences. Cette valeur correspond à 0,09 mm pour un côté de la feuille (première feuille ou cigare).

Pour la validation du modèle, on a utilisé les données de 18 nuits durant lesquelles l'humectation du feuillage a été due seulement à la rosée. Comme il arrive généralement dans les tropiques humides, les conditions météorologiques ont été presque identiques d'une nuit à l'autre. Pendant la durée de l'expérience, les caractéristiques de l'air juste après le coucher du soleil (18–19 h), alors que débute la formation de rosée, n'ont pas varié de manière significative: la température de l'air a été aux alentours de  $21 \pm 1$  °C, l'humidité de l'air a été proche de  $24 \pm 1$  hPa et la vitesse du vent a toujours été faible, à moins de 0,5 m/s. Ceci est la raison pour

laquelle, pour 16 des 18 nuits étudiées, la durée de la rosée a été relativement constante de l'ordre de  $14 \pm 2$  h (tableaux 2 et 3).

Le facteur principal expliquant le début de la rosée est toujours le déficit radiatif, qui survient à la tombée de la nuit, vers 18 h. Durant deux nuits (5 décembre et 10 janvier), le début de la rosée s'est produit plus tard (23 h ou plus), ce qui s'explique par le fait que durant ces deux nuits et durant les après-midi précédentes, le ciel était complètement couvert par les nuages, empêchant ainsi une diminution rapide du bilan radiatif. La vitesse du vent durant les premières heures de ces deux nuits, a aussi été légèrement supérieure, ce qui a permis des échanges convectifs plus intenses au niveau des feuilles.

Les tableaux 2 et 3 montrent la comparaison des heures de début et de fin de la rosée estimées et observées sur la feuille cigare et la première feuille. Les observations indiquent que la rosée apparaît d'abord sur la première feuille puis sur le cigare, et que la feuille cigare sèche en premier le matin, les écarts étant généralement inférieurs à 30 minutes. Ce fait peut être facilement expliqué si on considère que le bilan radiatif est le facteur principal déterminant le début de la rosée. Quand débute la nuit et que le rayonnement de courte longueur d'onde devient nul, le bilan radiatif des feuilles est négatif, ce qui induit une diminution de la température sous le point de rosée. En utilisant l'équation (2.4), on peut noter que le déficit radiatif est deux fois plus important pour la première feuille, comparé à la feuille cigare (la première feuille émet deux fois plus et reçoit deux fois moins), ce qui explique pourquoi la rosée apparaît d'abord sur la première feuille. La feuille cigare sèche généralement plus rapidement que la première feuille. Ceci peut s'expliquer par le fait que, durant les premières heures du jour, le rayonnement solaire direct est encore très incliné et la feuille cigare quasi perpendiculaire au rayonnement direct reçoit donc plus d'énergie que la première feuille qui est inclinée.

Les figures 21 et 22, tracées à partir des tableaux 2 et 3 respectivement, montrent la dispersion des valeurs estimées avec les valeurs observées de durée de rosée. La concordance entre les valeurs observées et estimées est assez bonne si l'on considère que les rayonnements standards ( $R_{b1}$ ,  $R_{d1}$ ,  $R_{11}$ ,  $R_{11}$ ) ont été estimés à partir des données de la station météorologique au moyen de relations assez empiriques. La majorité des valeurs de durée de rosée a été estimée avec une erreur de moins d'une heure. Ainsi, on peut conclure que le modèle précédemment décrit permet de faire une estimation pratique des durées de rosée sur les deux feuilles les plus jeunes des plantes de bananier plantain. Du fait que le bananier plantain et le bananier ont une architecture très similaire, on peut considérer que ce modèle, bien que testé seulement sur le bananier plantain, peut aussi fonctionner pour le bananier.

Tableau 2. Comparaison entre valeurs estimées (E) et observées (O) des heures de début de formation et de fin d'évaporation de la rosée sur la feuille cigare.

Date	Heure de début			Heure de fin			Durée de rosée		
	E	O	D*	E	O	D	E	O	D
06 Nov	17.30	17.30	0	7.30	8.00	30	14.00	14.30	30
07 Nov	18.30	18.00	30	7.30	7.30	0	13.00	13.30	30
21 Nov	18.30	18.30	0	8.30	8.30	0	14.00	14.00	0
03 Dec	18.30	18.00	30	9.30	10.00	30	15.00	16.00	60
06 Dec	22.30	23.00	30	7.30	6.30	60	9.00	7.30	90
13 Dec	19.30	19.30	0	9.30	8.15	45	14.00	12.45	75
17 Dec	18.30	18.00	30	8.30	7.45	45	14.00	13.45	15
20 Dec	20.30	19.15	75	8.30	9.00	30	12.00	13.45	105
21 Dec	19.30	19.15	15	8.30	8.15	15	13.00	13.00	0
27 Dec	20.30	20.0	30	8.30	8.45	15	12.00	12.45	45
30 Dec	17.30	18.45	75	8.30	8.45	15	15.00	14.00	60
01 Jan	17.30	18.15	45	8.30	8.00	30	15.00	13.45	105
03 Jan	18.30	19.15	45	8.30	8.15	45	14.00	13.00	60
06 Jan	19.30	19.30	0	9.30	9.00	45	14.00	13.30	30
08 Jan	18.30	18.30	0	8.30	8.45	15	14.00	14.15	15
10 Jan	00.30	23.30	60	8.30	8.15	15	8.00	8.45	45
13 Jan	18.30	19.00	30	8.30	8.15	15	14.00	13.15	45
14 Jan	18.30	18.45	15	8.30	7.15	75	14.00	12.30	90
moyenne	19.17	19.07	28	8.30	8.17	29	13.13	13.01	50
écart type	1.45	1.34	24	0.35	0.45	20	1.52	1.55	32

\*D est la différence entre O et E (minutes).

Tableau 3. Comparaison entre valeurs estimées (E) et observées (O) de début de formation et de fin d'évaporation de la rosée sur la première feuille.

Date	Heure de début			Heure de fin			Durée de rosée		
	E	O	D*	E	O	D	E	O	D
06 Nov	16.30	17.30	60	8.30	8.30	0	16.00	15.00	60
07 Nov	17.30	18.00	30	8.30	8.00	30	15.00	14.00	60
21 Nov	17.30	18.30	60	9.30	9.00	30	16.00	14.30	90
03 Dec	18.30	18.00	30	9.30	10.15	45	15.00	16.15	75
06 Dec	22.30	23.00	30	7.30	6.30	60	9.00	7.30	90
13 Dec	19.30	19.30	0	9.30	8.30	60	14.00	13.00	60
17 Dec	18.30	17.45	45	8.30	8.00	30	14.00	14.15	15
20 Dec	20.30	19.00	90	8.30	9.15	45	12.00	14.15	135
21 Dec	19.30	19.00	30	8.30	8.45	15	13.00	13.45	45
27 Dec	20.30	19.30	60	8.30	9.15	45	12.00	13.45	105
30 Dec	17.30	18.30	60	8.30	9.15	45	15.00	14.45	15
01 Jan	17.30	18.00	30	8.30	8.15	15	15.00	14.15	45
03 Jan	18.30	18.45	15	9.30	9.15	15	15.00	14.30	30
06 Jan	19.30	19.15	15	9.30	9.15	15	14.00	14.00	0
08 Jan	18.30	18.00	30	9.30	9.15	15	15.00	15.15	15
10 Jan	23.30	23.30	0	8.30	8.45	15	9.00	9.15	15
13 Jan	18.30	18.45	15	8.30	8.30	0	14.00	13.45	15
14 Jan	18.30	18.45	15	8.30	7.30	60	14.00	12.45	75
moyenne	19.04	19.02	34	8.44	8.38	30	13.43	13.35	53
écart type	1.44	1.35	23	0.34	0.51	19	2.00	2.01	37

\*D est la différence entre O et E (minutes).

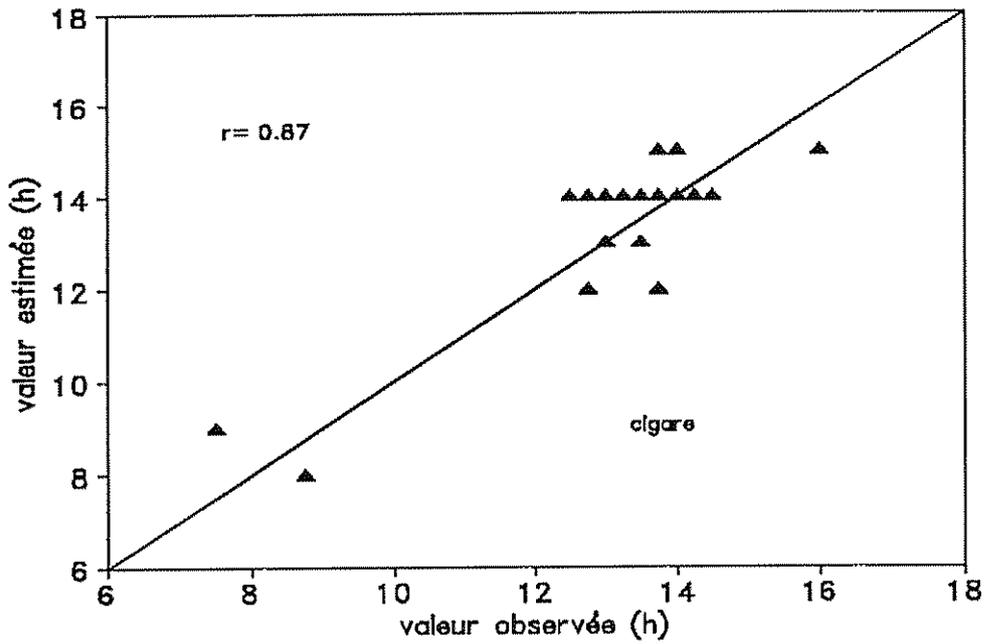


Figure 21. Comparaison entre les durées de rosée estimées et observées sur la feuille cigare.

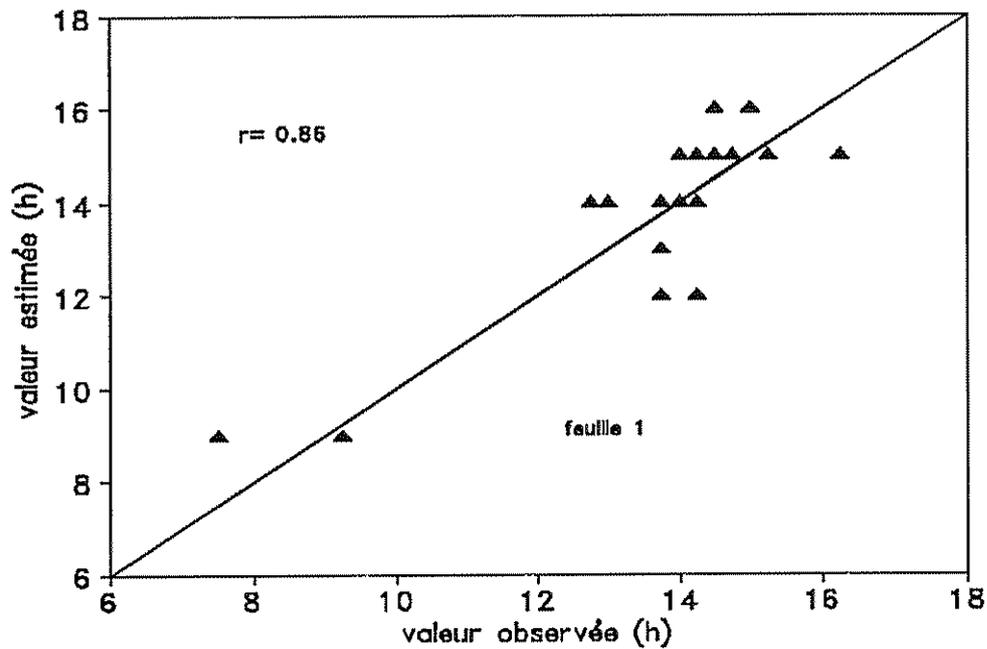


Figure 22. Comparaison entre les durées de rosée estimées et observées sur la première feuille plus jeune (feuille 1).

## 2.6 Analyse de sensibilité du modèle.

Dans le but de quantifier l'influence respective des variables météorologiques sur la durée de rosée on a défini des conditions standard correspondant à un jour typique (6 septembre 1991) de la région atlantique du Costa Rica (La Lola, Matina). Le contenu en vapeur d'eau de l'air est caractérisé par la dépression du point de rosée ( $T_a - T_r$ ), où  $T_a$  est la température de l'air et  $T_r$  la température du point de rosée. Les conditions standard retenues sont décrites dans le tableau 4.

En conditions standard, la durée de rosée est de 14 heures. Dans le tableau 5, on présente la durée de rosée calculée pour les conditions standard retenues et pour variations relatives (rayonnement solaire) ou absolues (température de l'air, vitesse de vent et dépression du point de rosée) des variables météorologiques par rapport aux ces conditions standard. En ce qui concerne le rayonnement solaire son rôle principal est dans l'évaporation de la rosée durant les deux ou trois premières heures du matin.

Par ailleurs, durant la période nocturne les conditions d'humidité de l'air sont très proches de la saturation, et la vitesse du vent est relativement faible et peu variable. Par conséquent, l'augmentation de la température de l'air a pour corollaire une diminution forte de la durée de rosée et toute variation de la dépression du point de rosée affecte de manière significative la durée de rosée. Dans les conditions standard (tableau 6), le modèle est peu sensible à la vitesse du vent.

Il est important d'analyser aussi, l'effet conjoint des différentes variables qu'on peut considérer comme motrices de la formation et de l'évaporation de rosée. Le tableau 6 présente la sensibilité du modèle à l'augmentation de  $T_a - T_r$  de 0.6 à 1.6 °C et de la vitesse du vent de 50, 75 et 100%, en gardant fixe l'évolution de la température de l'air. Le tableau 7 présente la durée de rosée en fonction de la dépression du point de rosée et de la vitesse du vent pour une augmentation de 50% du rayonnement solaire par rapport aux conditions standard définies, tandis que le tableau 8 montre les résultats obtenus pour une diminution du rayonnement de 50%.

Tableau 4. Conditions standard utilisées pour le test de sensibilité du modèle (6-7 septembre 1991).

Heure	Rs	Ta	U	Ta-Tr
16-17	150	28.0	0.6	1.5
17-18	020	27.0	0.6	0.5
18-19	0	26.0	0.6	0.4
19-20	0	25.0	0.6	0.4
20-21	0	24.5	0.6	0.2
21-22	0	24.2	0.6	0.2
22-23	0	24.0	0.6	0.0
23-24	0	23.8	0.6	0.0
20-01	0	23.5	0.6	0.0
01-02	0	23.4	0.6	0.0
02-03	0	23.0	0.6	0.0
03-04	0	23.0	0.6	0.0
04-05	0	22.8	0.6	0.0
05-06	010	22.2	0.6	0.0
06-07	135	23.5	0.8	0.0
07-08	360	26.0	0.8	1.6
08-09	465	27.4	0.8	3.4
09-10	600	29.0	0.8	5.6
10-11	715	30.4	0.8	6.9

Rs = rayonnement solaire ( $W/m^2$ ).

U = vitesse du vent (m/s).

Ta = température de l'air ( $^{\circ}C$ ).

Ta-Tr = dépression du point de rosée ( $^{\circ}C$ ).

Tableau 5. Analyse de sensibilité du modèle aux variables météorologiques.

Variation relative du rayonnement solaire (%):	-75	-50	0	50	75
Durée de rosée (h):	16	16	14	13	13
Variation absolue de la température de l'air ( $^{\circ}C$ ):	0	+0.5	+1	+2	+3
Durée de rosée (h):	14	14	12	5	0
Variation absolue de la vitesse du vent (m/s):	0	+2	+4	+6	+8
Durée de rosée (h):	14	14	14	14	14
Variation absolue de la dépression du point de rosée ( $^{\circ}C$ ):	+0.4	+0.8	+1.2	+1.4	+1.6
Durée de rosée (h):	14	13	11	9	8

Tableau 6. Sensibilité du modèle à une variation conjointe de la dépression du point de rosée ( $T_a - T_r$ , °C) et de la vitesse du vent ( $u$ , m/s).

$(T_a - T_r) + \Delta T$	Durée de rosée (h)		
	$u \times 1.5$	$u \times 1.75$	$u \times 2.0$
$\Delta T$ (°C) ↓			
+ 0.6	13	13	13
+ 0.8	12	12	12
+ 1.0	11	11	11
+ 1.2	10	10	9
+ 1.4	9	8	7
+ 1.6	6	3	2

Tableau 7. Sensibilité du modèle à une variation conjointe de la dépression du point de rosée ( $T_a - T_r$ , °C) et de la vitesse du vent ( $u$ , m/s) avec une augmentation de 50% du rayonnement solaire pendant la période diurne.

$(T_a - T_r) + \Delta T$	Durée de rosée (h)		
	$u \times 1.5$	$u \times 1.75$	$u \times 2.0$
$\Delta T$ (°C) ↓			
+ 0.6	12	12	12
+ 0.8	12	12	12
+ 1.0	11	11	11
+ 1.2	10	10	9
+ 1.4	8	7	7
+ 1.6	6	5	2

Tableau 8. Sensibilité du modèle à une variation de la dépression du point de rosée ( $T_a - T_r$ , °C) et de la vitesse du vent ( $u$ , m/s) avec une diminution de 50% du rayonnement solaire pendant la période diurne.

$(T_a - T_r) + \Delta T$	Durée de rosée (h)		
	$u \times 1.5$	$u \times 1.75$	$u \times 2.0$
$\Delta T$ (°C) ↓			
+ 0.6	15	14	14
+ 0.8	13	13	13
+ 1.0	12	12	12
+ 1.2	10	10	9
+ 1.4	9	8	8
+ 1.6	6	3	3

## 2.7 Température des feuilles durant la période d'humectation par la rosée

Dans les modèles de prévision de la contamination, il est classique de prendre en compte la température moyenne de l'air durant la période d'humectation. Le but est ici d'analyser le bien fondé de cette simplification dans le cas du cigare et de la première feuille.

On a réalisé une comparaison entre la température de la feuille ( $T_f$ ) et du cigare ( $T_c$ ) avec les températures de l'air ( $T_a$ ) et du point de rosée ( $T_r$ ) durant la période pendant laquelle elles restent mouillées par la rosée.

La figure 23 illustre la variation horaire des températures des feuilles, de l'air et du point de rosée le 3 décembre 1990. La température de l'air est très différente de la température de la première feuille et de la feuille cigare, pendant la période nocturne (18–06 heures). La figure 24 confirme l'existence de différences entre les températures simulées des feuilles et celle de l'air.

Les données du tableau 9 montrent les différences moyennes entre la température de la feuille et du cigare par rapport à la température de l'air et à la température du point de rosée, pendant quinze des jours utilisés pour tester le modèle.

Les figures 23 et 24 montrent l'existence de différence entre  $T_a$  et  $T_f$  et entre  $T_a$  et  $T_c$  pouvant atteindre au moins 3 °C, ce qui donne à penser qu'en présence de durées d'humectation relativement brèves (3–6 heures comme cela arrive dans certaines régions plus sèches et possiblement limitantes de la contamination), il est important de considérer la température réelle des feuilles au moment de l'infection et non pas simplement la température de l'air. Il est donc souhaitable d'utiliser ce modèle non seulement pour l'estimation de la durée de rosée, mais aussi pour caractériser le régime thermique des feuilles pendant les périodes d'humectation dans le but d'apprécier le risque de contamination.

On constate qu'après le lever du soleil, la température des feuilles est supérieure à celle de l'air, et augmente plus vite que la température de l'air. Ce comportement pourrait être important pour la phase de contamination, sachant que les feuilles restent encore mouillées et que leurs températures sont plus proches des conditions optimales du champignon (cf. figures 16 et 19).

Par contre, les différences de température entre la première feuille et la feuille cigare pendant la nuit sont faibles (moins de 1°C). Du point de vue des conditions de température des feuilles au moment de la contamination, il ne semble donc pas nécessaire de différencier le cigare et la première feuille.

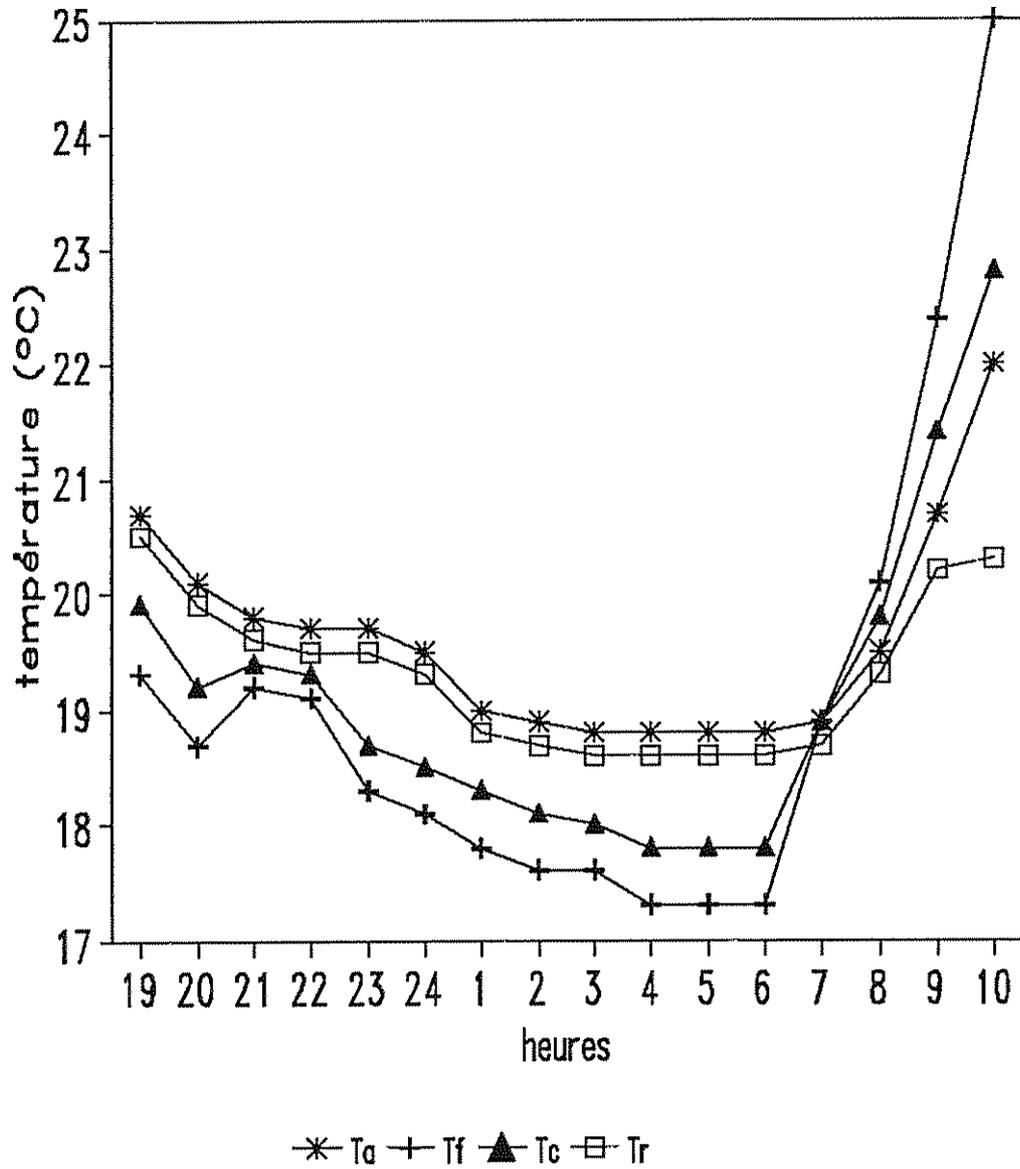


Figure 23. Variation horaire des températures de la première feuille (Tf), de la feuille cigare (Tc), du point de rosée (Tr) et de l'air (Ta) (nuit du 3 au 4 décembre 1990).

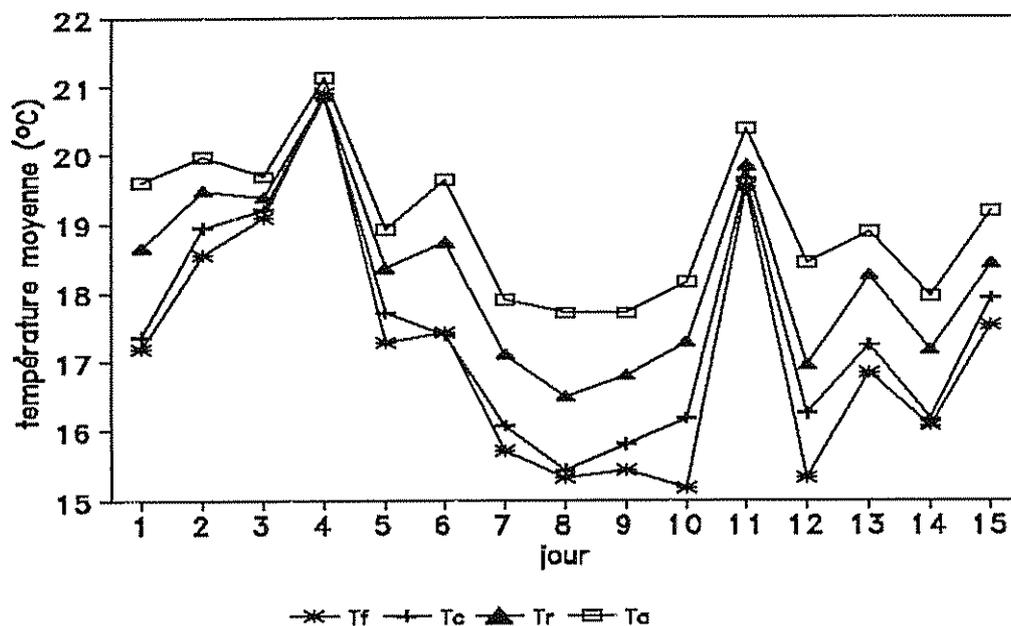


Figura 22. Valeurs moyennes des températures de la première feuille (Tf), de la feuille cigare (Tc), du point de rosée (Tr) et de l'air (Ta), durant la période d'humectation par la rosée. (calculées pour les jours utilisés dans la validation du modèle).

Tableau 9. Température\* de la feuille cigare (Tc) et de la première feuille (Tf) en relation avec la température du point de rosée (Tr) et la température de l'air (Ta).

Jour	Tf	Tc	Tr	Ta	Tr-Tf	Tr-Tc	Ta-Tf	Ta-Tc
1	17.19	17.37	18.65	19.61	1.46	1.28	2.42	2.24
7	18.55	18.94	19.48	19.98	0.93	0.54	1.43	1.04
3	19.10	19.21	19.39	19.69	0.29	0.18	0.59	0.48
4	20.91	20.85	20.86	21.14	-0.05	0.01	0.23	0.29
5	17.28	17.71	18.36	18.93	1.08	0.65	1.65	1.22
6	17.42	17.40	18.74	19.63	1.32	1.34	2.21	2.23
7	15.71	16.07	17.11	17.90	1.40	1.04	2.19	1.83
8	15.32	15.43	16.50	17.71	1.18	1.07	2.39	2.28
9	15.43	15.81	16.80	17.71	1.37	0.99	2.28	1.90
10	15.19	16.18	17.29	18.17	2.10	1.11	2.98	1.99
11	19.53	19.64	19.84	20.38	0.31	0.20	0.85	0.74
12	15.32	16.25	16.96	18.45	1.64	0.71	3.13	2.20
13	16.83	17.25	18.27	18.89	1.44	1.02	2.06	1.64
14	16.07	16.16	17.18	17.96	1.11	1.02	1.89	1.80
15	17.53	17.94	18.43	19.18	0.90	0.49	1.65	1.24
Moyenne	17.16	17.48	18.26	19.02	1.10	0.78	1.86	1.59
Ecart type	1.69	1.54	1.23	1.01	0.54	0.40	0.79	0.64

\* Température moyenne durant le temps que les feuilles ont été recouvertes de rosée.

## 2.8 Comparaison entre la durée de rosée estimée par le modèle et mesurée par des capteurs électriques.

La durée d'humectation n'est pas un paramètre climatique qui se mesure de manière classique dans les stations météorologiques. Il existe de nombreux capteurs d'humectation qui se différencient par le principe de mesure et le traitement du signal (Huber et Wehrlen 1988). Cependant, aucun capteur n'est vraiment représentatif des conditions réelles d'humectation du couvert végétal, du fait que le matériau qui constitue le capteur affecte les résultats. Les capteurs d'humectation appartiennent principalement à deux grands groupes: capteurs mécaniques et capteurs de résistance électrique (Howard et Gillespie 1985).

Ces derniers ont été l'objet de nombreux développements durant les 20 dernières années. Parmi eux, on trouve le capteur que nous avons utilisé (Campbell, modèle 237). Il consiste en un support isolant, sur lequel se trouve un circuit formé par deux peignes en cuivre imbriqués et en contact avec une source de courant. Quand il y a de l'humidité sur le capteur, la résistance est faible et le courant passe entre les peignes du circuit en produisant un signal. Quand la surface est sèche, la résistance est très élevée et il n'y a pratiquement pas de passage de courant.

L'objectif de cette étude était de comparer la durée de rosée sur la feuille cigare et sur la première feuille, estimée grâce au modèle décrit auparavant avec la durée de rosée obtenue grâce au capteur d'humectation Campbell. Le test a été réalisé dans la station météorologique du CATIE, à Turrialba, entre décembre 1992 et avril 1993. Initialement, quatre capteurs d'humectation ont été installés, mais comme il n'y avait pas de différences entre les valeurs qu'ils fournissaient, seuls deux ont été laissés. Ces capteurs ont été placés 1.5 m au-dessus du sol avec une inclinaison de 10 degrés avec l'axe horizontal.

Le tableau 10 présente les résultats de l'heure de début, de l'heure de fin et de la durée de la rosée, estimés par le modèle, et ceux obtenus à partir du capteur de durée d'humectation. Sur les figures 25 et 25 on compare les durées de rosée simulées (modèle ROCIO) et mesurées (capteur).

En prenant en compte toutes les observations, la différence moyenne entre la durée de rosée sur la première feuille et le capteur a été de 0,24 heure, avec un écart standard de 1,75, alors que par rapport à la feuille cigare, la différence a été de 0,87 heure, avec un écart standard de 1,81. Pour un jour, la différence maximale entre la durée de rosée sur la première feuille et celle indiquée par le capteur a été de 5,5 heures, alors que entre la feuille cigare et le capteur, elle a été de 6,5 heures. Il paraît donc nécessaire d'ajuster en fonction de la situation (première feuille, cigare), les relations entre la durée d'humectation réelle des plantes et les données obtenues à l'aide de capteurs électriques.

Toutefois, ces expérimentations ne permettent pas de faire une comparaison directe entre durées de rosée observées sur le cigare et la première feuille et mesurée par les capteurs. Cependant, la bonne correspondance entre les mesures des capteurs et les simulations confirment la validité du modèle.

Tableau 10. Durée de rosée (heures) estimée par le modèle (première feuille et cigare) et mesurée moyennant le capteur Campbell, pour 42 jours.

Première feuille			Cigare			Capteur			
Début	Fin	Durée	Début	Fin	Durée	Début	Fin	Durée	
20.5	8.5	12.0	21.5	8.5	11.0	19.5	8.7	13.2	
21.5	9.5	12.0	22.5	9.5	11.0	21.5	8.5	11.0	
21.3	8.5	12.0	22.5	8.5	10.0	20.3	8.5	12.8	
22.5	8.5	10.0	23.5	8.5	9.0	1.0	7.0	6.0	
20.5	8.5	13.0	20.5	8.5	12.0	18.0	8.3	14.3	
3.5	6.5	3.0	3.5	5.5	2.0	23.0	7.5	8.5	
19.5	9.5	14.0	20.5	9.5	13.0	19.3	8.7	13.3	
23.5	1.5	2.0	23.5	1.5	2.0	20.0	20.5	0.5	
22.5	0.5	2.0	23.5	0.5	1.0	21.8	0.3	2.5	
20.5	8.5	12.0	20.5	7.5	11.0	19.8	7.8	12.0	
20.5	9.5	13.0	20.5	8.5	12.0	19.8	8.3	12.6	
20.5	8.5	12.0	21.5	8.5	11.0	19.5	9.0	13.5	
22.5	10.5	12.0	23.5	9.5	10.0	22.7	8.8	10.2	
20.5	9.5	13.0	20.5	9.5	13.0	20.2	9.0	12.8	
22.5	9.5	11.0	22.5	9.5	11.0	21.0	8.8	11.8	
22.5	9.5	10.0	23.5	8.5	9.0	22.0	8.0	10.0	
22.5	8.5	10.0	23.5	8.5	9.0	19.2	8.5	13.5	
20.5	9.5	11.0	22.5	8.5	10.0	21.2	8.5	11.3	
21.5	9.5	13.0	20.5	8.5	12.0	19.3	8.2	12.8	
21.5	9.5	12.0	21.5	8.5	11.0	23.3	7.8	8.5	
20.5	9.5	13.0	21.5	9.5	11.0	19.6	7.5	11.9	
20.5	9.5	13.0	21.5	8.5	12.0	19.5	7.8	12.3	
21.5	9.5	12.0	22.5	8.5	10.0	21.8	8.6	10.8	
19.5	9.5	14.0	20.5	8.5	12.0	19.3	8.8	13.5	
19.5	9.5	14.0	19.5	8.5	13.0	18.3	7.3	13.0	
21.5	8.5	11.0	22.5	8.5	10.0	20.8	8.5	11.6	
20.5	23.5	3.0	24.5	0.5	1.0	3.3	6.2	2.9	
19.5	9.5	14.0	20.5	9.5	13.0	19.8	9.0	13.3	
19.5	8.5	13.0	20.5	8.5	12.0	21.0	8.3	11.3	
23.5	7.5	8.0	23.5	7.5	8.0	22.7	6.0	7.3	
20.5	7.5	11.0	21.5	7.5	10.0	20.8	4.2	7.4	
21.5	8.5	10.0	22.5	6.5	8.0	20.8	6.2	8.2	
20.5	8.5	12.0	20.5	7.5	11.0	21.0	8.3	11.3	
22.5	7.5	9.0	0.5	7.5	7.0	23.0	6.8	7.8	
20.5	7.5	11.0	21.5	7.5	10.0	21.0	8.5	11.5	
19.5	7.5	12.0	20.5	7.5	11.0	19.0	7.8	12.8	
20.5	8.5	12.0	21.5	8.5	11.0	21.3	8.0	10.6	
0.5	7.5	7.0	1.5	6.5	5.0	0.4	7.5	6.9	
21.5	7.5	10.0	22.5	6.5	8.0	21.0	7.2	10.2	
22.5	7.5	9.0	23.5	7.5	8.0	22.5	7.2	8.6	
21.5	8.5	11.0	21.5	8.5	11.0	21.8	7.8	10.0	
20.5	8.5	12.0	20.5	7.5	11.0	20.5	7.8	11.3	
M.	21.5	8.7	10.6	22.2	7.7	9.5	21.1	8.5	10.4
Et	1.7	2.9	3.1	1.8	2.1	3.1	1.9	3.0	3.1

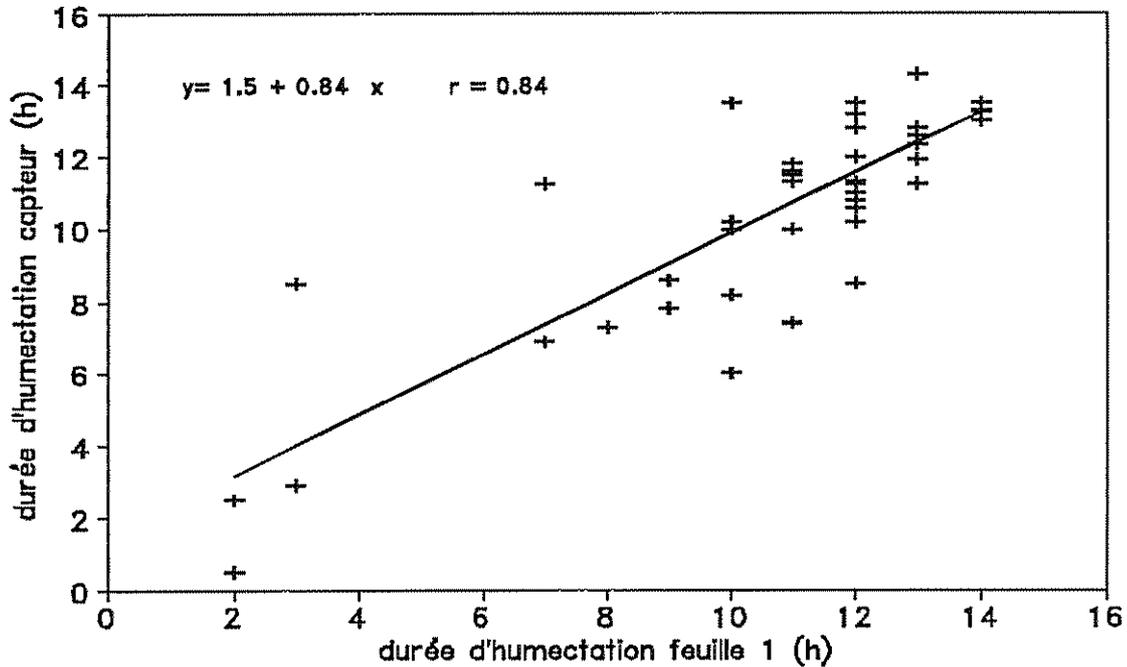


Figure 25. Comparaison entre la durée de rosée sur la première feuille estimée par le modèle et celle obtenue au moyen d'un capteur d'humectation.

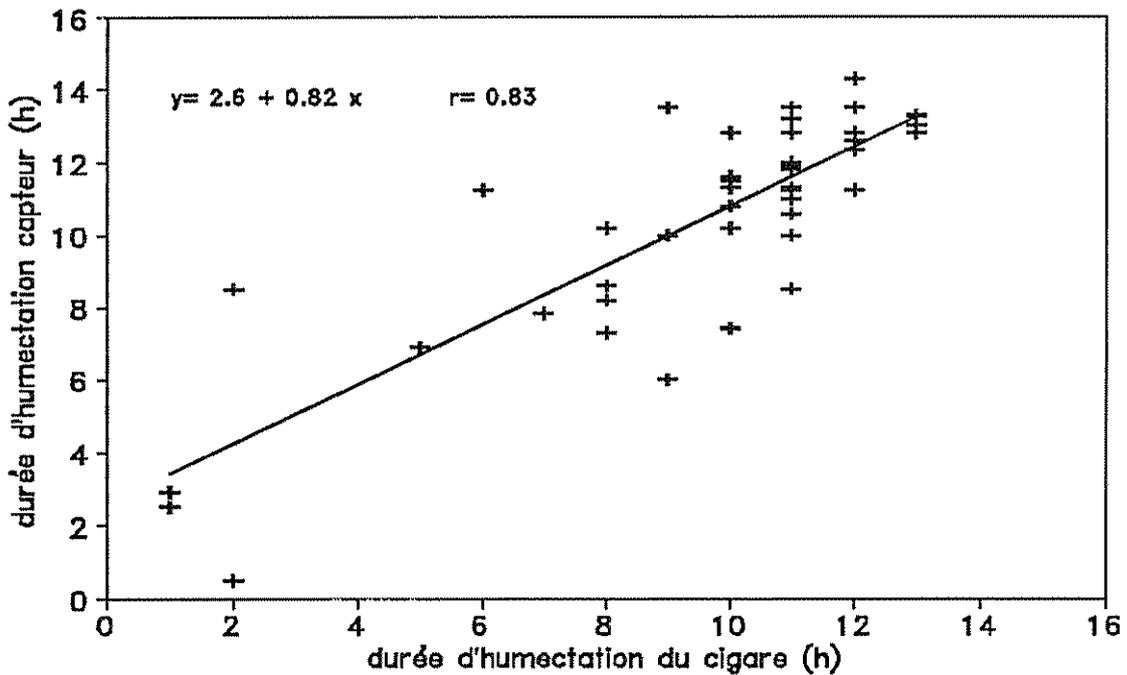


Figure 26. Comparaison entre la durée de rosée sur la feuille cigare estimée par le modèle et celle obtenue au moyen d'un capteur d'humectation.

## 2.9 Utilisation du modèle ROCIO en conditions naturelles au champ en relation avec la Sigatoka noire.

En 1991, une expérience a été réalisée dans une ferme expérimentale appartenant au CATIE, nommée La Lola, située dans la région atlantique du Costa Rica, dans des conditions tropicales humides typiques de la culture du bananier plantain et du bananier dans la plupart des pays de l'Amérique Centrale. L'étude avait pour objectif d'évaluer au niveau du terrain, l'influence de la durée de rosée et d'autres variables météorologiques sur le développement de la Sigatoka noire. Les caractéristiques de la parcelle expérimentale sont indiquées dans le paragraphe 4.3.2 de cette étude.

Les variables épidémiologiques évaluées ont été le niveau d'infection de la feuille deux, de la feuille trois, de la feuille quatre, l'état d'évolution de la maladie, la plus jeune feuille nécrosée, la durée de la période d'incubation de la maladie.

Pour la détermination de la durée d'humectation par la rosée, on a utilisé le modèle décrit précédemment. Les variables météorologiques nécessaires pour faire fonctionner le modèle ont été mesurées de manière similaire et avec les instruments utilisés lors de la phase de validation.

De toutes les combinaisons des variables épidémiologiques avec la durée de rosée, celle pour laquelle on a obtenu la meilleure corrélation ( $r^2 = 0,56$ ) a été la combinaison de la plus jeune feuille nécrosée (moyenne) et de la durée cumulée de la rosée sur les quatre premières des six semaines précédant cette évaluation biologique (figure 27). Dans tous les autres cas la valeur de  $r^2$  a été inférieure à 0.30

Ces résultats peuvent s'expliquer facilement en analysant les valeurs de durée de rosée obtenues (tableau 11). Dans ce dernier, on note qu'il existe très peu de variation dans l'heure de début, de fin et dans la durée de la rosée. Comme il a été indiqué précédemment les spores de *Mycosphaerella fijiensis* ont besoin de deux heures pour germer. Ce qui précède indique que, bien que la durée de la rosée soit un facteur très important dans le développement de la Sigatoka noire, avec des conditions climatiques comme celles de la région étudiée, ce n'est pas un facteur limitant pour le développement du pathogène, du fait qu'il y a en moyenne près de 14 heures quotidiennes de durée de rosée.

Tableau 11. Durée moyenne de rosée sur la feuille cigare (C) et sur la première feuille (F) dans une plantation de bananier plantain située dans la ferme expérimentale La Lola, région atlantique du Costa Rica (moyenne de 151 jours).

	Heure de début		Heure de fin		Durée de rosée	
	C	F	C	F	C	F
<b>Moyenne</b>	18.54	18.38	09.00	09.18	14.06	14.40
<b>Ecart type</b>	1.12	1.07	1.11	1.12	1.34	1.43

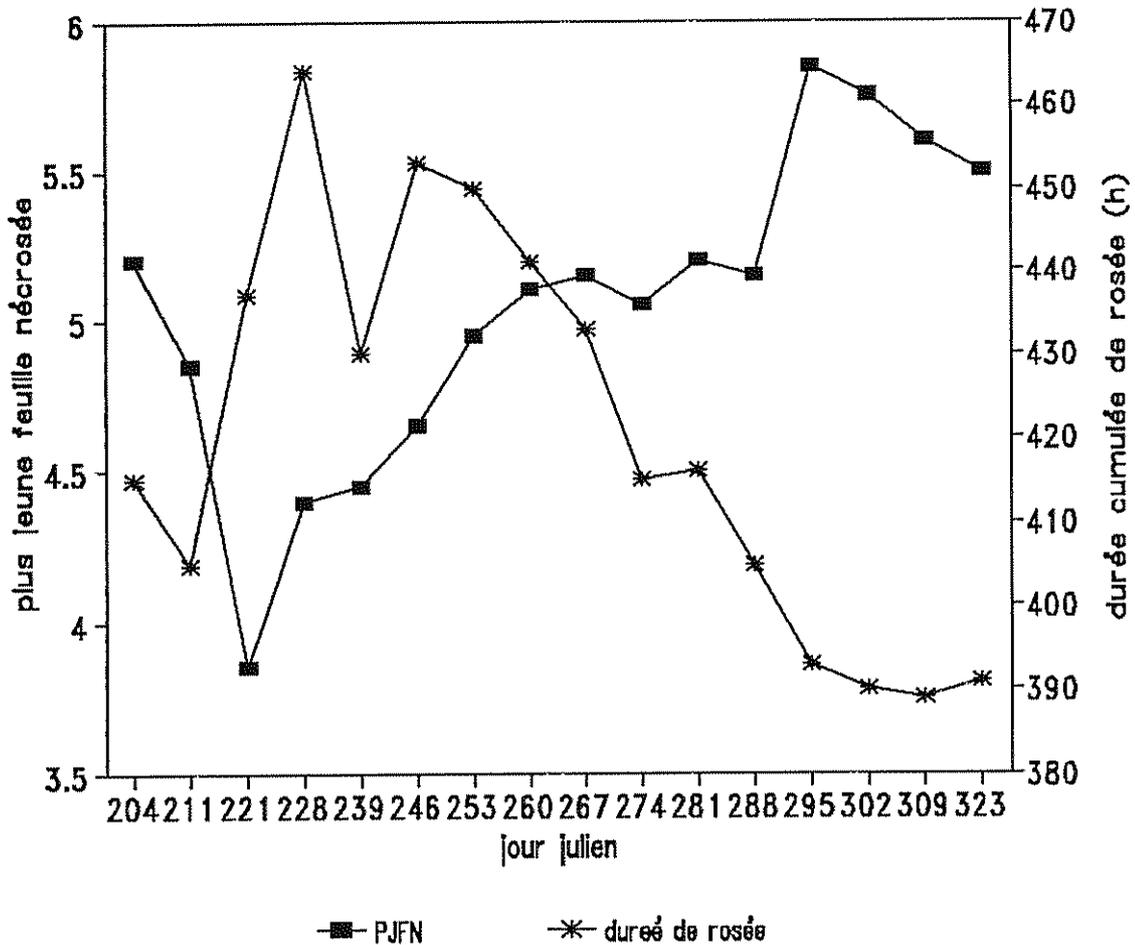


Figure 27. Relation entre la plus jeune feuille nécrosée (PJFN) et la durée cumulée de rosée les 4 premières des 6 semaines avant la date d'évaluation de la PJFN.

## 2.10 Conclusions.

Le modèle ROCIO permet d'estimer la durée de rosée avec un erreur de moins d'une heure par rapport aux durées observées. Ce modèle a été conçu et développé pour une utilisation opérationnelle dans le contrôle de la Sigatoka noire, soit avec des données météorologiques du temps passé, dans l'objectif de faire des corrélations avec l'infection du champignon, soit en temps réel, à partir de données de stations météorologiques automatiques, pour prévoir les risques d'infection (Garry et Laville 1993). Ceci est la raison pour laquelle seules les données réellement disponibles dans une station météorologique standard ont été utilisées comme variables d'entrée du modèle.

Si les mesures de vitesse du vent n'ont pas été réalisées ou ne sont pas disponibles, il est toujours possible d'établir des relations semi-empiriques qui relient la vitesse du vent au voisinage de la parcelle avec la vitesse du vent au niveau de la station météorologique la plus proche (Pedro et Gillespie 1982b). La précision de ce

modèle est limitée en particulier par les relations empiriques utilisées pour estimer les rayonnements standard reçus sur un plan horizontal, et par le manque de moyens pratiques pour mesurer le pourcentage de couverture nuageuse pendant la nuit, dans le but d'estimer le rayonnement atmosphérique. Des relations plus fiables, adaptées à chaque région devraient être conçues pour améliorer la capacité de transfert de cette méthode d'estimation des durées de rosée sur le bananier plantain.

Le modèle ROCIO permet d'estimer une durée de rosée moyenne du cigare et de la première feuille, mais il n'est pas conçu pour estimer la durée de présence d'eau libre dans des zones d'accumulation privilégiée de l'eau. En effet, l'eau de condensation peut ruisseler en direction de la gaine, s'y accumuler et y rester pendant un temps beaucoup plus long que la durée de rosée calculée. De la même façon, le régime (fruit issu de l'ovaire par parthénocarpie) peut constituer une zone d'accumulation privilégiée et d'évaporation réduite. Du point de vue de la Sigatoka noire, ces deux situations sont sans conséquence puisque la pénétration du champignon se fait exclusivement au niveau de la lame foliaire.

Dans la région atlantique du Costa Rica, il existe peu de variation de la durée de rosée; comme il arrive généralement dans les tropiques humides, les conditions météorologiques sont très similaires d'une nuit à l'autre. Ceci est la raison pour laquelle la durée de rosée est relativement constante. Ce comportement laisse supposer que, spécifiquement pour ces conditions météorologiques, il est possible de trouver des méthodes empiriques plus simples afin d'estimer ce paramètre.

Dans la région atlantique du Costa Rica la durée de rosée n'est pas un facteur limitant par la contamination des feuilles du bananier plantain pour la Sigatoka noire.

L'analyse de sensibilité du modèle ROCIO montre que les variables d'entrée que l'on doit mesurer de manière la plus précise possible sont la température et la humidité relative de l'air, et secondairement le rayonnement global. Dans une région plus sèche que la région atlantique, il sera nécessaire d'avoir une estimation précise de la vitesse du vent.

Il y a d'importantes différences entre la température de l'air et la température des feuilles. Ceci suggère que l'on devrait considérer la température réelle des feuilles et non pas seulement la température de l'air pour quantifier le développement de la maladie. Cette considération est plus importante lorsque la durée d'humectation devient faible comme c'est le cas dans la région de Libéria, pendant la période sèche.

L'étude de comparaison entre la durée de rosée estimée par le modèle, et mesurée par des capteurs électriques a montré que, bien qu'il existe une bonne correspondance entre les deux, il est nécessaire de trouver des relations qui permettent d'estimer la durée d'humectation des feuilles à partir de la durée d'humectation qui est mesurée par des capteurs.

### **CHAPITRE 3**

## **LIBERATION DES ASCOSPORES ET CARACTERISTIQUES DES PLUIES DANS LA REGION ATLANTIQUE DU COSTA RICA**

## CHAPITRE 3

### LIBERATION DES ASCOSPORES ET CARACTERISTIQUES DES PLUIES DANS LA REGION ATLANTIQUE DU COSTA RICA.

#### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre sont abordés certains aspects du comportement typique de la pluie dans la région atlantique de Costa Rica et sa relation avec la Sigatoka noire. Cette région non seulement est la principale zone de culture de bananier plantain et de bananier du Costa Rica, mais encore ses caractéristiques climatiques sont très similaires à celles de la plupart des régions productrices de ces cultures en Amérique Centrale.

Bien que la température, la rosée et la pluie semblent être les principaux facteurs météorologiques qui influent sur l'épidémiologie de la maladie, les deux premiers n'apparaissent pas être limitants dans la région d'étude. En effet, la température moyenne mensuelle est de 24 à 26 °C, avec peu de variation d'un mois à l'autre (inférieure à 2 °C). L'oscillation moyenne entre les températures minimale et maximale est voisine de 9 °C. La température minimale moyenne est comprise entre 19 et 20 °C et la température maximale moyenne entre 28 et 29 °C, ce qui veut dire que la plupart du temps elle est favorable au développement du champignon. Par ailleurs, la durée de rosée est généralement supérieure à 12 heures par jour, et ne semble non plus être une variable explicative de la sévérité de la maladie (cf. paragraphe 2.9, chapitre 2).

A partir de cette analyse succincte, on peut supposer que la variation du niveau d'infection de la Sigatoka noire dans les plantations au cours de l'année est due principalement aux variations des caractéristiques de la pluie en relation avec l'hôte et l'agent pathogène.

Ce chapitre présente tout d'abord une analyse expérimentale de la libération des ascospores de Sigatoka noire dans une plantation de bananier plantain, en relation avec la pluie et la rosée. L'importance du rôle de la pluie conduit ensuite à une étude de la durée quotidienne des précipitations afin de mieux caractériser la variabilité des conditions pluviométriques de la région d'étude. Puis, on présente une étude expérimentale de l'interception de la pluie par le couvert du bananier plantain, phénomène dépendant de la durée et de l'intensité de la pluie, qui peut influencer tout à la fois sur la présence d'eau libre, le lessivage des spores ou de produits fongicides de contact.

La durée d'humectation due à la pluie est une fonction de plusieurs variables, en particulier la durée de la pluie et la capacité d'interception du couvert. A la suite de l'étude de ces deux variables, le chapitre s'achève par une approche simplifiée de l'estimation de la durée d'humectation du bananier plantain dans le cas d'un épisode pluvieux (suivi la plupart du temps par la condensation nocturne de rosée).

## 3.2 Libération des ascospores de *Mycosphaerella fijiensis* dans une plantation de bananier plantain.

### 3.2.1 Introduction.

La *Mycosphaerella fijiensis* sporule abondamment sur les feuilles de bananier plantain infectées. Durant les états initiaux de développement des lésions (miettes et stries), il y a production de conidiophores et de conidies. Dans des états plus avancés (taches), il y a une production abondante de périthèces et d'ascospores (Leach 1964). Dans les plantations établies, des infections par les conidies et les ascospores coexistent, mais le second type d'infection est prépondérant (Meredith *et al* 1973, Stover 1980, Gauhl 1990).

Les ascospores de *M. fijiensis* sont libérées seulement après que les périthèces matures ou le tissu foliaire se soient humidifiés (Leach 1964, Meredith et Lawrence 1969). Long (1979) mentionne que l'introduction de tissu foliaire pendant 24 ou 72 heures dans une atmosphère saturée n'a pas été suffisante pour libérer les ascospores, ce qui s'est produit lorsque les mêmes échantillons ont été humidifiés avec de l'eau à la fin de l'expérience.

Même s'il ne présente pas des résultats expérimentaux précis, Gauhl (1990) considère que la pluie est le facteur le plus important pour la libération d'ascospores de *M. fijiensis* et que la rosée la favorise aussi. Durant la saison sèche, il n'y a pratiquement pas de libération, alors qu'elle est abondante dans les heures qui suivent une pluie importante.

Peu d'études ont été réalisées sur la libération et la dispersion d'ascospores de *M. fijiensis*. Long (1979), dans une étude réalisée à Samoa, indique qu'une période de récupération de 10–12 heures est nécessaire entre des pics successifs de concentration de spores, tandis que Gauhl (1990) mentionne qu'approximativement 24 heures sont nécessaires pour obtenir à nouveau des libérations élevées de ces structures reproductives.

Des pluies aussi petites que 0,25 mm ont été plus importantes que la rosée pour la libération des ascospores (Long 1979). Meredith *et al* (1973) considèrent que les pluies inférieures à 1,5 mm sont suffisantes pour libérer les ascospores de ce champignon. Gauhl (1990) suggère que 0,1 mm par heure de pluie est suffisant pour obtenir des concentrations de plus de 30 ascospores par mètre cube d'air.

A Hawaii, la périodicité diurne du nombre d'ascospores de *Mycosphaerella fijiensis* dans l'air pour des jours sans pluies, montre une concentration relativement faible durant la période diurne, mais une augmentation durant la nuit, en atteignant un pic maximal à environ six heures du matin (Meredith *et al* 1973). Des résultats similaires ont été trouvés par Long (1979) à Samoa et par Gauhl (1991) au Costa Rica, mais le pic de concentration maximale de spores intervenait à 4 et 7 heures du matin, respectivement. Cependant, dans le dernier cas, des spores ont été capturées dans la trappe à spores de 5 à 8 heures seulement, et non pas durant toute la nuit.

Meredith *et al* (1973) indique aussi que les jours de pluie, la concentration maximale de spores a été enregistrée peu après le début de celles-ci et un pic s'est produit pendant la nuit. Les augmentations saisonnières de la concentration de spores ont été associées à l'augmentation de la pluie et de l'humidité relative. Sur plusieurs jours, les averses successives ont été suivies par des augmentations

successives de la concentration de spores, mais celle-ci a diminué entre les averses.

Chez les Ascomycètes, la libération est un phénomène actif qui dépend de la turgescence des cellules (Ingold 1981). La libération a lieu seulement après un mouillage des périthèces, ce qui permet l'allongement et l'éjection des ascospores. Il semble que l'énergie cinétique de la pluie joue un rôle, mais cela n'est pas généralisable à l'ensemble des ascomycètes (Rapilly, 1990). A notre connaissance, il n'existe pas d'études relatives au détail des mécanismes de libération des ascospores de *M. fijiensis*. De la même manière, il existe très peu d'éléments relatifs au mécanisme de libération des ascospores de *M. musicola*.

Dans sa thèse sur la sigatoka jaune, Brun (1963) rapproche le comportement de *M. musicola* de celui du genre *Mycosphaerella* en général. On peut faire la même rapprochement avec *M. fijiensis*. D'après Brun (citant Chadeaud 1960) on considère habituellement que les champignons du genre *Mycosphaerella* présentent des asques bitoniques avec un appareil apical sans anneau, mais souvent garni d'une nasse apicale plus ou moins distincte. Leur déhiscence est du type "jack in the box": l'asque reste attaché au stroma basal, mais la membrane extérieure se rompt à l'apex; cette membrane relativement dure et rigide disparaissant, l'asque absorbe une quantité d'eau élevée ce qui a pour résultat son élongation rapide, son passage à travers la papille et la libération des ascospores.

Sans avoir étudié en détail le mécanisme de libération par *M. musicola*, Brun a fait des observations qui l'amènent à conclure à l'absence d'une projection proprement dite, et à une libération des ascospores sortant de l'asque dissociées les unes de autres et non pas groupées au sein d'une enveloppe commune.

Dans ce contexte, l'objectif de cette recherche était de mieux connaître la dynamique de la libération d'ascospores de *M. fijiensis* en conditions naturelles par rapport à quelques éléments météorologiques dans une plantation de bananier plantain.

### 3.2.2 Matériels et méthodes.

Une trappe à spores volumétrique (type Hirst, marque Burkard) a été installée dans une parcelle de bananier plantain (*Musa* AAB, type faux corne, cv. 'curraré'), sans contrôle de la maladie, à Turrialba, Costa Rica, pendant les mois d'octobre et novembre 1992. La trappe a été placée au centre de la parcelle entre quatre plantes de deux rangées, sur une plate-forme nivelée en bois. L'orifice de succion de la trappe était à 4,5 m au dessus du sol, à la hauteur de la plus jeune feuille déroulée.

La trappe aspirait l'air par un orifice de 14 x 2 mm, sur un ruban adhésif transparent qui était mù par un tambour à une vitesse constante de 2 mm/h. La capacité de succion d'air du piège était de 0,6 m<sup>3</sup> d'air par heure (10 litres par minute), ce qui a été vérifié au début de l'expérience grâce à un débitmètre. Chaque fois que l'on changeait le ruban, on nettoyait l'orifice de succion pour éviter toute obstruction au flux.

Une fois le ruban changé, on le coupait immédiatement en segments correspondant à 24 heures, que l'on plaçait sur des lames et ensuite que l'on couvrait de couvre-objets. Ce matériel a été ensuite conservé dans des caisses en plastique, emmagasinés à 5 °C pour éviter la germination des spores ou la croissance d'autres pathogènes.

Les spores ont été comptées sans teinture préalable à un grossissement de 400 fois et sur un parcours de 500  $\mu\text{m}$  de large, perpendiculairement à la direction de la progression du ruban adhésif dans la trappe et sur la partie centrale de chaque segment de 2 mm (1 heure). En suivant les instructions données par le constructeur, le nombre de spores comptées a été converti en concentration estimée par mètre cube. Le décompte des spores n'a pas été corrigé des variations de l'efficacité de la trappe, par conséquent, les concentrations de spores calculées sont toujours sous-estimées (Hirst 1952).

Pendant le déroulement de l'expérience, différentes variables météorologiques ont été enregistrées. Sur un site dégagé en dehors de la plantation ont été mesurées l'humidité relative, le rayonnement solaire et la précipitation à 2.0 m d'hauteur. Pour la vitesse du vent et la durée d'humectation, les mesures furent effectuées à la hauteur de la première feuille déroulée, au sein de la plantation.

### 3.2.3 Résultats et discussion.

Dans le tableau 12 sont présentés les résultats relatifs à la concentration de spores dans l'air durant 21 jours. Étant donné que l'intérêt principal a été de caractériser la dynamique quotidienne de la libération et de la dispersion des ascospores, on a sélectionné les jours qui représentent des conditions hydriques typiques de la zone considérée. Trois conditions principales ont été sélectionnées:

a) Jours sans pluie et avec formation de rosée depuis les premières heures de la nuit (entre 19 et 20 h). Les études statistiques montrent que, bien qu'il n'y ait pas d'époque sèche définie, cette condition se produit près de 30% des jours de l'année dans la région tropicale humide du Costa Rica, où sont les principales plantations de bananier plantain et de bananier.

b) Jours où se produisent des pluies. Dans trois cas sur quatre ce sont des pluies d'une durée inférieure à 4 heures. C'est la condition la plus fréquente et durant la nuit, le feuillage reste généralement mouillé que ce soit à cause de la pluie, de la rosée ou des deux à la fois.

c) Jours avec des pluies prolongées. Bien que ce ne soit pas une situation très fréquente, elle est intéressante à analyser en relation avec la dynamique de la libération des spores.

Les dates 3, 19, 20 et 21 novembre (tableau 12) représentent la condition a. On peut noter qu'il existe une périodicité quotidienne bien définie de la concentration de spores dans l'air les jours où il n'y a pas de pluie. La libération en général est faible durant 24 heures, mais augmente pendant la nuit, en tendant à être supérieure durant les heures proches du lever du jour, quand s'est accumulé plus de rosée (figure 28). Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par Meredith *et al* (1973) et Long (1979), mais différent de ceux reportés par Gauhl qui a trouvé des spores seulement entre 5 et 8 heures, les jours sans pluie, dans la même région où a été réalisé ce travail.

Entre 8 et 19 heures il n'a pratiquement pas été capturé de spores et cela a été moins important que pendant les jours avec pluie, durant la même période. Ceci est probablement dû à l'existence avant le 3 et le 19 novembre, de deux jours sans

pluie, raison pour laquelle les feuilles qui pendaient ou qui jonchaient le sol étaient sèches et donc ne libéraient pas d'ascospores. Au contraire, quand les feuilles sont mouillées, il se libère des spores. Il est possible, qu'étant donné la faible vitesse du vent ( $< 1$  m/s), et le fort rayonnement global (proche de  $500$  W/m<sup>2</sup>), l'ascendance des ascospores vers la partie supérieure du feuillage soit favorisée par la simple convection libre de l'air.

Tableau 12. Données estimées de concentration de l'air en ascospores (nombre de spores/m<sup>3</sup> d'air) à différentes dates.

Heures	oct16	oct17	oct24	oct25	oct26	oct27	oct28	oct29	oct30	oct31
24-01	33 r	20 p	120 r	33 +	214 +	40 +	233 p	40 r	33 +	1173 +
01-02	20 r	20 p	167 r	20 +	300 +	7 +	553 p	27 r	40 +	493 +
02-03	33 r	27 p	140 r	7 +	360 +	53 +	587 +	40 r	40 +	287 +
03-04	27 r	0 p	140 r	20 +	347 +	27 +	247 +	53 r	53 +	313 +
04-05	193 p	27 p	214 r	13 +	300 +	60 +	40 +	67 r	20 +	180 +
05-06	590 p	13 p	47 r	20 +	140 +	47 +	20 +	47 r	60 +	214 +
06-07	720 p	0 p	47 r	0 +	120 +	73 +	20 +	20 r	13 +	93 +
07-08	747 *	13 p	13 r	7 +	80 +	53 +	7 +	13 r	13 +	47 +
08-09	100 *	33 p	0	0	20 +	0	0	0	0 +	33 +
09-10	53 *	27 p	13	0	13	0	7	0	7	20
10-11	0	20 p	13	0	7	0	0	0	7	13
11-12	77	20 p	0	7	13	0	0	0	0	0
12-13	80 p	7 *	0	0	13	0	7	0	0	0
13-14	220 p	47 *	13	0	7	7	7	0	0	0
14-15	313 p	20 *	0	80 p	20 p	7	7	153 p	7	0 p
15-16	333 p	27 *	0	267 *	20 p	0	0	806 p	0	393 *
16-17	200 p	7	33 p	667 *	7 p	0	0	1200 p	7	240 *
17-18	47 p	0	20 p	120 *	27 *	7	13	1306 *	7	120 *
18-19	7 p	0	680 p	53 +	707 *	0	0	326 *	0	33
19-20	7 p	0 r	680 p	13 +	853 +	0	7	33 +	0	20 r
20-21	33 p	0 r	960 +	47 +	1080 +	0 r	7 r	27 +	207 p	87 r
21-22	20 p	20 r	880 +	93 +	1860 +	20 r	7 r	13 +	527 p	214 r
22-23	13 p	40 r	820 +	87 +	1272 +	13 r	47 r	20 +	800 *	240 r
23-24	20 p	40 r	60 +	180 +	47 +	27 r	27 r	13 +	1067 *	273 r
Sume	3816	427	5060	1733	7827	440	1840	4204	2907	4486

continue...

## continuation du tableau 12

Heure	nov03	nov19	nov20	nov21	nov22	nov23	nov24	nov25	nov26	nov27	nov28
24-01	33 r	40 r	13 r	47 r	147 r	47 +	13 +	20 +	20 +	27 +	27 p
01-02	33 r	53 r	227 r	60 r	193 r	0 +	7 +	20 +	73 +	7 +	27 p
02-03	60 r	40 r	214 r	53 r	193 r	7 +	13 +	70 +	13 +	13 +	13 p
03-04	20 r	33 r	214 r	53 r	253 r	7 +	20 +	13 +	13 +	53 +	20 *
04-05	87 r	27 r	333 r	66 r	347 r	20 p	13 +	20 +	140 p	20 +	13 *
05-06	87 r	67 r	253 r	40 r	273 r	20 p	13 +	27 +	693 p	33 +	40 *
06-07	73 r	47 r	73 r	20 r	133 r	27 p	7 +	40 +	566 p	7 +	0 *
07-08	20 r	13	20 r	7	80 r	40 *	20 +	40 +	360 *	0	7
08-09	13 r	7	13	0	20	0 *	107 p	33 +	87 *	0	0
09-10	20	7	0	7	13	0 *	233 *	7	13 *	7	7
10-11	20	0	0	0	7	7	47	0	0 *	7	0
11-12	13	7	0	0	7	0	20	0	7	0	7
12-13	0	0	7	0	7	0	7	0	7	0	0
13-14	7	0	13	7	7	0	0 p	40 p	0	267 p	13
14-15	7	0	20	0	7	0	260 p	567 p	7	587 p	7
15-16	7	0	7	7	33 p	187 p	693 p	767 p	60 p	1433 p	60
16-17	0	0	20	0	720 p	700 p	487 p	900 p	313 *	1000 p	214 p
17-18	0	0	33	7	940 p	653 *	20 p	414 *	387 *	307 p	347 p
18-19	0 r	7	20	7	1413 *	340 *	13 *	107 +	80 +	80 p	140 *
19-20	13 r	7 r	47	20 r	3780 +	73 +	20 *	40 +	0 +	33 p	87 *
20-21	20 r	20 r	20 r	20 r	3393 +	27 +	47 +	7 +	40 +	47 p	20 +
21-22	27 r	20 r	27 r	47 r	1947 +	20 +	20 +	0 +	40 +	0 p	13 +
22-23	20 r	66 r	20 r	80 r	2007 +	20 +	13 +	0 +	0 +	40 p	13 +
23-24	47 r	40 r	20 r	80 r	120 +	0 +	13 +	33 +	27 +	60 p	20 +
Suma	627	500	1614	627	16040	2194	2106	3164	2946	4027	1088

p= pluie; r= rosée; \*= humectation par la pluie += humectation par pluie-rosée.

Les jours de pluie, différentes distributions quotidiennes de la concentration d'ascospores ont été observées, mais toutes dépendent de la pluie. Les périodes du 24 au 26 octobre, du 28 au 31 octobre et du 22 au 26 novembre illustrent ce comportement. La figure 29 représente, à titre d'exemple, la distribution horaire du contenu de spores dans l'air pour la période du 28 au 31 octobre.

En général, la libération de spores a augmenté fortement après le début de la pluie ou peu de temps après, principalement avec des pluies supérieures à 1,0 mm. Ensuite la concentration en spores a diminué, en étant très faible à partir du moment où le feuillage a séché, durant la période diurne, mais une libération importante de spores s'est maintenue durant la période nocturne quand les feuilles restaient mouillées. Ceci indique que la présence d'une pellicule d'eau sur les feuilles est indispensable pour que les ascospores puissent être libérées depuis les périthèces. Par ailleurs, étant donné que dans une plante et même dans une feuille, il existe tous les degrés de maturité possibles des périthèces, la présence d'humectation permet que les périthèces qui arrivent à maturité par la suite libèrent les ascospores.

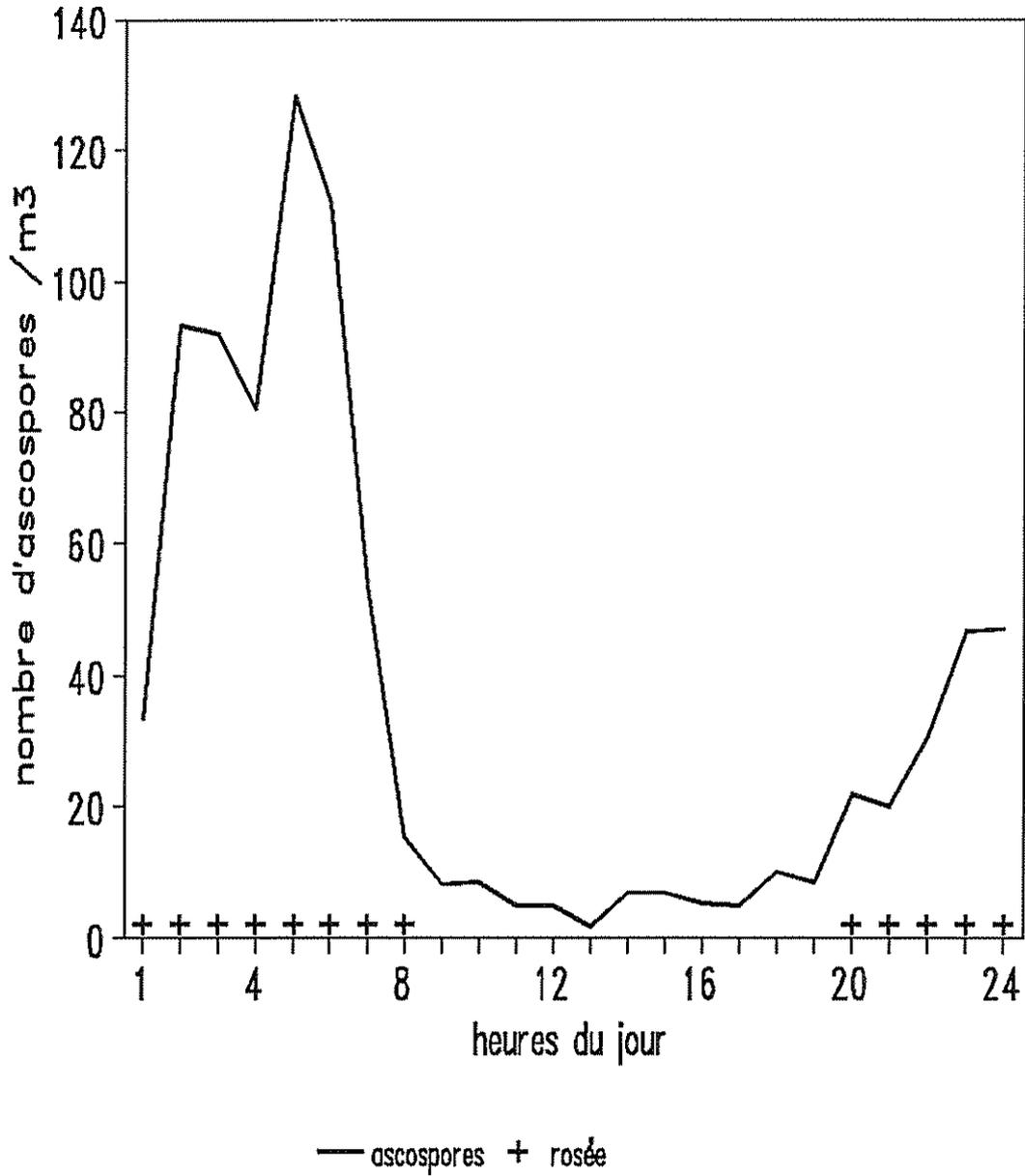


Figure 28. Concentration horaire (moyenne de 4 jours) de l'air en ascospores de *M. fijiensis* pendant une période sans pluie et avec présence de rosée.

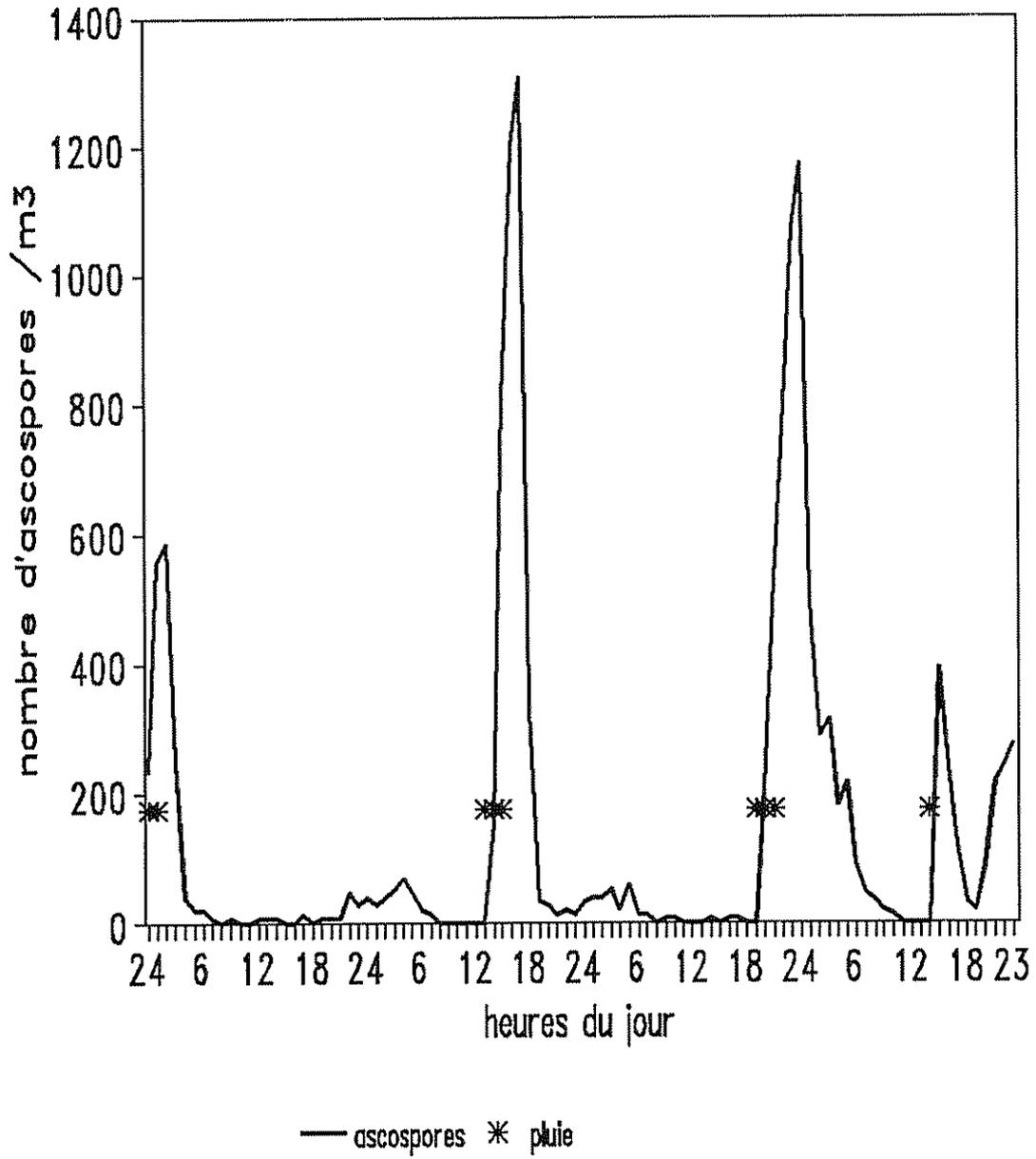


Figure 29. Concentration de l'air en ascospores de *M. fijiensis* durant plusieurs jours de pluie (28 au 31 octobre 1992).

La troisième situation analysée a été la libération d'ascospores quand se produisaient des pluies prolongées. Il y eu deux événements importants de ce type durant l'étude et ils ont correspondu aux 16–17 octobre avec 23 heures continues de pluie et aux 27–28 novembre avec 12 heures continues de précipitation. Dans les deux cas il y a eu une forte libération d'ascospores au début des pluies et ensuite, elle s'est maintenue assez faible, mais sans disparaître durant le reste de la durée de la pluie, exceptées quelques heures où on n'a pas trouvé d'ascospores (figure 30).

La concentration quotidienne d'ascospores a été assez variable. Les jours sans pluie, elle a varié de 440 (27/10) à 1614 (20/10). Les jours de pluie, elle a oscillé entre 427 (17/10) et 16040 (22/11), bien que pour la plupart de ceux-ci, elle varie entre 1700 et 4500 ascospores/m<sup>3</sup> d'air. La valeur particulièrement élevée du 22 novembre est due à une pluie de 10 mm, après 118 heures sans pluie, tandis que la valeur assez basse a eu lieu après une pluie continue de 12 heures le jour précédant et avec 12 heures de pluie le même jour.

Une analyse du tableau 13, dans lequel est présentée la relation entre le nombre d'heures écoulées depuis la fin de la dernière pluie, le nombre d'heures diurnes dans cette période et la quantité de pluie, avec la concentration de spores durant la période de plus grande concentration après une pluie, suggère que pour obtenir de nouvelles concentrations élevées d'ascospores dans l'air, il doit s'écouler 19 à 20 heures depuis la fin de la dernière pluie, dont au moins 7 heures appartiennent à la période diurne, et la pluie disséminatrice sera beaucoup plus efficace si elle est supérieure à 1 mm. Ainsi, il apparaît que les périodes alternées avec et sans pluie favorisent la production d'ascospores.

Tableau 13. Concentration de l'air en ascospores de *M. fijiensis* en relation avec la période préalable sans pluie, le nombre d'heures diurnes durant cette période et la quantité de pluie.

Nb. heures sans pluie	Nb. heures diurnes	Pluie (mm)	Concentration d'ascospores (/m <sup>3</sup> )
118	58	10.0	14233
54	41	16.6	4073
36	20	0.9	3791
31	12	0.4	1620
27	12	1.5	5261
24	8	3.7	5772
21	7	24.8	3594
19	7	8.0	2795
18	8	0.5	1054
17	6	1.2	2350
16	8	0.8	753
15	2	0.4	407
11	0	1.4	1846
10	7	1.1	848
10	0	0.2	107
8	8	0.9	1953
8	8	0.5	840
5	5	20.4	1146
4	4	5.0	1440

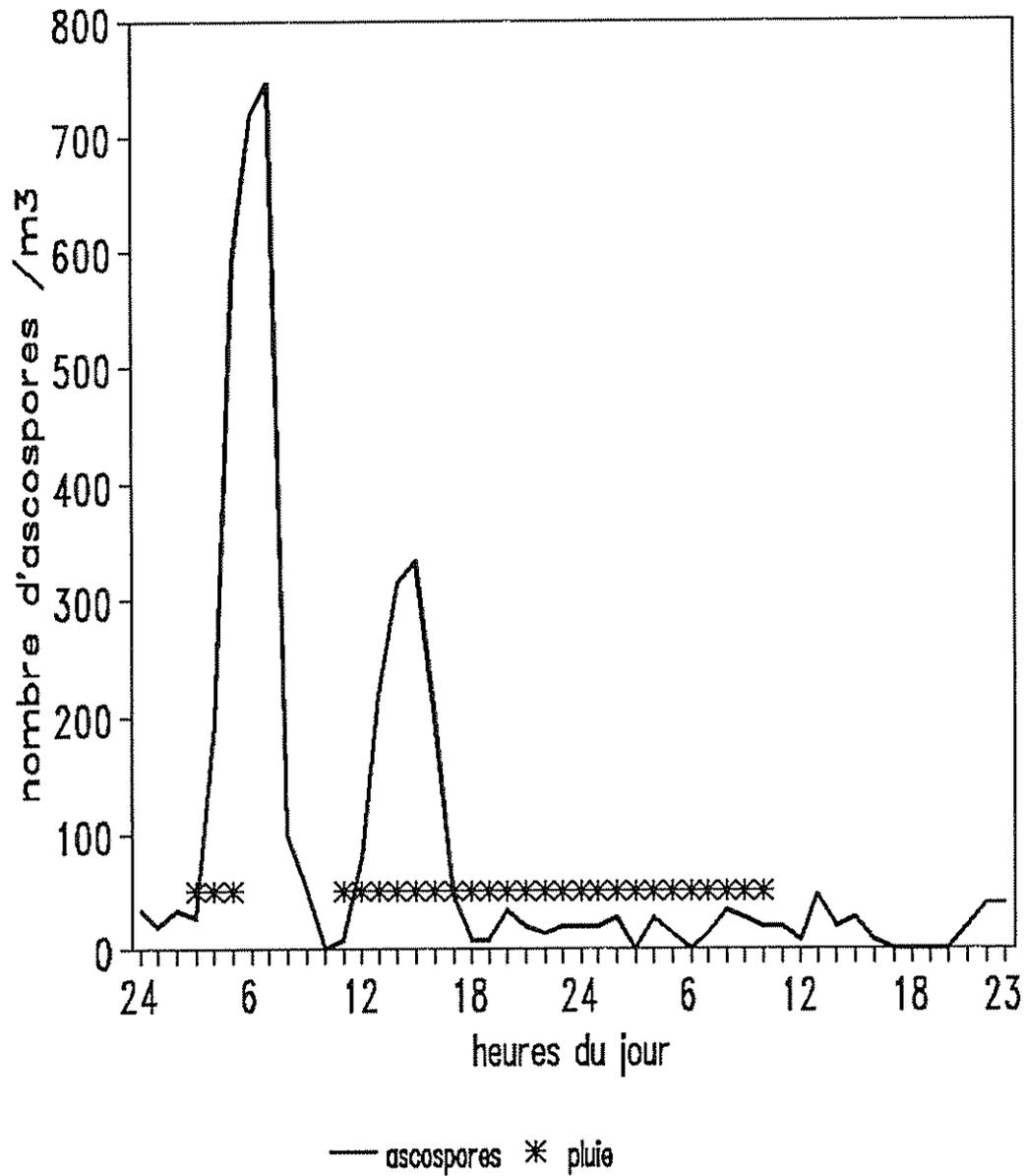


Figure 30. Concentration de l'air en ascospores de *M. fijiensis* durant une période de pluie prolongée (16-17 octobre 1992).

Sachant qu'il n'existe pas de résultats précis sur le mécanisme biophysique de la libération de *M. fijiensis*, on est réduit à faire des hypothèses pour comprendre les relations précédents entre la présence des ascospores dans l'atmosphère et l'occurrence d'événements climatiques. D'après ce qui est exposé au 3.2.1, on peut vraisemblablement éliminer le mécanisme de "rain puff" qui est un processus de libération due à l'action mécanique (vibration, microturbulence de l'air) de l'impact des gouttes de pluie sur une feuille sèche.

La différence (facteur de 1 à 10 environ) entre la libération due à une rosée (figure 28) ou à des périodes de pluie (figures 29 et 30) indique un rôle probable de l'énergie cinétique de la pluie. Une interprétation possible est que la rosée n'aboutit pas à une mouillage en profondeur des asques là où la pluie serait beaucoup plus efficace.

### 3.2.4 Conclusions.

Les jours sans pluie, la concentration d'ascospores a été faible durant les 24 heures, mais a augmenté durant la nuit, en tendant à être plus élevée durant les heures proches du lever du jour.

Les jours de pluies, la libération a dépendu largement de la pluie. La libération a augmenté fortement après le début des pluies ou peu de temps après et ensuite a diminué. Durant les pluies prolongées, le comportement est similaire.

Durant les périodes sans pluie, la rosée est un facteur important qui permet de maintenir un taux de libération appréciable d'ascospores. Ceci contribue à maintenir un niveau suffisant d'inoculum dans la plantation. Pendant l'époque pluvieuse, la pluie est clairement le facteur déterminant pour la libération des ascospores. L'alternance de périodes avec et sans pluie paraît favoriser leur production, et des pluies supérieures à 1 mm sont nécessaires pour leur libération élevée, bien que des pluies plus petites y contribuent aussi de manière importante.

Etant donné les conditions climatiques des principales régions productrices de bananier plantain et de bananier en Amérique Centrale, dans lesquelles il n'y a pas de périodes sèches prolongées, il faut s'attendre à ce que la pluie (quantité, fréquence et durée) soit le facteur fondamental qui régit la production et la libération d'inoculum et avec lui le niveau d'infection des plantations au cours de l'année.

### 3.3 Etude de la durée de la pluie dans la région atlantique du Costa Rica.

La pluie a un rôle prépondérant dans l'épidémiologie de la Sigatoka noire pour la culture du bananier plantain. Dans le but de caractériser et de mieux comprendre son influence sur l'agent pathogène on a réalisé une étude statistique de la durée de la précipitation, à partir des enregistrements des 10 dernières années des stations météorologiques du CATIE et de La Lola. Les instruments utilisés pour mesurer la pluie sont des pluviographes à flotteur (ou à siphon) (mesure de hauteur de pluie d'au moins 0,1 mm et de durée supérieure à 5 minutes).

Pour chacun des deux sites, on a analysé 3650 enregistrements quotidiens de pluie, en déterminant pour chaque événement sa durée. A partir de ces données, on a réalisé une analyse fréquentielle des durées journalières de la pluie. Pour cette analyse, on a suivi la méthodologie générale proposée par Stern *et al* (1982) et Stern et Dale (1983) qui consiste à estimer la probabilité de durée de pluie zéro, calculée comme la proportion de jours sans pluie durant la période étudiée et ensuite d'ajuster à la durée de pluie journalière une distribution théorique. Les étapes furent les suivantes: tracé de la distribution observée des durées journalières de pluie (histogramme de fréquences) et ajustement d'une distribution gamma (test de  $\chi^2$ ) dont la fonction de densité s'écrit:

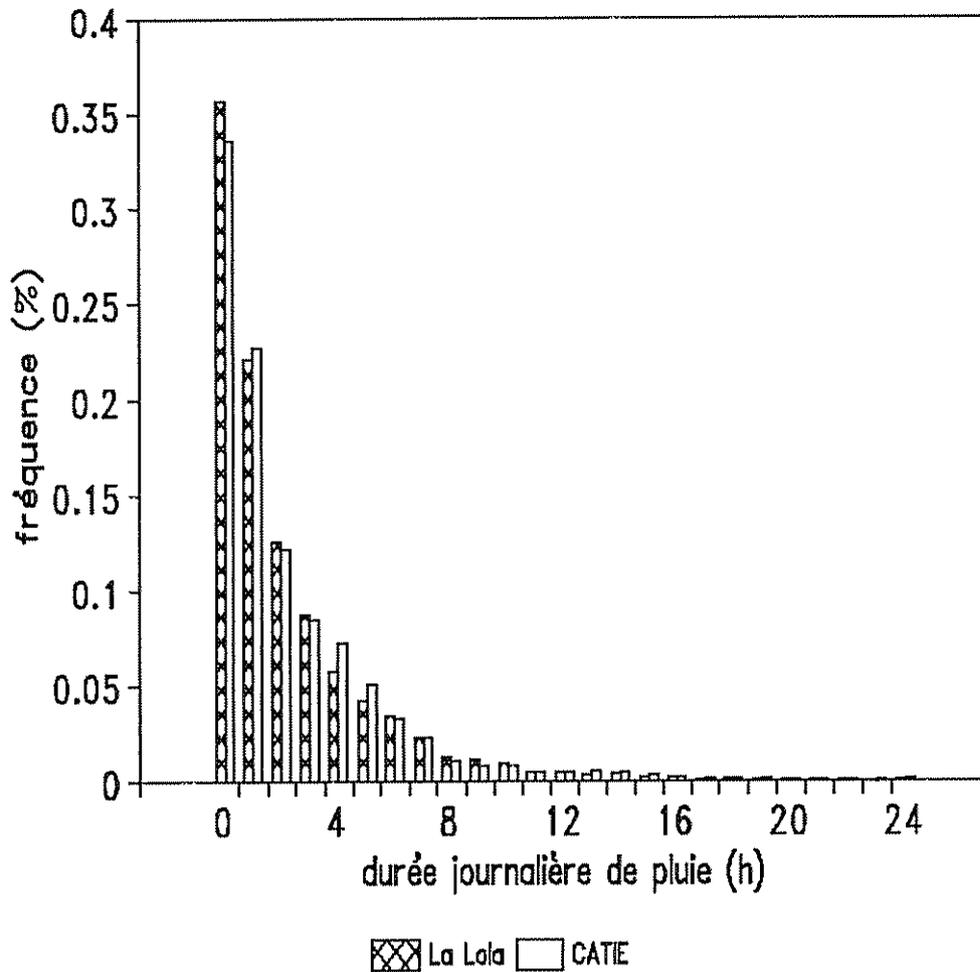
$$f(u) = \frac{1}{\Gamma(\gamma)} u^{\gamma-1} e^{-u} \quad \text{avec } u = x - x_0 / s$$

$\gamma$  (>0) est le paramètre de forme,  $x_0$  le paramètre de position et  $s$  (>0) le paramètre d'échelle.  $\Gamma(\gamma)$  est la fonction  $\Gamma$  complète.

La figure 31 montre la distribution générale des durées journalières de pluie au CATIE et à La Lola, en incluant les jours sans pluies ( $n=3650$  jours). Dans le cas du CATIE, 34% et de La Lola 36% des jours, il n'a pas plu, par conséquent, les probabilités estimées d'occurrence de pluie sont de 0,66 et 0,64 respectivement.

Pour les jours de pluie, les résultats obtenus pour les deux sites ont été similaires: 76% des jours ont eu des pluies inférieures à 4 heures. La durée moyenne des pluies a été de 2 heures 42 minutes pour le CATIE et 2 heures 48 minutes pour La Lola. De plus, la moyenne mensuelle de jours avec pluie a été de 20,1 pour le CATIE, variant de 13 en avril à 26,5 jours en août, tandis que pour La Lola, il a été de 19,5, oscillant entre 14,6 en mars et 24,1 en juillet.

Il a été montré dans l'étude de la libération des ascospores de *M. fijiensis*, que ce sont les pluies d'au moins 1 mm qui contribuent aux libérations les plus fortes de spores. Par conséquent, on a déterminé aussi, le pourcentage de jours avec des pluies d'au moins 1 mm. Dans le cas du CATIE, les pluies ont été d'au moins 1 mm pour 78% des jours, alors qu'à La Lola pour 82% de ceux-ci.



**Figure 31. Distribution des fréquences observées de durée journalière de pluie sur les sites du CATIE et de La Lola (région atlantique du Costa Rica) pendant la période 1982–1992 (durée= 0 signifie l'absence de pluie).**

Aux données observées de fréquence de durée des pluies supérieures à 5 minutes et d'au moins 0.1 mm, dans les deux sites, on a fixé une distribution type gamma (figures 32 et 33), qui présente le meilleur ajustement par rapport à la distribution observée des durées. Cette distribution est caractérisée par deux paramètres: paramètre de forme ( $\gamma$ ) et paramètre d'échelle ( $s$ ) (Susuki 1980). Pour le CATIE, la valeur de ces paramètres ont été  $\gamma = 0,82$  et  $s = 0,28$ ; tandis que pour La Lola  $\gamma = 0,88$  et  $s = 0,30$ .

Ces résultats montrent que durant la majeure partie de l'année, la distribution de la durée journalière des pluies dans la région Atlantique du Costa Rica (où se trouve l'essentiel des plantations du bananier plantain et de bananier) présente des

caractéristiques hautement favorables à la production et la libération de spores de *M. fijiensis*, ainsi qu'à la contamination:

- 1) L'absence d'une période sèche prolongée (il y a seulement une réduction de la pluie de février à mars).
- 2) Environ 35 % des jours de l'année sans occurrence de pluie, mais distribués tout le long de l'année (la moyenne mensuelle de jours de pluie est proche de 20, avec un minimum de 15 jours en mars et un maximum de 26 jours en août). Cela permet l'alternance de conditions sèches et mouillées.
- 3) Dans 75% des cas, la durée journalière de la pluie est inférieure à 4 heures et la plupart des pluies débutent après 15 heures situation qui fréquemment prolonge la durée continue d'humectation (pluie et rosée) jusqu'à près de 18 heures journalières.
- 4) Près du 80% des pluies journalières sont supérieures à 1 mm, ce qui favorise la dissémination des spores.

Toutes ces caractéristiques contribuent aussi à expliquer l'étroite dépendance observée par beaucoup de chercheurs et de producteurs de bananier plantain et de bananier, entre la variation de la pluie au cours de l'année et le niveau d'infection des plantations.

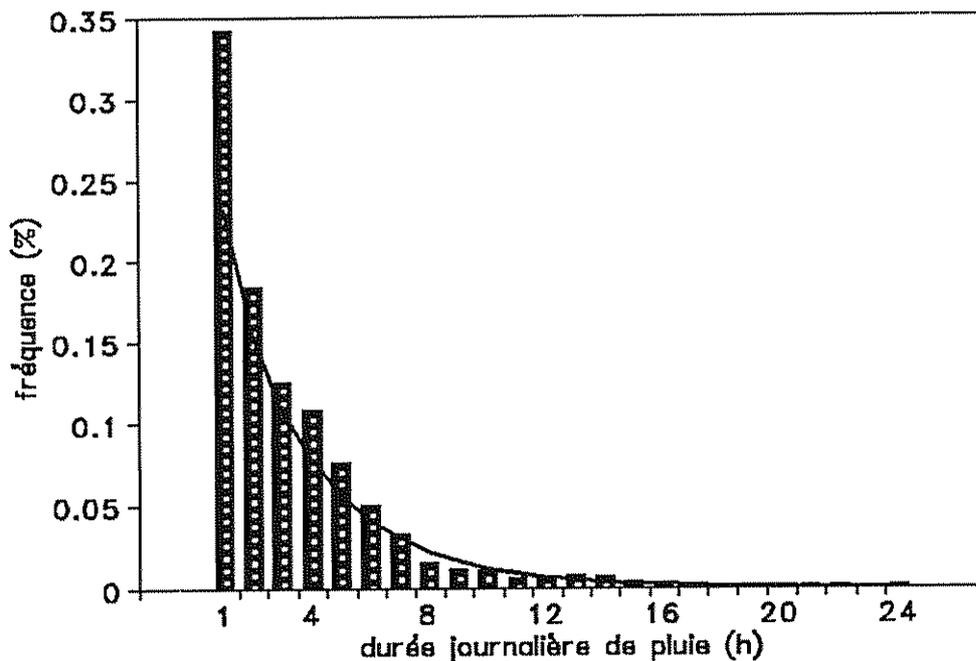


Figure 32. Distribution des durées journalières de pluie au CATIE (Costa Rica) 1982–1992, à laquelle on fixe une distribution gamma ( $n=2424$ ,  $\gamma=0,82$ ;  $s=0,28$ ).

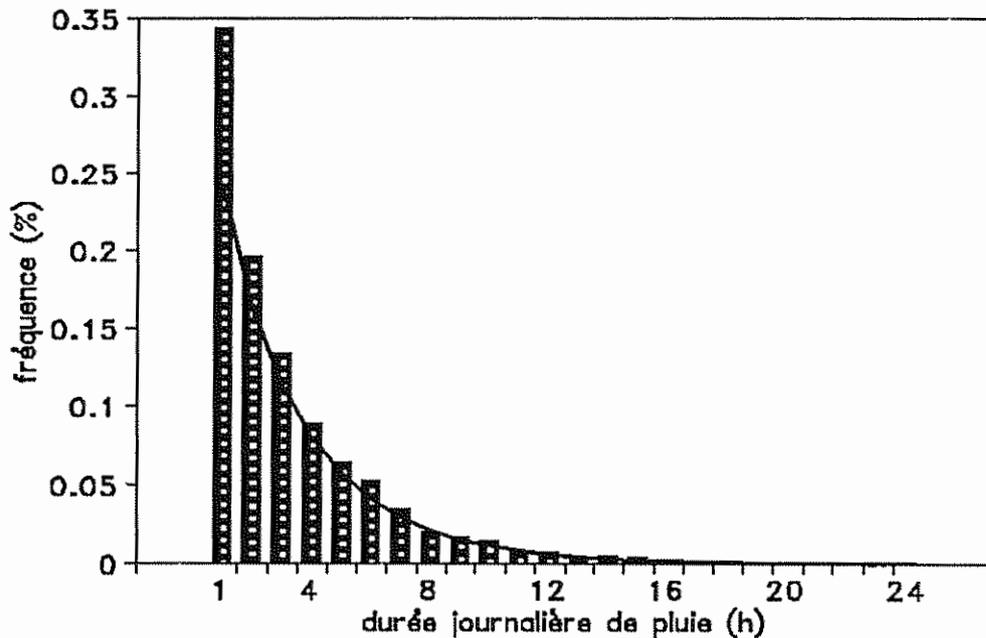


Figure 33. Distribution des durées journalières de pluie à La Lola (Costa Rica) 1982–1992, à laquelle on fixe une distribution gamma ( $n= 2350$ ,  $\gamma= 0,89$ ;  $s=0,30$ ).

### 3.4 Etude de la dynamique de l'eau de pluie dans le couvert de bananier plantain.

Article accepté par la revue FRUITS: Jiménez F. and Lhomme J.P. 1994. Rainfall interception and radiation regime in a plantain canopy.

#### 3.4.1 Introduction

Pour une pluie donnée, les pertes brutes dues à l'interception ( $I$ ) par le couvert, peuvent être exprimées comme la différence entre la précipitation incidente, ou précipitation brute ( $P_i$ ) et la précipitation nette ( $P_n$ ).  $P_n$  est la quantité de pluie qui atteint la surface du sol, c'est à dire la somme de la précipitation interne ( $T$ : "throughfall") et de l'écoulement le long des tiges ( $S$ : stemflow) (Rutter 1975):

$$I = P_i - P_n \quad \text{avec} \quad P_n = T + S \quad (3.1)$$

$T$  représente la combinaison de l'eau qui s'égoutte depuis le couvert et de celle qui atteint directement la surface du sol par les espaces existant dans le feuillage.  $S$  est la pluie acheminée jusqu'au sol le long des tiges.

Les pertes brutes par interception représentent l'eau retenue par les parties aériennes des plantes, évaporée depuis leurs surfaces. Pour n'importe quelle pluie, suffisante pour saturer le couvert végétal, il est possible d'exprimer les pertes brutes par interception comme la somme de trois termes:

$$I = E + A + C$$

(3.2)

E est la quantité d'eau interceptée qui s'évapore durant la pluie, A est la quantité d'eau interceptée qui est absorbée durant le même moment et C est la capacité de stockage du couvert, définie comme la quantité d'eau que retient le couvert à la fin de la pluie. Le terme A est généralement petit par rapport à l'évaporation (Rutter 1975) et peut être négligé. Les caractéristiques propres des feuilles de bananier plantain, et plus particulièrement leur forme cannelée au niveau de l'insertion des gaines dans la tige de la plante, peut augmenter la valeur de C, du fait de la rétention d'eau dans ces aisselles foliaires.

I est généralement déterminé au moyen de la mesure simultanée de  $P_i$  et de  $P_n$ . Si A et E sont négligés, la capacité de stockage du couvert peut être calculée à partir de l'équation 3.2, en posant C égal à I.

La quantité d'eau interceptée dépend (Jackson 1975) des caractéristiques de la végétation comme la taille, la forme, l'orientation et la texture du couvert, ainsi que des facteurs météorologiques comme la quantité, l'intensité et la durée de la pluie, l'action évaporatoire de l'air et la action mécanique du vent.

L'interception de la pluie par les plantes a été principalement étudiée pour son importance dans le cycle hydrologique et dans le bilan hydrique des surfaces végétales. Cependant, la persistance d'eau libre sur la surface des plantes, est une condition nécessaire pour la dissémination et le développement réussi de beaucoup de pathogènes, principalement des champignons (Royle et Butler 1986). L'eau interceptée peut aussi transporter des substances polluantes vers ou depuis les surfaces végétales et modifier le caractère effectif des produits chimiques (Butler et King 1982).

La majorité des études sur l'interception de l'eau de pluie a été réalisée dans les forêts (Rutter 1975), où les pertes d'eau interceptée représentent une proportion plus importante de l'évaporation totale, en comparaison avec des plantes à faible développement vertical. Quelques travaux en pâturage ont été publiés, par exemple Burgy et Pomeroy 1958; Couturier et Ripley 1973. En cultures agricoles, il existe peu d'études et elles ont été réalisées en zone tempérées, par exemple Butler et Huband (1985). Jiménez (1986) a travaillé au Costa Rica sur les systèmes agroforestiers *Coffea-Erythrina*, *Coffea-Cordia*. On doit s'attendre à ce que, par la nature des pluies tropicales et des couvertures de végétation tropicale, on obtienne des modèles d'interception différents de ceux rencontrés dans les zones tempérées (Jackson 1975).

### 3.4.2 Mesures

L'étude a été réalisée sur les terrains expérimentaux du Centre Agronomique Tropical de Recherche et d'Enseignement (CATIE), à Turrialba, Costa Rica, durant la période comprise entre décembre 1988 et décembre 1989. Les caractéristiques climatiques du lieu ont été spécifiées dans le paragraphe 2.4.

La parcelle utilisée pour cette expérimentation consistait en une plantation de bananier plantain (*Musa AAB*), type faux corne, cv. 'curraré', en place depuis deux ans. La surface de la parcelle était d'un hectare et sa topographie est plane. La densité de plantes était de 1322 unités par hectare. L'espacement entre les rangs et entre les plantes étaient de 2,75 m. La plantation a été conduite en respectant les recommandations techniques (fertilisation, lutte contre les maladies et les mauvaises

herbes, ...). L'indice foliaire moyen (IF) du couvert était de 2,0. La majeure partie de la surface foliaire était située entre 2 et 5 m de hauteur au dessus de la surface du sol. Durant la période d'étude on a obtenu 65 événements pluvieux individuels. Un événement a été considéré individuel, lorsqu'il a été précédé et suivi d'au moins six heures sans pluie (Rutter 1967, Zinke 1967).

La précipitation incidente et interne ont été mesurées au moyen de pluviomètres linéaires de PVC de 3 m de long, connectés à des récipients plastiques de 25 litres de capacité, où était collectée l'eau. Ces pluviomètres ont été construits à partir de tuyaux de PVC d'un diamètre de 25,4 cm (10 pouces) et 0,63 cm (0,25 pouces) d'épaisseur et sectionnés longitudinalement à l'aide d'une scie électrique (largueur de section: 13,3 cm). Ils ont été installés à 60 cm au-dessus de la surface du sol, avec une inclinaison d'environ 7 degrés. En raison de la forme cylindrique des tuyaux et de la largeur réduite de la section longitudinale du tuyau par rapport à son diamètre, les pertes de pluie par éclaboussure sont négligeables. La surface moyenne de réception des pluviomètres était proche de 4000 cm<sup>2</sup>, mais l'aire de chacun d'entre eux a été soigneusement déterminée par digitalisation.

Deux de ces pluviomètres ont été installés en dehors de la plantation près d'un pluviomètre à siphon muni d'un système d'enregistrement journalier. Dix d'entre eux ont été placés de manière aléatoire à l'intérieur de la plantation pour mesurer la précipitation interne. Pour chaque événement pluvieux  $P_i$  et  $T$  ont été calculés comme la moyenne des valeurs données par les pluviomètres.

L'écoulement le long des tiges a été mesuré sur huit plantes. Pour cela, on a adapté des colliers de tuyau de polyéthylène en forme de spirale autour des pseudo-tiges connectées à des récipients plastiques gradués, de 25 litres de capacité. On a formé un canal avec de la pâte à modeler, entre le tuyau et la tige et on a fait des trous dans le tuyau qui servait de base au canal, de manière à ce que l'eau qui s'écoulait, entre dans le tuyau et soit canalisée jusqu'au récipient collecteur. Avant de commencer les mesures définitives, on a vérifié l'efficacité de la méthode. On a considéré comme valeur de  $S$ , la moyenne de l'eau écoulée par les huit tiges.

### 3.4.3 Résultats et discussion.

Lors de l'expérience, on a mesuré 65 événements pluvieux qui ont varié entre 0,3 et 33,4 mm. Le tableau 14 montre les résultats obtenus, exprimés comme le pourcentage de la précipitation incidente, pour différentes classes de celle-ci et pour tous les événements. Quand la quantité de pluie augmente, le pourcentage d'interception tend à diminuer, passant de 18% pour  $P_i < 5,0$  mm à 8% pour  $P_i > 15$  mm. Dans le même temps, l'écoulement par les tiges se maintient presque constant à 9%. Ainsi, la précipitation interne augmente de 75% à 83% pour les mêmes classes. Pour tous les événements, l'interception est de 13%.

Plusieurs auteurs (Franken *et al* 1982, Calherios et Butler 1986) montrent aussi que le pourcentage d'interception diminue quand la quantité de pluie augmente. En comparaison avec d'autres cultures, le pourcentage d'interception obtenu est très inférieur au 40 % reporté pour le blé (Butler et Huband (1985), mais supérieur au 4,1% indiqué pour la canne à sucre (Leopoldo *et al* 1981). D'une part, il

Tableau 14. Pourcentage de précipitation interne (T), écoulement par les tiges (S) et interception brute (I) pour différentes classes de précipitation incidente (Pi).

Pi (mm)	Nombre d'événements	T (%)	S (%)	I (%)
Pi < 5.0	26	73	9	18
5.0 < Pi < 15.0	24	81	9	10
Pi > 15.0	15	83	9	8
Tous les événements	65	78	9	13

faut considérer que l'indice foliaire de la plantation de bananier plantain (2.0) est inférieur à des cultures comme le blé. D'autre part, les feuilles de bananier plantain sont glabres et l'épiderme de la lame foliaire est protégé par une couche de cire (Sandoval 1989) qui rend difficile l'adhérence des gouttes d'eau sur la surface, ce qui semble aussi se passer pour la canne à sucre. Ceci pourrait aussi expliquer qu'il faut plus de temps pour atteindre la saturation du couvert.

L'écoulement le long des tiges paraît faible par rapport à d'autres cultures: 39% pour la canne à sucre (Leopold *et al* 1981), au dessus de 49% pour le maïs avec des pluies similaires (Quin et Laflen 1983), près de 22% pour plusieurs autres cultures (Haynes 1940). Cependant, il faut tenir compte du fait que bien que la forme des feuilles du bananier plantain permette une canalisation efficace de l'eau vers la base de la pseudo-tige par la nervure centrale et le pétiole qui sont cannelés, le contrôle efficace des plantations demande qu'il y ait peu de tiges par unité de surface par rapport aux autres cultures comme les céréales. Ceci a par conséquence une relativement faible surface d'interception et un écoulement relativement peu important par rapport à d'autres cultures.

Les tableaux 15 et 16 montrent les pourcentages d'interception pour différentes classes d'intensité (R) et de durée (D) de la précipitation incidente. Les tendances observées sont similaires à celles obtenues avec la pluie incidente Pi. L'interception est plus grande quand R et D sont petits et la précipitation interne et l'écoulement par les tiges ne varient presque pas. Ainsi, pour les durées de pluie inférieures à 1,5 heure et des intensités plus petites que 1,5 mm/h, l'interception est plus importante que pour les autres classes de durée et d'intensité.

Tableau 15. Pourcentage de précipitation interne (T), d'écoulement le long des tiges (S) et d'interception brute (I) pour différentes classes d'intensité de pluie (R).

R (mm/h)	Nombre d'événements	T (%)	S (%)	I (%)
R < 1.5	25	75	9	16
1.5 < R < 3.0	21	82	9	9
R > 3.0	19	80	9	11

Tableau 16. Pourcentage de précipitation interne (T), d'écoulement le long des tiges (S) et d'interception brute (I) pour différentes classes de durée de pluie (D).

D (heures)	Nombre d'événements	T (%)	S (%)	I (%)
D < 1.5	23	72	9	19
1.5 < D < 6.5	23	80	10	10
D > 6.5	19	84	8	8

Si les mêmes résultats sont exprimés comme des quantités, le comportement est inversé: pour de petites pluies, peu intenses et de courte durée, la quantité d'eau interceptée est moins importante. Fréquemment ces pluies ne sont pas suffisantes pour combler la capacité de stockage du couvert, et probablement, une certaine partie peut même aussi s'évaporer durant l'événement, alors que les pluies fortes et prolongées peuvent atteindre même les parties les plus protégées du feuillage. Des comportements similaires ont été obtenus par Jackson 1978, Schulze *et al* 1978 et Delfs 1967.

### Equations prédictives.

Du fait que les mesures de précipitation incidente (Pi) sont fréquemment disponibles, il est possible d'obtenir des relations statistiques pour estimer l'interception. Plusieurs modèles statistiques ont été essayés. Pour les données d'interception, on a trouvé que le modèle semi-logarithmique était le mieux ajusté à celles-ci ( $r^2=0,89$ ). Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres chercheurs (Jackson 1975, Schulze *et al* 1978). Cependant, ce modèle a le désavantage que

l'interception estimée est égale à zéro pour une précipitation incidente de 1 mm, et en dessous de celle-ci, l'interception estimée est négative, ce qui met en évidence une limitation importante de ce type d'ajustement. Les pertes brutes par interception ont aussi souvent été exprimées comme une régression linéaire en fonction de la pluie incidente (Blake 1975, Rutter 1975):

$$I = aP_i + b \quad (3.3)$$

Dans la figure 34, l'interception pour chacun des 65 événements considérés dans l'étude a été représentée en fonction de la précipitation incidente. La meilleure droite de régression correspond à une pente  $a = 0,0625$  et une ordonnée à l'origine  $b = 0,249$  ( $r^2 = 0,81$ ).

Dans la figure 35, la précipitation nette ( $P_n$ ) a été représentée en fonction de la précipitation incidente ( $P_i$ ). La capacité de stockage du couvert ( $C$ ) a été estimée par la méthode proposée par Leyton *et al* (1967).  $C$  est considéré comme l'ordonnée du point d'intersection entre l'axe des ordonnées et la droite de régression, de pente égale à 1, qui exprime  $P_n$  en fonction de  $P_i$ . Pour que cette méthode soit valable, les averses doivent être grandes pour pouvoir humidifier complètement le couvert (Rutter 1975). Ainsi, seules les valeurs de  $P_i$  supérieures à 15 mm ont été prises en compte. Pour ces valeurs, une droite de régression a été tracée, parallèle à la bissectrice, et  $C$  a été déterminé comme l'intersection avec l'axe  $y$ . (puisque d'après les équations 3.1 et 3.2 on a  $P_n = P_i - C$  en négligeant les termes  $E$  et  $A$ ). On a trouvé que  $C = 1,9$  mm. En calculant  $C$  comme la valeur moyenne de  $P_i - P_n$  pour  $P_i > 15$  mm, on trouve que  $C = 1,83$  mm, avec un écart type de 0,45 mm. Les deux résultats sont similaires et on peut penser que la valeur réelle se situe autour de 1,9 mm. Cette valeur est un peu plus élevée que les valeurs généralement obtenues pour les forêts de conifères en climats tempérés: Rutter (1975) a trouvé 1,6 pour une forêt de *Pinus silvestris* et Leyton *et al* (1967) 1,5 mm pour une forêt de *Picea abies*.

## Conclusions

Le couvert de bananier plantain influe sur la distribution de la pluie incidente au sol. Ainsi la précipitation interne représente en moyenne 78% de la précipitation incidente et l'écoulement par les tiges 9%, ce qui signifie que les pertes par interception brute ont été de 13%.

La capacité de stockage du couvert (définie comme la quantité d'eau retenue par le couvert à la fin d'une pluie, quand il a été complètement saturé) a été déterminée en utilisant deux méthodes différentes et est proche de 1,9 mm.

L'interception a été moins importante pour les petites pluies, courtes et de faible intensité.

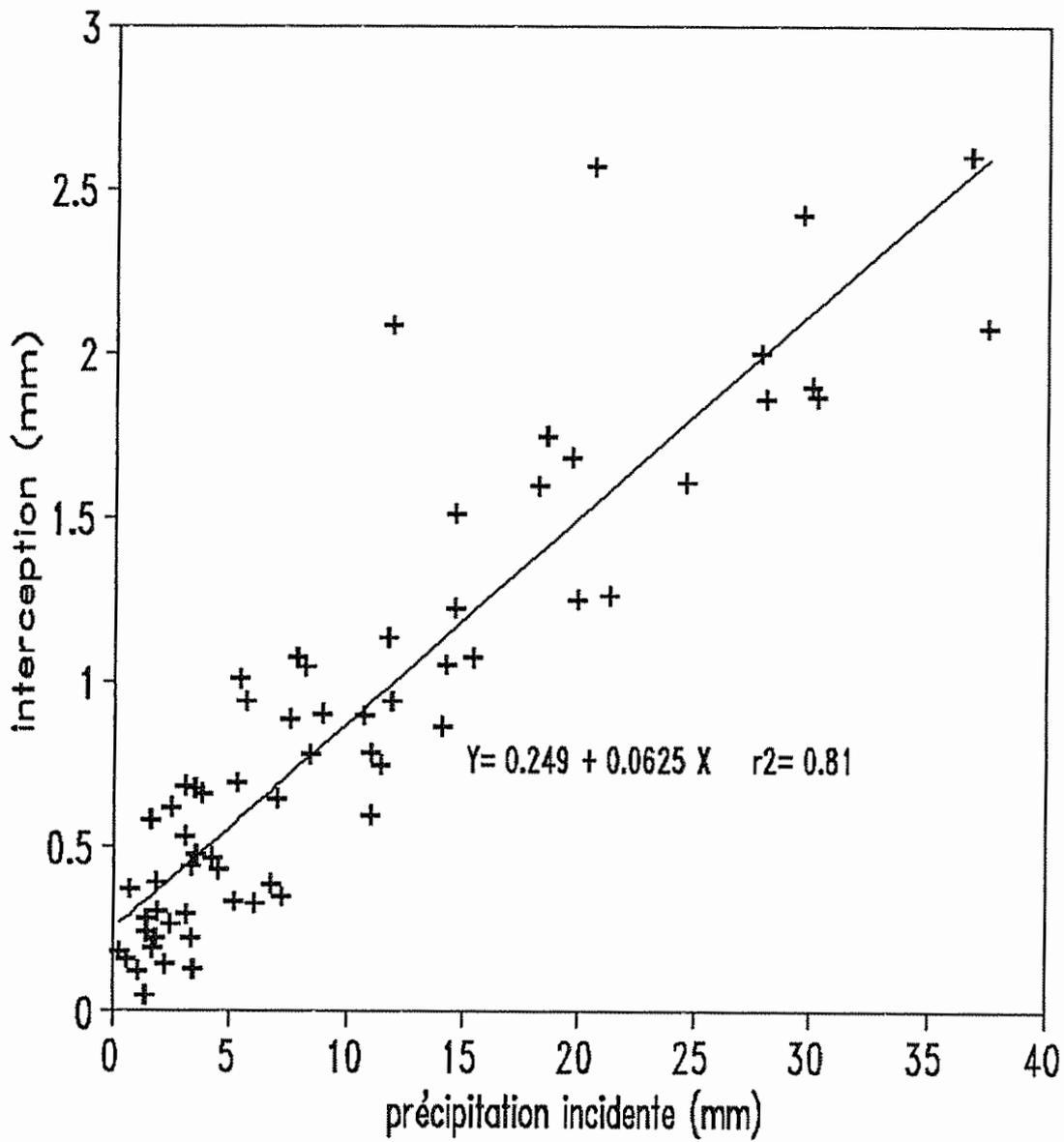


Figure 34. Pertes brutes par interception en fonction de la pluie incidente pour les 65 événements considérés (Turrialba 1988-1989).

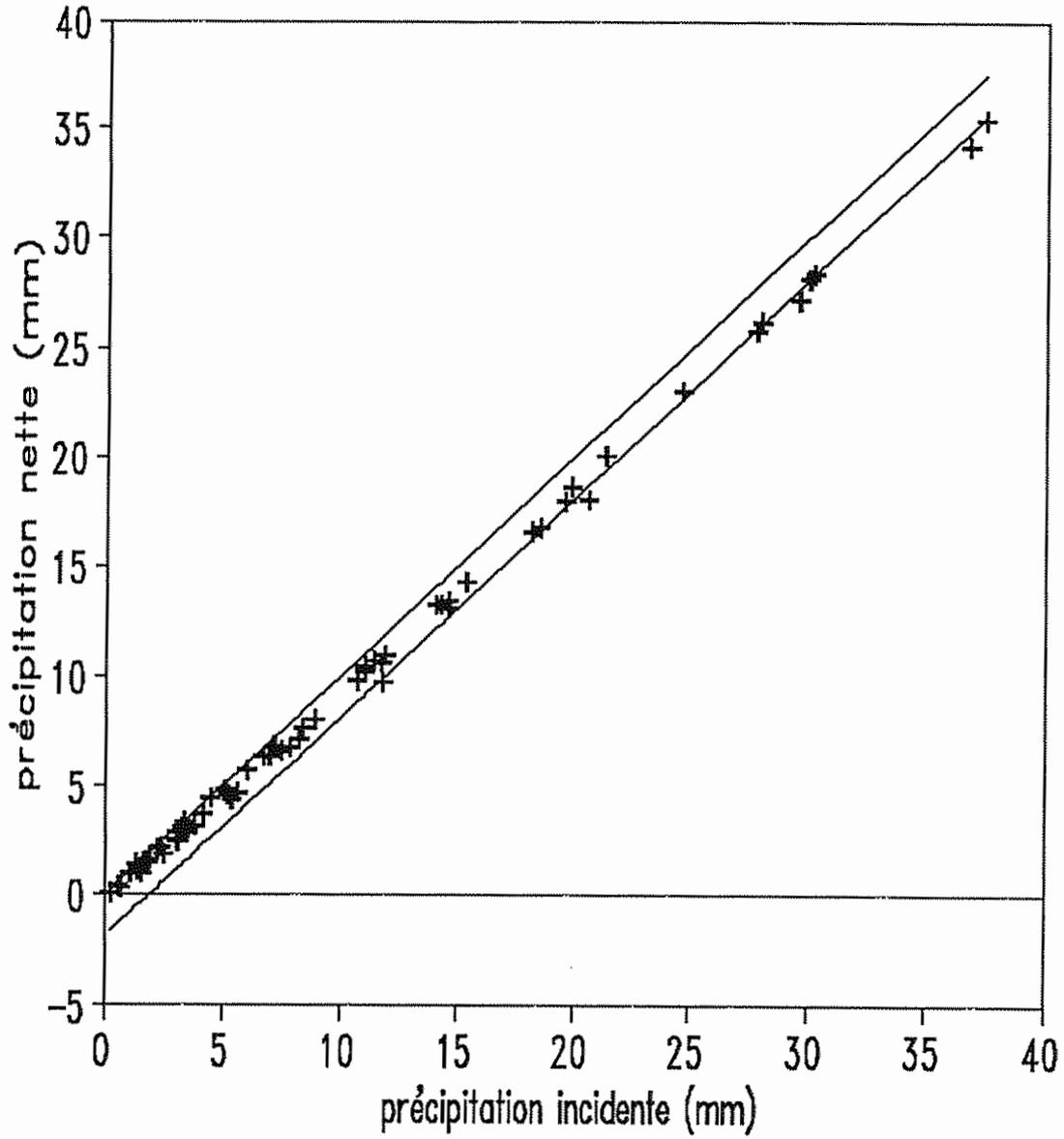


Figure 35. Précipitation nette en fonction de la pluie incidente avec les droites  $y=x$  et  $y=x-1.9$  utilisées pour déterminer la capacité de stockage d'eau du couvert.

### 3.5 Estimation de la durée d'humectation par la pluie.

Dans les pays en voie de développement, il est difficile de disposer de l'instrumentation pour déterminer la durée d'humectation, en plus du fait qu'il n'existe pas de système standard de mesure. Par conséquent, la recherche et la validation de méthodes simples qui permettent une estimation acceptable de la durée d'humectation, se révèle d'une grande importance.

Pour les climats tropicaux, le début des pluies a lieu de manière prédominante durant les heures de l'après-midi. De plus, les petites pluies (moins de 1 mm) sont peu fréquentes. Ceci implique que, durant la majeure partie des jours avec pluie, le feuillage des plantes reste mouillé depuis peu de temps après le début des pluies jusqu'aux premières heures de la matinée suivante.

Par exemple, dans la région tropicale humide de Turrialba (Costa Rica), près de 81% des pluies débutent entre 12 heures et 06 heures de jour suivant (figure 36), avec une fréquence maximale comprise entre 15 et 21 heures. De plus près de 80% des pluies sont supérieures à 1 mm, ce qui permet, que dans la plupart des cas, la capacité d'interception de l'eau par le couvert végétal est dépassée.

Du fait du comportement mentionné auparavant, pour les climats tropicaux, la durée d'humectation due aux pluies, est généralement reliée de manière linéaire à leur heure de début. Une étude a été réalisée à Turrialba, Costa Rica, dans laquelle on a relié la durée d'humectation déterminée au moyen de capteurs Campbell (modèle 237) à l'heure de début de la pluie déterminée à partir de pluviomètres enregistreurs. Les instruments ont été placés dans une station météorologique. Le capteur d'humectation a été placé à une inclinaison de 10 degrés avec l'axe horizontal.

Les résultats obtenus (figure 37) montrent qu'il existe une relation linéaire entre les deux variables, ce qui permet de faire des estimations acceptables de la durée d'humectation par les pluies, à partir de leur heure de début. Bien qu'on ne considère pas les pluies survenues entre 6 et 11 heures, dans la période où ont été réalisées les mesures (janvier à juin 1993), les événements qui ont eu lieu durant ces heures ont été principalement des pluies intermittentes associées à des troubles atmosphériques régionaux, qui ont maintenu mouillés continuellement les capteurs. Cette condition est typique du climat de la région atlantique d'Amérique Centrale.

Cette méthodologie a été aussi appliquée directement à l'estimation de la durée d'humectation sur la feuille cigare de bananier plantain, en obtenant un comportement similaire. De plus, la durée de rosée a aussi été reliée à l'heure de début de la rosée (figure 38). D'autres auteurs (Guzmán et Gómez 1987, Rudgard et Butler 1987) ont utilisé ce système pour estimer la durée d'humectation sur les feuilles de café et sur les cabosses de cacao, respectivement.

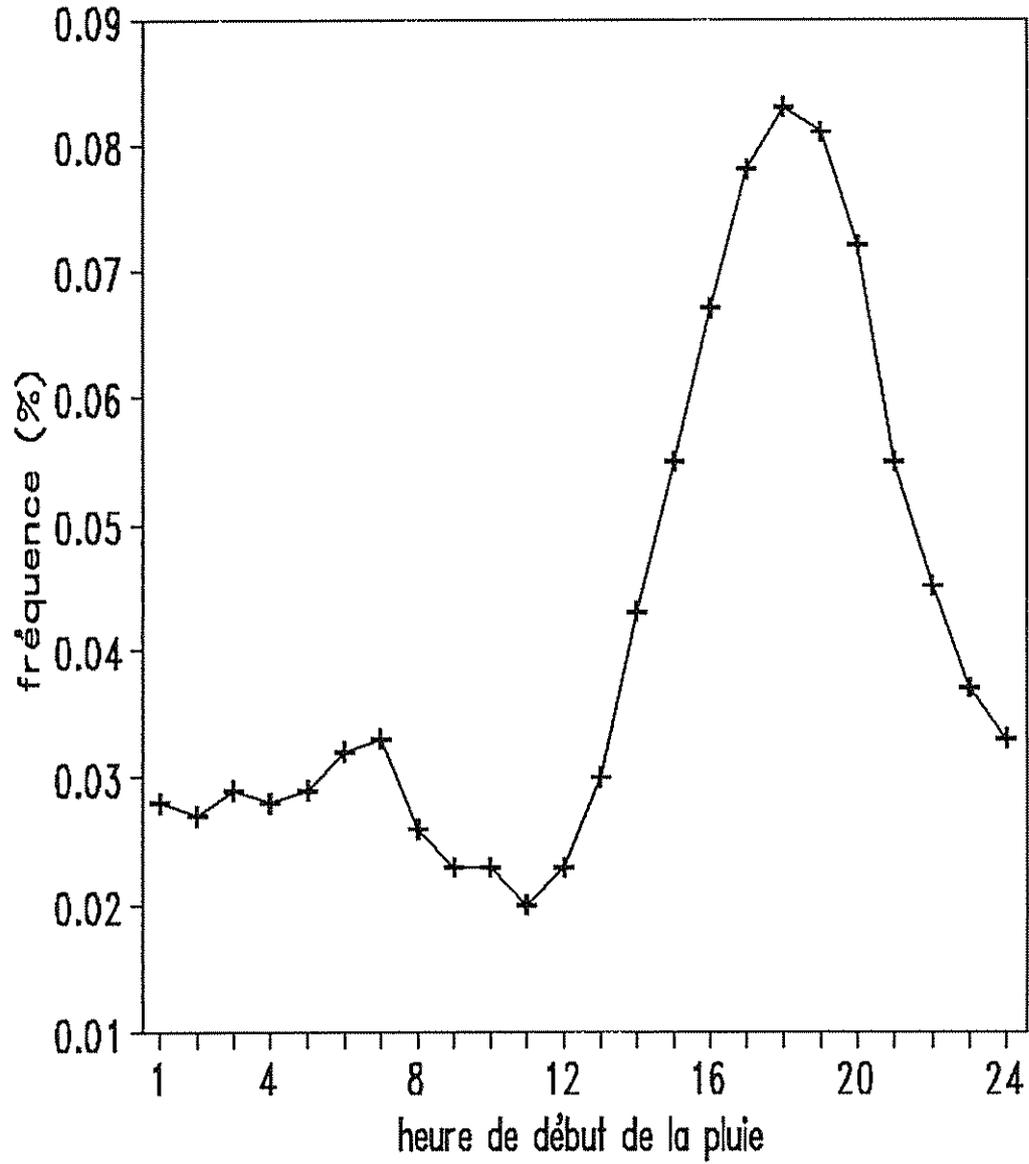


Figure 36. Distribution de l'heure moyenne de début de la pluie à Turrialba, Costa Rica.

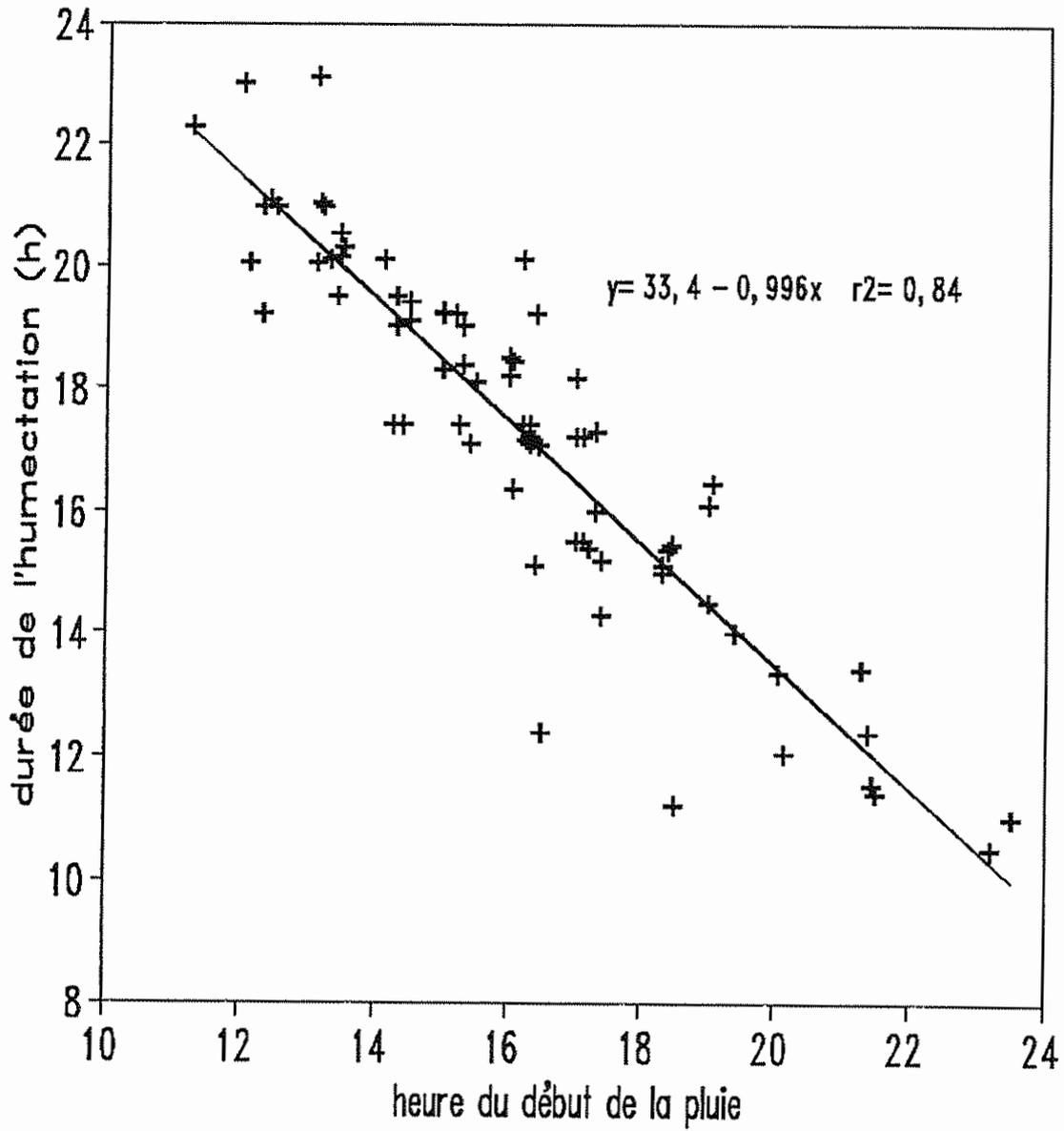


Figure 37. Relation entre l'heure de début de la pluie et la durée d'humectation. Turrialba, Costa Rica, 1993.

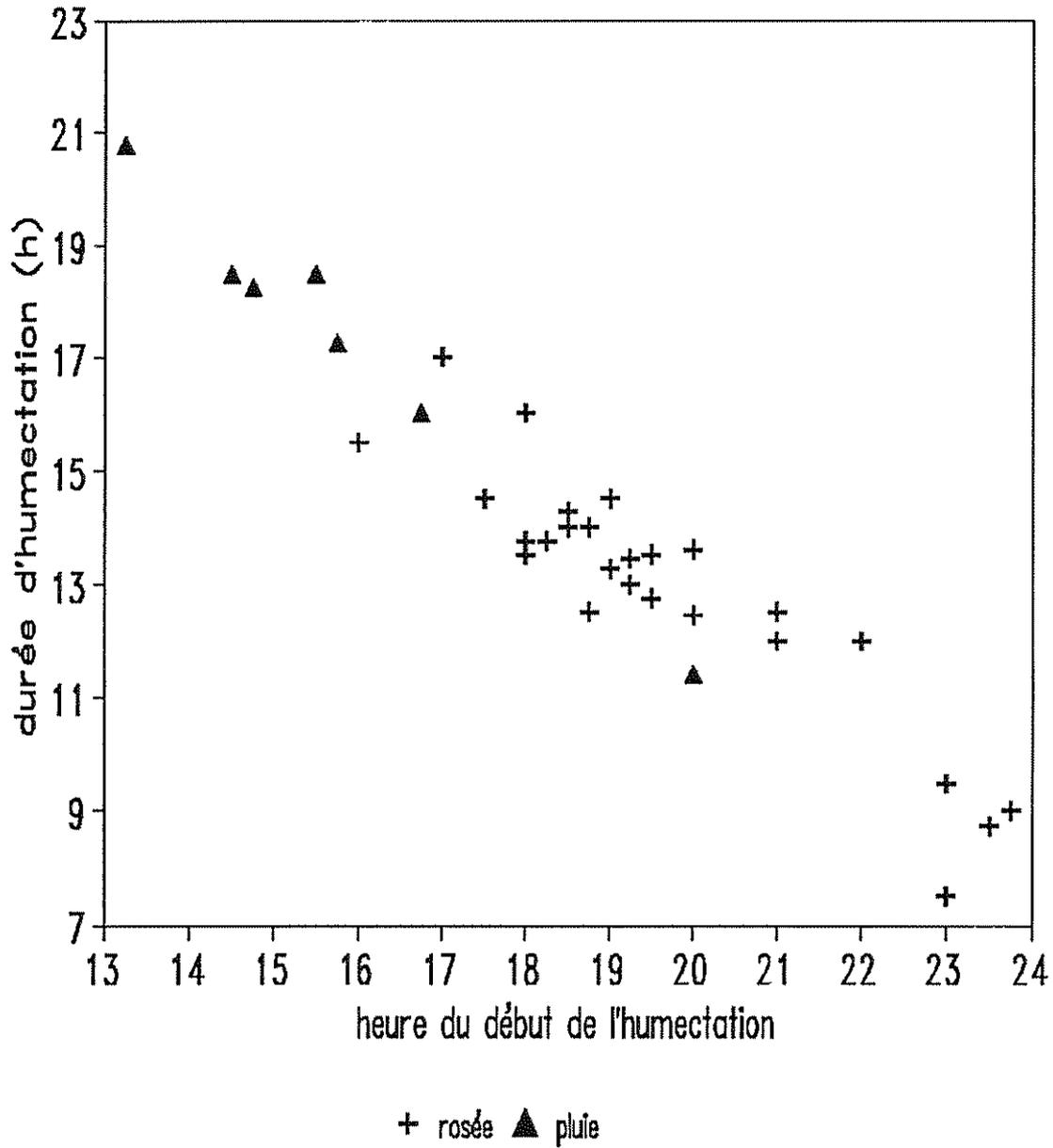


Figure 38. Relation entre l'heure de début et la durée de la période d'humectation (rosée ou pluie) sur la première feuille du bananier plantain. Turrialba, Costa Rica, 1993.

## **CHAPITRE 4**

# **APPLICATION A L'EPIDEMIOLOGIE DE LA SIGATOKA NOIRE ET A LA LUTTE RAISONNEE**

## CHAPITRE 4

### APPLICATION A L'EPIDEMIOLOGIE DE LA SIGATOKA NOIRE ET A LA LUTTE RAISONNEE

#### 4.1 Introduction

Une partie importante de l'Agrométéorologie consiste à trouver et proposer des méthodes qui peuvent aider à la planification et à la prise de décisions dans les activités agricoles. En suivant cet objectif on présente dans ce chapitre deux types d'applications des concepts définis précédemment.

Dans un premier temps, le modèle ROCIO est utilisé conjointement avec des données expérimentales obtenues en conditions contrôlées sur la relation entre sévérité de la Sigatoka noire et conditions microclimatiques. Le but est de caractériser le risque de maladie dans une région où la distribution annuelle de la pluie limite l'exploitation commerciale du bananier plantain mais qui a une importante infrastructure pour le développement de cultures irriguées.

Dans un deuxième temps, on présente un système biométéorologique d'avertissement destiné à rationaliser la lutte chimique contre la Sigatoka noire du bananier plantain. Il permet de prévoir le moment le plus opportun pour effectuer les applications de produits fongicides.

#### 4.2 Application du modèle ROCIO: utilisation de relations expérimentales entre sévérité de la maladie et microclimat obtenues en conditions contrôlées.

Jacome et Schuh (1992) ont étudié en conditions de laboratoire la sévérité de la Sigatoka noire en fonction de la température et de la durée de rosée.

Des plantes de bananier cultivar "Grand Naine" (*Musa AAA*) obtenues par culture de tissus ont été utilisées comme hôte. Au moment des expériences, les plantes avaient six feuilles déroulées. Une surface de 84 cm<sup>2</sup> sur chacune des quatre plus jeunes feuilles déroulées a été inoculée en aspergeant 1 ml de suspension conidienne (10<sup>3</sup> conidies/ml) de deux isolats de *M. fijiensis*, provenant du Honduras. Après séchage des feuilles inoculées pendant 30 à 45 minutes, celles-ci ont été soumises aux traitements de durée d'humectation suivant: 0, 9, ou 18 heures dans une chambre de rosée à une température de 26 °C.

Après cette période d'humectation initiale, les plantes ont été réparties entre quatre chambres de croissance à 22, 25, 28, ou 31 °C, avec une humidité relative supérieure ou égale à 94% et une photopériode de 12 heures. La maladie a été évaluée 10 semaines plus tard au moyen de la sévérité, définie comme le pourcentage de la surface inoculée couvert par des lésions de S. noire. La sévérité la plus haute obtenue a été 30%.

Nous avons utilisé les résultats présentés par Jacome et Schuh (1992) et la procédure GLM (General Linear Models) de SAS (Statistical Analysis Systems) pour développer les modèles suivants qui relient la sévérité de la maladie Y (exprimée en pourcentage) à la température T (°C) et à la durée de rosée DR (heures):

$$\text{Isolat 1: } Y = b_0 + b_1T - b_2DR + b_3TDR - b_4T^2 - b_5T^2DR \quad (4.1)$$

$$b_0 = -222.6 \quad b_1 = 17.25012 \quad b_2 = -32.148484 \quad b_3 = 2.53841$$

$$b_4 = 0.32199 \quad b_5 = 0.048441.$$

$$\text{Isolat 2: } Y = b_1T - b_2DR + b_3TDR - b_4T^2DR \quad (4.2)$$

$$b_1 = 0.15728 \quad b_2 = -27.05516 \quad b_3 = 2.11687 \quad b_4 = 0.040197$$

Pour les deux équations le coefficient de régression ( $r^2$ ) est 0.93. Les tableaux 17 et 18 présentent les données de sévérité de la maladie simulées par les équations 4.1 et 4.2 comparées aux données de Jacome et Schuh.

Tableau 17. Comparaison entre les sévérités observées (O) par Jacome et Schuh en conditions contrôlées et les sévérités estimées (E) par l'équation 4.1 (isolat 1). Sévérités exprimées en pourcentage.

Température (°C)	Durée de rosée (heures)					
	0		9		18	
	O	E	O	E	O	E
22	2.8	3.5	3.1	4.0	3.5	4.6
25	4.7	3.9	11.8	10.6	21.1	17.3
28	6.0	4.4	12.9	10.7	11.5	15.0
31	2.3	4.9	3.8	4.8	5.5	3.8

Tableau 18. Comparaison entre les sévérités observées (O) par Jacome et Schuh en conditions contrôlées et les sévérités estimées (E) par l'équation 4.2 (isolat 2). Sévérités exprimées en pourcentage.

Température (°C)	Durée de rosée (heures)					
	0		9		18	
	O	E	O	E	O	E
22	1.7	1.1	4.0	3.3	4.9	5.6
25	7.4	7.4	10.9	16.7	30.0	26.0
28	11.5	8.0	15.2	16.5	24.7	25.0
31	1.9	2.7	2.4	2.6	3.0	2.5

La démarche utilisée consiste à combiner le modèle ROCIO d'estimation de durée de rosée présenté dans le chapitre 2 et les modèles d'estimation de la sévérité de S. noire (équations 4.1 et 4.2) afin de caractériser le risque de la maladie dans les régions avec au moins une période sèche prolongée, c'est-à-dire avec un risque relativement faible. Ceci revêt une importance particulière à l'heure actuelle, où on cherche des zones de culture moins favorables au développement des maladies, principalement de la Sigatoka noire.

Dans le but d'apprécier le comportement possible de la maladie, on a choisi en guise d'exemple la zone du Guanacaste, au Costa Rica. C'est une région aux conditions climatiques homogènes et avec une importante infrastructure pour le développement de cultures irriguées. Pour cette étude, on a pris comme référence les données météorologiques de la station de Liberia, située à l'intérieur de la zone d'irrigation mentionnée. Le climat de la région est caractérisé par une saison sèche de cinq mois qui intervient de décembre à avril et durant laquelle ne tombe seulement que 3% du total de la pluie de la zone, qui est de 1700 mm par an. La saison des pluies a lieu entre mai et novembre avec une précipitation moyenne de 235 mm par mois.

On a sélectionné les mois de mars et d'octobre comme périodes typiques respectivement de la saison sèche et de la saison des pluies (tableau 19). Dans les 5 dernières années, on a choisi 6 jours de chaque mois, à intervalles de 5 jours, obtenant au total 30 jours sur lesquels on a simulé la sévérité de la maladie. Comme valeur de température, on a choisi les moyennes décadaires les plus basses et les plus hautes obtenues respectivement dans la période sèche (15 décembre au 15 mai) et pendant la période pluvieuse (15 mai au 15 décembre) de 20 années d'observation.

Tableau 19. Conditions climatiques durant les mois de mars et d'octobre à Liberia, Costa Rica.

Paramètre climatique	Mars	Octobre
Précipitation (mm)	5.0	312.0
Température moyenne (°C)	28.5	26.6
Moyenne des maxima (°C)	34.4	31.0
Moyenne des minima (°C)	21.6	22.0
Humidité relative moyenne (%)	65.0	87.0
Vitesse de vent (m/s)	5.0	2.3
Insolation (heures)	9.6	5.5
Rayonnement solaire (MJ/m <sup>2</sup> )	22.5	16.0

Les données du tableau 20 montrent la sévérité simulée de la maladie pour la période sèche. D'après ces résultats, les conditions météorologiques sont très défavorables au développement de la Sigatoka noire dans cette région. Il se produit une formation de rosée pour, approximativement, seulement 43% des jours, et la durée de celle-ci, est en moyenne d'un peu plus de 2 heures. Il apparaît que durant la période sèche, il serait possible de contrôler la plantation, sans nécessité d'aucun traitement chimique et cela permettrait de réduire le niveau d'inoculum à des valeurs très basses, de manière à ce que, au début de l'époque des pluies, le développement de la maladie ne soit pas explosif.

On doit rappeler que les données que présentent Jacome et Schuh correspondent à la sévérité de la maladie causée par des conidies, que n'ont pas besoin d'eau libre sur la feuille pour germer alors que c'est le cas pour les ascospores. Cela permet de supposer que la sévérité de la maladie développée à partir des ascospores serait plus faible que celle qui a été estimée.

Le tableau 21 présente les résultats obtenus pour la période humide. La durée de rosée varie entre 0 et 16 heures avec une moyenne de presque 10 heures. Bien que cette condition paraisse moins favorable à la maladie que celle qui se présente généralement dans les régions qui sont humides toute l'année, elle ne paraît pas être très limitante pour son développement. Par ailleurs, il ne faut pas oublier la forte contribution des pluies à la durée d'humectation totale dans cette période et aussi que les conditions de température sont plus proches des besoins optimaux du champignon, que celles qui se produisent dans les zones de culture traditionnelle. Les résultats montrent aussi qu'il y a des différences importantes de sévérité suivant les isolats du champignon.

Les données simulées suggèrent que durant la période pluvieuse, les conditions météorologiques sont assez favorables au développement de la maladie. Cependant, en considérant la période annuelle, il paraît évident que les coûts de combat de la Sigatoka noire seraient beaucoup moins importants dans ces conditions climatiques.

Une limitation importante dans cette analyse est constituée par le type même du modèle utilisé, non seulement parce qu'il a été obtenu sous des conditions contrôlées, mais parce que il ne permet pas de simuler les variations diurnes et nocturnes des conditions météorologiques. Malgré ces considérations, la méthode permet d'évaluer à priori, le comportement possible de la maladie dans une région où la culture commerciale de Musacées comestibles est inconnue.

Tableau 20. Sévérité estimée de la Sigatoka noire pendant la période sèche. Liberia, Costa Rica.

Obs.	Rosée			Sévérité estimée (%) de la maladie			
	Début	Fin	Durée (heures)	T <sub>1</sub> = 26.1 °C		T <sub>2</sub> = 30.0 °C	
				Is 1	Is 2	Is 1	Is 2
1	5.30	6.30	1	9.4	4.9	5.5	5.0
2	0.30	7.30	7	16.0	9.8	8.0	6.6
3	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
4	4.30	7.30	3	11.6	6.5	6.3	5.5
5	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
6	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
7	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
8	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
9	4.30	5.30	1	9.4	4.9	5.5	5.0
10	3.30	7.30	4	12.7	7.3	6.7	5.8
11	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
12	4.30	5.30	1	9.4	4.9	5.5	5.0
13	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
14	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
15	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
16	4.30	6.30	2	10.5	5.7	5.9	5.3
17	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
18	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
19	6.30	7.30	1	9.4	4.9	5.5	5.0
20	4.30	7.30	3	11.6	6.5	6.3	5.5
21	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
22	5.30	6.30	1	9.4	4.9	5.5	5.0
23	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
24	3.30	6.30	3	11.6	6.5	6.5	6.3
25	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
26	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
27	5.30	6.30	1	9.4	4.9	5.5	5.0
28	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7
29	4.30	6.30	2	10.5	5.7	5.9	5.3
30	-	-	0	8.2	4.1	5.1	4.7

Is= isolat

T1, T2= température moyenne décadaire la plus basse et la plus haute pendant la saison sèche.

Tableau 21. Sévérité estimée de la Sigatoka noire pendant la période humide. Liberia, Costa Rica.

Obs.	Rosée			Sévérité estimée (%) de la maladie			
	Début	Fin	Durée (heures)	T <sub>1</sub> = 26.4 °C		T <sub>2</sub> = 28.0 °C	
				Is 1	Is 2	Is 1	Is 2
1	19.30	7.30	12	21.6	13.9	19.3	12.8
2	18.30	7.30	13	22.7	14.7	20.3	13.5
3	21.30	7.30	10	19.4	12.3	17.4	11.4
4	18.30	8.30	14	23.8	15.6	21.2	14.2
5	19.30	7.30	12	21.6	13.9	19.3	12.8
6	22.30	7.30	9	18.3	11.5	16.5	10.7
7	20.30	7.30	11	20.5	13.1	18.4	12.1
8	19.30	8.30	13	22.7	14.7	20.3	13.5
9	23.30	7.30	8	17.2	10.7	15.5	10.0
10	23.30	7.30	8	17.2	10.7	15.5	10.0
11	18.30	8.30	15	24.8	16.4	22.2	14.9
12	19.30	9.30	15	24.9	16.4	22.2	14.9
13	3.30	6.30	3	11.7	6.6	10.8	6.5
14	-	-	0	8.4	4.2	8.0	4.4
15	0.30	7.30	7	16.1	9.9	14.6	9.3
16	2.30	7.30	5	13.9	8.2	12.7	7.9
17	23.30	7.30	8	17.2	10.7	15.5	10.0
18	22.30	8.30	10	19.4	12.3	17.4	11.4
19	6.30	7.30	1	9.5	5.0	8.9	5.1
20	3.30	7.30	4	12.8	7.4	11.8	7.2
21	18.30	9.30	15	24.9	16.4	22.2	14.9
22	2.30	7.30	5	13.9	8.2	12.7	7.9
23	0.30	7.30	7	16.1	9.9	14.6	9.3
24	18.30	9.30	15	24.9	16.4	22.2	14.9
25	18.30	8.30	14	23.8	15.6	21.2	14.2
26	21.30	7.30	10	19.4	12.3	17.4	11.4
27	21.30	8.30	11	20.5	13.1	18.4	12.1
28	22.30	7.30	9	18.3	11.5	16.5	10.7
29	2.30	7.30	5	13.9	8.2	12.7	7.9
30	17.30	9.30	16	26.0	17.1	23.1	15.6

Is= isolat

T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>= température moyenne décadaire la plus basse et la plus haute pendant la saison humide.

### **4.3 Un système d'avertissement biométéorologique de la Sigatoka noire du bananier plantain.**

Article accepté par la revue FRUITS: Jiménez, F. *et al.* 1994.

Relation between rainfall duration and development of black sigatoka on plantain leaves. Proposal for a biometeorological prediction system for fungicide application.

#### **4.3.1 Introduction.**

La Sigatoka noire est un important facteur limitant de la production de bananier plantain dans la plupart des régions productrices du Costa Rica et de la majeure partie des pays latino-américains. (Fouré et Moreau 1992, Marin et Romero 1992). Le développement de méthodes de lutte efficaces est nécessaire pour maintenir la production.

Pour la maladie de la Sigatoka jaune, causée par le *Mycosphaerella musicola*, maint efforts ont été réalisés pour élaborer des systèmes d'avertissement (Guyot et Cuillé 1958, Killein 1960, Ganry et Meyer 1972). Ganry et Meyer (1972) ont développé un système de prévision pour la Sigatoka jaune, basé sur deux composantes: l'une biologique et l'autre météorologique. La composante biologique (préavis biologique) correspond à la prise en compte de l'évolution de la maladie et certains paramètres phénologiques de l'hôte (stade de développement de la feuille cigare et rythme d'émission foliaire). La composante météorologique (préavis climatique) inclut les variables suivantes: température de l'air et évaporation du piche. Le préavis climatique est utilisé pour le moment, seulement en Guadeloupe pour la lutte contre la Sigatoka jaune.

Le préavis biologique a été modifié pour l'adapter au cas de la Sigatoka noire, tant pour le bananier plantain que pour le bananier (Fouré 1988, Bureau 1990). Le système de préavis biologique est efficace, mais très complexe pour l'utilisation par des petits producteurs de bananier plantain. Ceci justifie la nécessité d'élaborer un système plus simple.

L'objectif de cette recherche était de relier le développement de la Sigatoka noire sur le bananier plantain à une (ou plusieurs) variable(s) météorologique(s), dans le but d'élaborer un système biométéorologique simple de prévision du développement de la maladie qui permette de définir de manière opportune le moment d'effectuer les traitements chimiques.

#### **4.3.2 Matériels et méthodes**

##### **4.3.2.1 Sites expérimentaux et conditions culturales.**

L'étude des relations entre les variables météorologiques et le développement de la maladie est fondée sur des expérimentations effectuées dans trois parcelles de bananier plantain *Musa* AAB type faux corne cv. 'curraré'. Située sur deux sites de la région atlantique du Costa Rica (La Lola et CATIE). Ces parcelles ont une superficie d'approximativement un hectare chacune et présentent une topographie plane. Sur le site de La Lola, deux parcelles ont servi aux expérimentations de janvier à avril 1990 et de juillet à décembre 1991. Sur le domaine du CATIE, une parcelle a servi

aux expérimentations de juin à décembre 1991. Le système d'avertissement élaboré a été testé ensuite en conditions réelles d'exploitation dans une plantation de deux hectares appartenant à un agriculteur à Santa Teresita de Turrialba, entre novembre 1992 et août 1993. Pour ce site, distant de 10 km du CATIE, il n'existe pas d'enregistrements climatiques spécifiques, mais le site appartient au même topoclimat que le domaine du CATIE.

Le contrôle agronomique des parcelles expérimentales a été réalisé conformément aux pratiques recommandées dans chaque zone. Chaque parcelle a été divisée en deux parties; l'une a été traitée avec des fongicides suivant le système de préavis biologique, tandis que l'autre n'a pas reçu de traitement fongicide. Sur le site La Lola, il y a eu deux répétitions qui ont été moyennées. Les décisions sur le moment d'effectuer les traitements fongicides dans les parcelles traitées, et sur les produits à utiliser ont été prises par le personnel de la section de phytopathologie du CATIE qui avait en charge la lutte contre la maladie au moyen du préavis biologique. Les fongicides utilisés dans les parcelles traitées ont été le propiconazole triazol (tilt), le benomil (benlate), le tridemorf (calixin), le pirazofos (Siganex) et un mélange de biternol (baycor) et de triadimefon (bayleton). Dans la plantation de l'agriculteur utilisée pour tester le système, on a respecté l'itinéraire technique habituellement utilisé par celui-ci.

#### 4.3.2.2 Brève description du système de préavis biologique

Le système de préavis biologique est utilisé avec succès dans différents pays, raison pour laquelle il a été utilisé dans cette étude comme point de comparaison des résultats obtenus avec le système d'avertissement biométéorologique proposé. On commence par présenter un résumé de ce système de référence (Marín y Romero 1992, Bureau *et al* 1992).

La méthode de préavis biologique est basée sur la quantification de la variation de l'état d'évolution (EE) ou vitesse de développement de la maladie dans le feuillage de la plantation.

Après quelques modifications, le système consiste, actuellement, à choisir au niveau du champ ou de la parcelle, 10 plantes représentatives (âge, vigueur, état sanitaire, etc.) de la population. Les observations se réalisent toujours sur les mêmes plantes dès lors qu'elles ont cinq ou six vraies feuilles et jusqu'à l'émission de l'inflorescence.

On effectue sur ces 10 plantes des observations hebdomadaires, du niveau d'infection par la Sigatoka noire sur les feuilles deux, trois et quatre (figure 39a); on détermine l'état de développement du cigare sur une échelle comportant cinq niveaux (0-2-4-6-8) (figure 39b) et on calcule le rythme d'émission foliaire.

Pour déterminer le niveau d'infection, on identifie sur le tiers apical des feuilles, l'état le plus avancé des symptômes. Pour cela, on utilise une échelle de six niveaux de symptômes, chacun divisé en deux sous-niveaux (+ et -), qui correspondent à la densité de l'attaque, de manière à ce que, s'il y a plus de 50 lésions du symptôme le plus développé, le sous-niveau se note + et s'il y a moins de 50 lésions, le sous-niveau se note -.

Chacun des (6x2) niveaux de symptômes est pondéré par des coefficients de sévérité, suivant le numéro de la feuille qui est évaluée. Les valeurs de ces

coefficients traduisent le fait que, pour un niveau de symptômes donné, l'infection d'une feuille a une conséquence d'autant plus forte sur la maladie que la feuille considérée est plus jeune. En présence des niveaux de symptômes le plus bas (1-), les coefficients sont 20, 40 et 60 pour la quatrième, troisième et deuxième feuille. A partir de cette valeur, on augmente de 20 unités pour chaque niveau de symptômes. Ainsi, pour 10 feuilles, un niveau de symptômes de différence (pour la feuille 2, 3 ou 4) représente une augmentation de 200 unités de la somme brute. (tableau 22)

Tableau 22. Coefficients de sévérité de Sigatoka noire suivant le système de préavis biologique.

Niveau du symptôme	Feuille		
	II	III	IV
1-	60	40	20
1+	80	60	40
2-	100	80	60
2+	120	100	80
3-	140	120	100
3+	160	140	120
4-		160	140
4+			160

L'addition de la somme brute (SB) des feuilles deux, trois et quatre corrigée par l'état de développement du cigare (CE) et par le rythme d'émission foliaire (REFi), permet d'obtenir finalement l'état d'évolution de la maladie (EE) (tableau 23):

$$EE = (SB - CE) \times REF_i$$

$$\text{où: } CE = 2 \sum CC \quad \text{et} \quad REF_i = [(\sum REF / 7) + REF_m] / 2$$

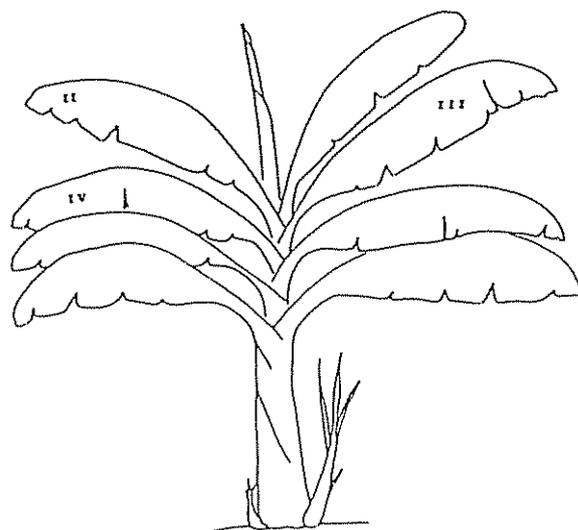
$CC = SDC \times NFS$  où SDC est le stade de développement du cigare et NFS est le nombre de feuilles avec symptômes.

$REF = EFP - EFA$  où REF est le rythme d'émission foliaire, EFP est l'émission foliaire présente et EFA est l'émission foliaire antérieure.

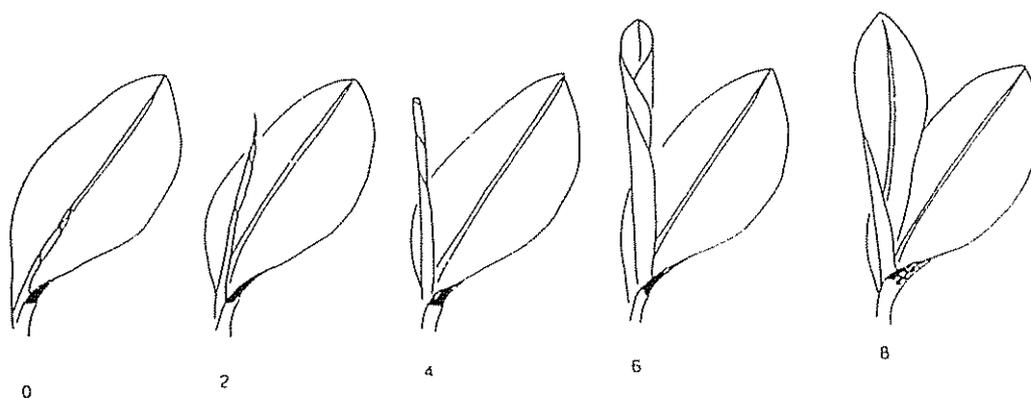
REF<sub>m</sub> est le rythme d'émission foliaire moyenne cumulé durant la période d'évaluation.

Le facteur le plus important qui permet de prendre la décision d'application est la courbe d'évolution hebdomadaire de la maladie. Il n'existe pas, en principe, un seuil critique d'état d'évolution. Seule l'expérience pourra déterminer quels seuils considérer et comment les définir pour les différents sites. Généralement la règle retenue est une décision d'application dès lors que l'on observe deux accroissements successifs de la somme brute espacés d'une semaine (cette décision est parfois modifiée par le phytopathologiste responsable du suivi biologique).

Comme on peut le noter, ce système est assez laborieux. Dans la pratique, une des limitations opératoires importantes est la difficulté d'effectuer les observations des symptômes sur les feuilles 2 et 3, du fait de la hauteur des plantes et que ces feuilles sont encore assez dressées.



(a)



(b)

Figure 39. Position des feuilles II, III, et IV (a) et différents stades du cigare (b) utilisés pour l'évaluation de l'état d'évolution de la maladie d'après le système de préavis biologique.

Tableau 23. Exemple de calcul du rythme d'émission foliaire, de la correction du cigare et de la somme brute.

PO	EFA	EFP	REF	CC	Symptômes observés			NS	Feuilles avec symptômes			par coefficients de sévérité		
					II	III	IV		II	III	IV	II	III	IV
1	13.6	14.8	1.2	16		1-	1+	1-	3	9		180	360	
2	12.6	13.6	1.0	12		1-	2-	1+			3			120
3	14.6	15.8	1.2	24	1-	1-	1+	2-		1	7		80	420
4	14.0	15.0	1.0	0		1-	2-	2+						
5	14.8	15.8	1.0	16		1-	2-	3-						
6	13.8	14.4	0.6	12	1-	1-	2-	3+						
7	13.6	14.8	1.2	16		1-	1+	4-						
8	12.4	13.2	0.8	6	1-	2-	2-	4+						
9	12.2	13.2	1.0	4		1-	2-							
10	13.8	14.8	1.0	16		1-	2-							
SOMME			10	122								180	440	540

PO : plante observée  
 EFA: émission foliaire antérieure  
 EFP: émission foliaire présente

REF: rythme d'émission foliaire  
 CC: correction par stade du cigare  
 NS: niveau des symptômes

#### 4.3.2.3 Variables épidémiologiques et météorologiques évaluées.

Les variables épidémiologiques moyennes évaluées sur 10 plantes ont été le numéro de la plus jeune feuille nécrosée, la somme brute des feuilles 2, 3 et 4 (variables issues du préavis biologique et définies précédemment) et l'état d'évolution de la maladie. On définit le niveau d'infection de la feuille n (NIFn) comme la somme des coefficients de sévérité de la maladie attribués aux feuilles d'ordre n (tableau 22). Ces variables ont été évaluées hebdomadairement.

Les informations épidémiologiques dans les parcelles non traitées (La Lola 1990, La Lola 1991 et CATIE 1990) ont été obtenues dans le but de les relier aux variables météorologiques. Par la suite l'information obtenue dans les parcelles traitées a été utilisée pour fixer les seuils de décision et pour comparer les dates d'application effectuées d'après le préavis biologique, avec des dates simulées au moyen du système biométéorologique. Dans l'ensemble de parcelles traitées, on a aussi inclus une parcelle située à Santa Teresita (1992).

Les variables météorologiques mesurées dans les deux sites ont été la température, l'humidité relative et les précipitations. Pour ceci, on a utilisé des hygrothermographe et des pluviomètres Wilh Lambrecht. Dans le cas de La Lola 1991, on a aussi calculé la durée de rosée au moyen du modèle exposé dans le chapitre 2. Toutes ces données météorologiques ont été obtenues avec une périodicité horaire.

A partir de l'information météorologique mentionnée précédemment, on a obtenu les variables suivantes: nombre d'heures avec une humidité relative

supérieure à 90 et à 95 %, nombre d'heures avec des températures comprises entre 23 et 28 °C, quantité et durée des pluies et durée de la rosée.

La durée de la pluie s'obtient à partir des bandes du pluviomètre. Pour chaque jour, on somme le nombre de minutes pendant lesquelles il pleut. Ensuite on somme séparément, la durée journalière depuis le jour 1 au 28 inclus, appelée durée cumulée de la pluie, DCP 1), du 8 au 35 inclus (DCP 2) et du 15 au 42 inclus (DCP 3), des 42 jours (6 semaines) précédant la date à laquelle s'évalue le NIF4. Après la période de 6 semaines, on a besoin de calculer uniquement la valeur DCP 3, du fait que la valeur DCP 1 est celle qu'avait DCP 2 la semaine précédente. De même, la valeur DCP 2 est celle qu'avait DCP 3 la semaine précédente (figure 40).

Parmi les courbes d'évolution temporelle des variables épidémiologiques (numéro de la plus jeune feuille nécrosée, niveau d'infection de la feuille 2, 3 et 4 et état d'évolution de la maladie) il s'avéra que les courbes relatives au niveau d'infection de la feuille 4 (NIF4) présentent une allure similaire à celles donnant la durée de pluie hebdomadaire.

Dans le but de déterminer la période pour laquelle on obtenait une corrélation statistique maximale entre la durée cumulée de la pluie et le niveau d'infection de la feuille 4 (NIF4), on a fait varier d'une part la position de cette période (repéré par rapport à la date d'évaluation du NIF4) et d'autre part la durée de cette même période.

On a procédé en deux étapes successives: dans un premier temps, on a fait varier la position de la durée suivant en calendrier hebdomadaire. Pour l'ensemble des trois expériences (La Lola 1990, La Lola 1991 et CATIE 1990), le couple position-durée qui fournit la meilleure corrélation est la couple 6-4 (la durée cumulée de pluie les quatre premières de six semaines précédant la date d'évaluation du NIF4). Dans un second temps, on a cherché à affiner la recherche de couple position-durée le plus pertinent en fonction du site.

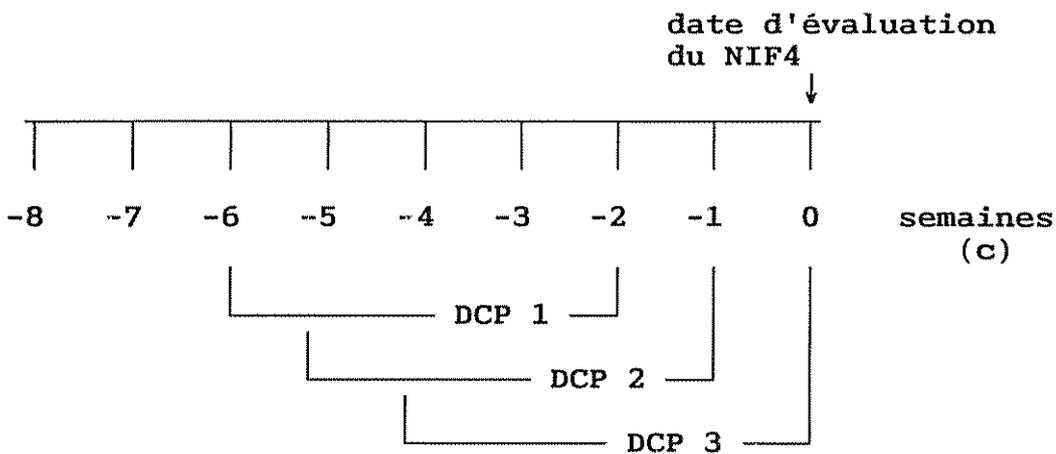
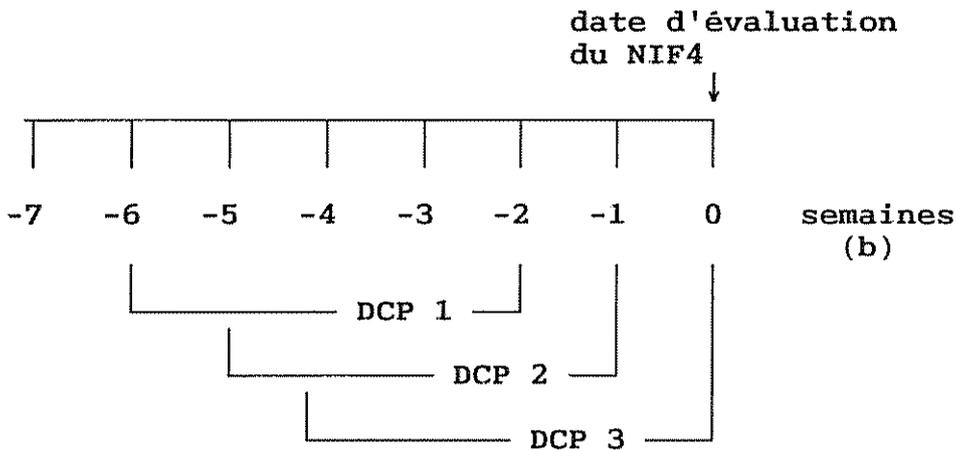
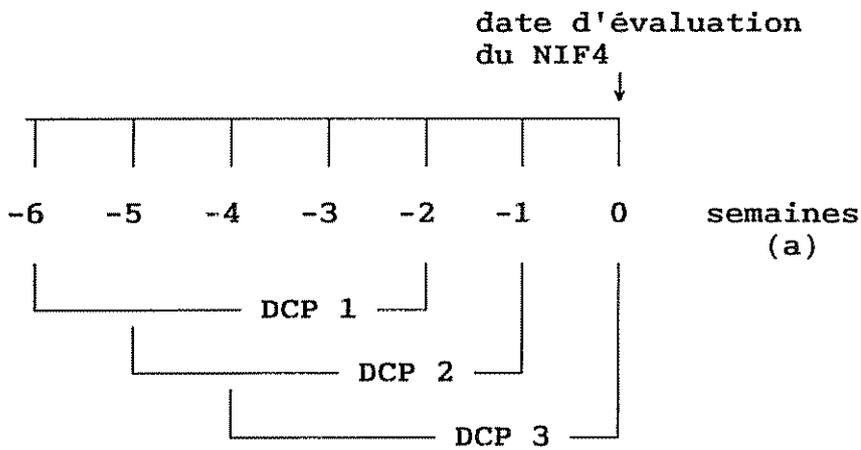


Figure 40. Diagramme pour la détermination de la DCP 1, DCP 2 et DCP 3 dans le système d'avertissement biométéorologique, en commençant par la première (a), la deuxième (b) et la troisième (c) semaine d'opération du système.

#### 4.3.4 Résultats et discussion

Le tableau 24 correspond à l'analyse statistique hebdomadaire des couples position-durée. Les coefficients de régression ( $r^2$ ) les plus élevés ont été obtenus dans tous les cas avec un déplacement de six semaines et en accumulant la DCP pour les quatre premières de celles-ci. Ceux-ci sont de 0.60, 0.68 et 0.50 respectivement pour les données de La Lola 1990, La Lola 1991 et CATIE 1991.

Tableau 24. Coefficients de régression obtenus entre le niveau d'infection de la feuille 4 et la durée cumulée de pluie pour différentes combinaisons de durée et de position de la période de cumul des durées de pluie.

Site	Durée (semaines)	Position (semaines)			
		3	4	5	6
La Lola 1990	3	0.46	0.41	0.43	0.48
	4	-	0.42	0.57	0.60
	5	-	-	0.50	0.53
	6	-	-	-	0.50
La Lola 1991	3	0.47	0.44	0.55	0.52
	4	-	0.61	0.66	0.68
	5	-	-	0.57	0.60
	6	-	-	-	0.50
CATIE 1991	3	0.26	0.37	0.45	0.36
	4	-	0.38	0.42	0.50
	5	-	-	0.49	0.46
	6	-	-	-	0.45

Les tableaux 25, 26 et 27 présente l'étude statistique sur un pas de temps quotidiens en faisant varier le position et la durée de la période considérée autour du couple (6-4) définie préalablement (tableau 24)

Tableau 25. Coefficients de régression obtenus pour différentes combinaisons de position-durée utilisées dans le calcul de la durée de pluie pour le site CATIE, 1991.

Durée (jours)	Position (jours)						
	39	40	41	42	43	44	45
25	0.49	0.45	0.39	0.38	0.38	0.40	0.34
26	0.53	0.54	0.45	0.43	0.41	0.44	0.40
27	0.54	0.57	0.54	0.48	0.45	0.47	0.44
28	0.56	0.55	0.52	0.50	0.45	0.36	0.32
29	0.58	0.53	0.53	0.49	0.50	0.51	0.43
30	0.53	0.50	0.52	0.47	0.47	0.44	0.42
31	0.45	0.39	0.46	0.49	0.48	0.44	0.34

Tableau 26. Coefficients de régression obtenus pour différentes combinaisons de position-durée utilisées dans le calcul de la durée de pluie pour le site La Lola, 1990.

Durée (jours)	Position (jours)						
	39	40	41	42	43	44	45
25	0.43	0.38	0.49	0.49	0.48	0.55	0.54
26	0.38	0.40	0.53	0.57	0.57	0.49	0.53
27	0.29	0.41	0.41	0.58	0.63	0.59	0.59
28	0.40	0.46	0.55	0.59	0.58	0.60	0.56
29	0.46	0.51	0.59	0.60	0.64	0.59	0.60
30	0.38	0.45	0.63	0.59	0.66	0.66	0.64
31	0.32	0.30	0.49	0.47	0.59	0.60	0.62

Tableau 27. Coefficients de régression obtenus pour différentes combinaisons de position-durée utilisées dans le calcul de la durée de pluie pour le site La Lola, 1991.

Durée (jours)	Position (jours)						
	39	40	41	42	43	44	45
25	0.45	0.45	0.43	0.49	0.44	0.47	0.40
26	0.45	0.49	0.53	0.59	0.63	0.63	0.66
27	0.52	0.52	0.58	0.66	0.67	0.69	0.70
28	0.56	0.59	0.60	0.68	0.70	0.67	0.66
29	0.60	0.59	0.65	0.68	0.72	0.68	0.65
30	0.48	0.56	0.66	0.66	0.68	0.62	0.63
31	0.53	0.48	0.50	0.55	0.60	0.64	0.60

Dans les figures 41, 42 et 43, on présente les résultats correspondant au couple (6-4) pour lequel la corrélation entre la durée cumulée de la pluie (DCP) et le niveau d'infection de la feuille 4 (NIF4) a été la meilleure conformément au tableau 24, sur un pas de temps hebdomadaire. On peut noter que le comportement des deux courbes (NIF4 et DCP) sont similaires, dans les différents sites étudiés qui présentent des niveaux d'infection assez différents. Il est important de souligner que l'objectif principal est plus d'analyser l'évolution temporelle de ces deux paramètres que de donner la relation statistique qui les lie. Cette relation statistique varie probablement entre les sites et dans le temps pour un même site.

Bien qu'ils n'aient pas effectué des études détaillées, plusieurs chercheurs (Quiñon 1972, Meredith *et al* 1973, Romero 1986, Blanco 1987, Stover et Simmonds 1987, Stover 1987, Martínez 1989, Gauhl 1990, Wielemaker 1990) ont souligné la grande importance qu'a la pluie dans la production et la dissémination des spores, la contamination, le développement et la variabilité saisonnière de la Sigatoka noire, que ce soit à l'intérieur d'une même plantation ou à l'intérieur d'une zone plus importante.

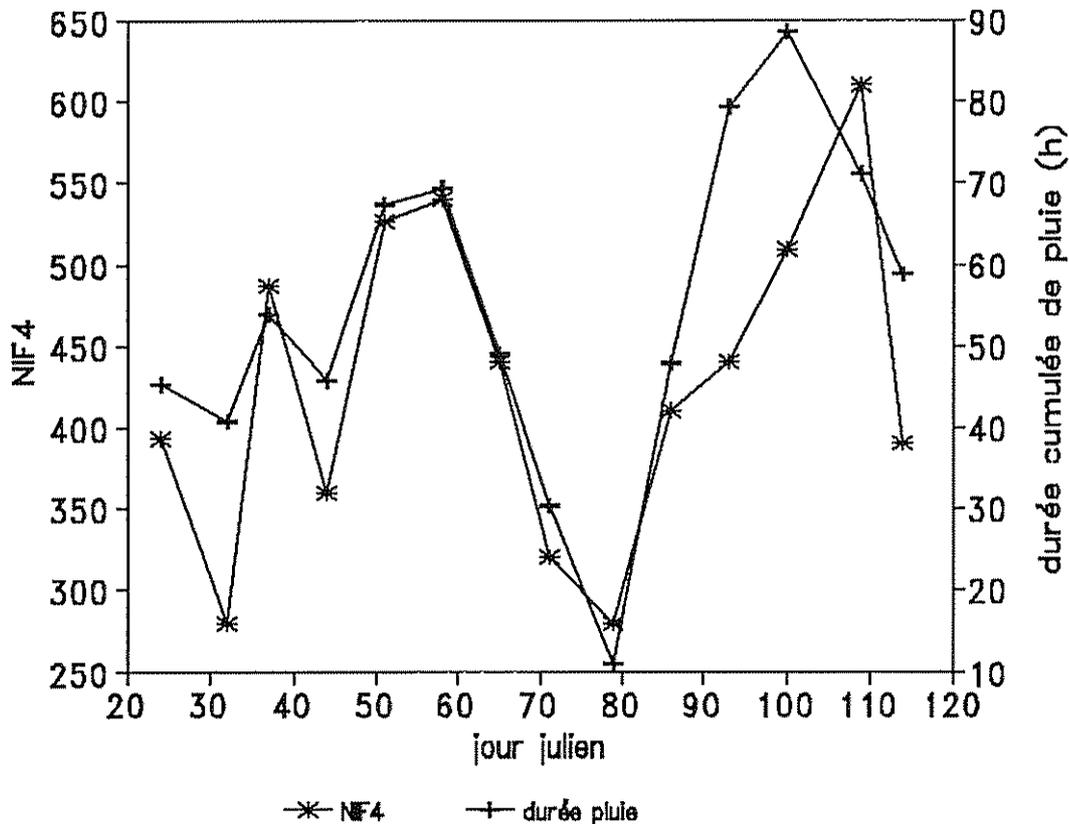


Figure 41. Relation entre le niveau d'infection de la feuille quatre (NIF4) et la durée cumulée de pluie sur la période 6-4. La Lola, 1990.

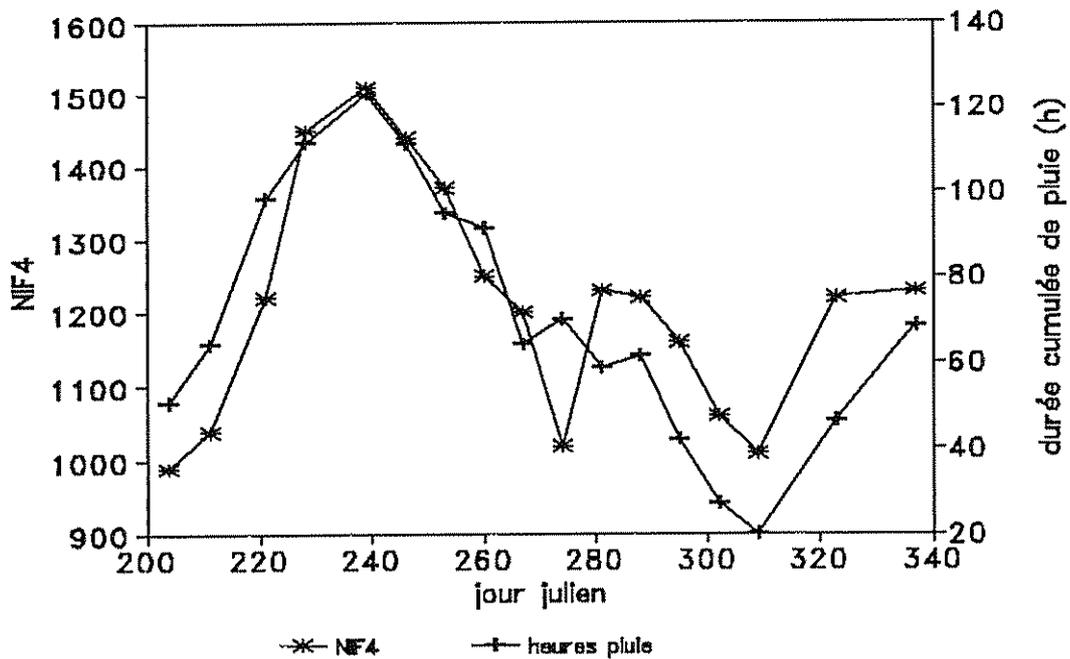


Figure 42. Relation entre le niveau d'infection de la feuille quatre (NIF4) et la durée cumulée de pluie sur la période 6-4. La Lola, 1991.

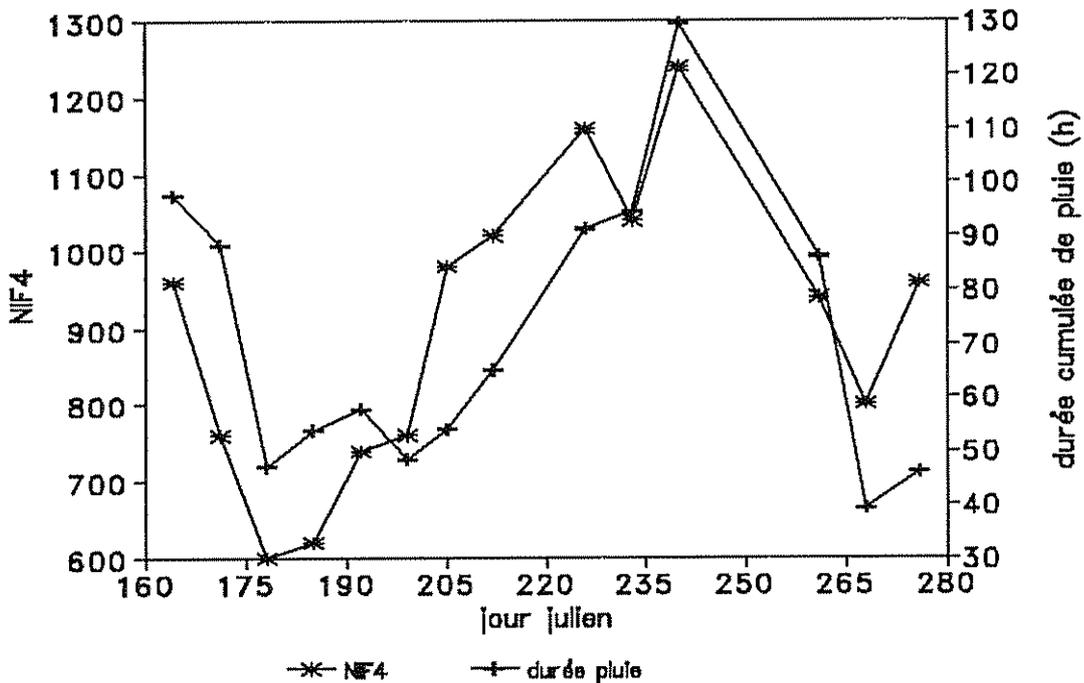


Figure 43. Relation entre le niveau d'infection de la feuille quatre (NIF4) et la durée cumulée de pluie sur la période 6-4. CATIE, 1991.

Ces résultats vont permettre d'élaborer les bases d'un système d'avertissement biométéorologique simple. Le premier résultat est que la variable NIF4 a une valeur prédictive du développement ultérieur de la maladie, ce qui signifie que l'évaluation du niveau d'infection sur cette feuille permet de prendre des décisions en temps utile. En effet, dans certains cas on trouve une bonne relation entre la feuille nécrosée la plus jeune et la pluie (Stover 1983a), mais quand de fortes augmentations de la maladie à l'échelle de la plantation sont constatées, les symptômes sur les feuilles les plus jeunes ont évolué à des degrés au-dessus desquels les fongicides n'ont pas d'effet.

Le second résultat significatif est que le niveau d'infection de la feuille 4 a été relié à la durée cumulée de la pluie des quatre premières des six semaines précédant la date d'évaluation du NIF4. Pour un jour  $j$ , on peut prédire si les conditions passées de pluie ont été favorables ou non au développement de la maladie pour les deux semaines suivantes, ce qui se traduira par une variation du NIF4. Dans le cadre d'un système d'évaluation hebdomadaire de la maladie, on cumule la durée de la pluie sur les périodes allant de la semaine -5 à la semaine -1 et de la semaine -4 à la semaine 0 précédant l'évaluation du NIF4 (voir figure 40).

Dans le cas du bananier plantain, d'un point de vue opérationnel, il se révèle important que la relation durée cumulée de pluie et niveau d'infection soit établie avec la feuille 4, parce que cela facilite beaucoup l'évaluation des symptômes par rapport aux autres feuilles comme la un, la deux ou la trois. Ceci est dû au fait que la dite feuille présente une inclinaison vers le bas, ce qui permet son évaluation depuis le sol, même pour les plantes proches de la floraison.

#### **4.3.5 Le système d'avertissement biométéorologique**

La définition des valeurs biométéorologiques nécessaires pour établir les règles de décision a été obtenue en analysant les dates d'application dans les parcelles traitées et les variations hebdomadaires du NIF4 et de la DCP 1, DCP 2, DCP 3. Comme il a été indiqué précédemment, ces parcelles traitées ont été contrôlées au moyen du système de préavis biologique et par conséquent le critère de base pour décider des applications est l'état d'évolution de la maladie. L'utilisation de ce critère a permis de déterminer que la grande majorité des applications de fongicides effectuées coïncidaient avec l'augmentation d'au moins 260 unités de la valeur de NIF4 et/ou avec des augmentations de la DCP 3 par rapport à la DCP 2 et de la DCP 2 par rapport à la DCP 1 d'au moins six heures. Afin de conserver une marge de sécurité et de travailler avec des seuils plus faciles à manier, on a établi comme valeurs critiques de décision, des augmentations minimales de 5 heures de la durée de la pluie et de 200 unités de la valeur du niveau d'infection de la feuille 4. Dans le système de préavis biologique un changement de 200 unités dans la valeur du NIF4 correspond à un accroissement d'une unité sur l'échelle des symptômes (10 plantes). Pour le bananier plantain, cela signifie une forte augmentation quantitative dans le développement de la maladie et un indicateur préoccupant dans le contrôle de cette dernière.

On considère qu'un traitement chimique peut protéger pendant au moins deux semaines, même quand il n'a pas été très efficace. En tout cas, ce délai est nécessaire pour juger clairement de l'efficacité du traitement quand les évaluations sont effectuées chaque semaine.

Sur la base des critères précédents, on a établi les règles de décision suivantes qui constituent la base du système d'avertissement biométéorologique proposé.

**Un traitement fongicide doit être effectué s'il s'est écoulé plus de deux semaines depuis la dernière application et si au moins une des deux conditions suivantes est vérifiée:**

- 1. Le niveau d'infection de la feuille 4 (NIF4) augmente de plus de 200 unités par rapport à la semaine précédente, indépendamment de la durée des pluies.**
- 2. La DCP 2 et la DCP 3 augmentent de plus de 5 heures par rapport à DCP 1 et DCP 2, respectivement.**

Pour commencer à être utilisée, la méthodologie d'avertissement proposée demande qu'aient été enregistrés la durée de la pluie durant au moins six semaines et le niveau d'infection de la feuille 4 sur deux semaines consécutives.

Les pratiques culturales adéquates doivent être considérées comme faisant partie de la lutte intégrée contre la Sigatoka noire. La figure 44 présente un schéma du système d'avertissement biométéorologique proposé.

#### **4.3.6 Evaluation du système d'avertissement biométéorologique.**

Le système d'avertissement biométéorologique a été utilisé avec succès par comparaison au système de préavis biologique validé antérieurement dans de nombreux sites. En l'absence d'une méthode de lutte chimique de référence (comme cela pouvait être le cas avec une plantation commerciale à grande échelle), le système de préavis biologique constitue la méthode de référence retenue pour apprécier les performances du système d'avertissement biométéorologique en situation de plantation vivrière.

Dans le tableau 28 apparaissent les résultats du contrôle de la maladie dans la plantation d'un agriculteur à Santa Teresita de Turrialba, de novembre 1992 à août 1993, grâce aux deux systèmes indiqués. Dans le cas des huit traitements réalisés d'après le système biométéorologique, on peut noter que ceux correspondant aux jours juliens 35, 112 et 168 ont obéi à la règle de décision 1, tandis que ceux effectués les jours 345, 133 et 207 ont obéi à la règle de décision 2. C'est seulement dans le cas du traitement du jour 85 que les deux règles ont été vérifiées simultanément.

Les jours 40, 89, 96, 424, 145, 187 et 194, la DCP 2 et la DCP 3 ont augmenté de plus de 5 heures, par rapport à la DCP 1 et à la DCP 2, respectivement; cependant il ne convenait pas de réaliser un traitement fongicide parce qu'il ne s'était pas écoulé plus de deux semaines depuis la dernière application.

Les nombres d'applications prévues par les deux systèmes ont été similaires et relativement faibles, si l'on considère que durant la même période (10 mois), il s'est fait près de 25 applications dans les exploitations commerciales à grande échelle. Par contre, si on observe la variation hebdomadaire de la feuille nécrosée la plus jeune (figure 45), qui est une variable indicatrice de l'état sanitaire général de la

plantation, il apparaît que l'on a presque toujours observé plus de feuilles saines lorsque le contrôle a été effectué avec le système biométéorologique.

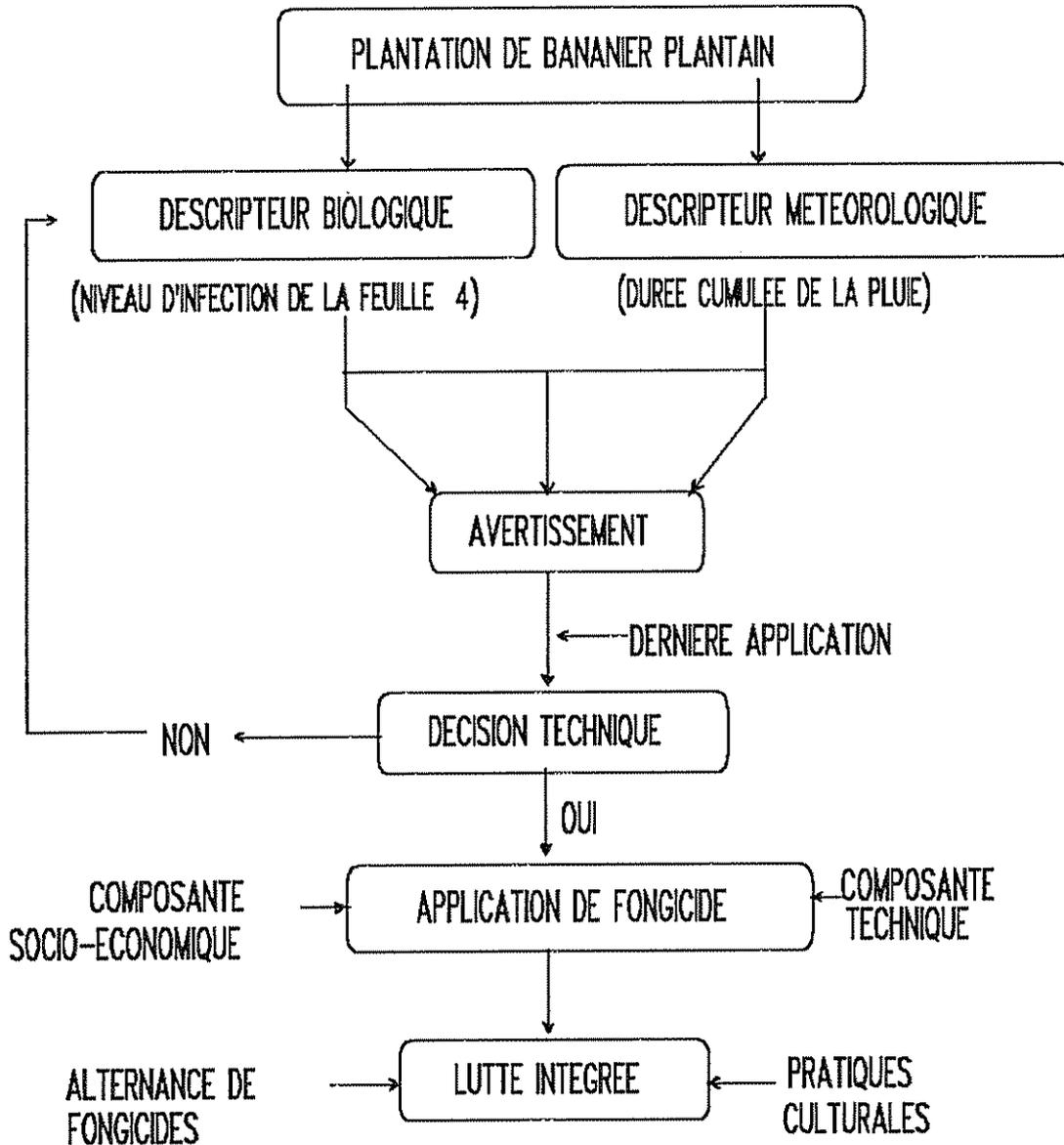


Figure 44. Schéma du système d'avertissement biométéorologique pour la Sigatoka noire du bananier plantain.

Tableau 28. Comparaison des systèmes d'avertissement biométéorologique (SAB) et de préavis biologique (PB) en termes de prévision des dates des traitements fongicides en conditions réelles d'exploitation. Santa Teresita (1992-1993).

Jour Julien	NIF4	Durée de la pluie			Trait. SAB	Préavis biologique	
		DCP 1	DCP 2	DCP 3		EEM	Trait.
322	640	82.3	77.5	41.6		----	
329	540	77.5	41.6	40.5		2624	
336	620	41.6	40.5	61.1		2233	B+B
343	480	40.5	61.1	87.6	Tilt, 345*	2417	
350	520	61.1	87.6	88.9		2524	Tilt
357	580	87.6	88.9	90.6		2245	
364	600	88.9	90.6	127.1		1688	
5	640	90.6	127.1	100.6		1581	
12	760	127.1	100.6	99.1		1617	
19	620	100.6	99.1	108.7		2126	Bavistin
26	540	99.1	108.7	69.8		2303	
33	940	108.7	69.8	135.3	Tilt, 35	2392	
40	1040	69.8	135.3	152.1		2671	Tilt
47	980	135.3	152.1	130.1		2332	
54	860	152.1	130.1	128.3		1788	
61	900	130.1	128.3	49.6		1621	
68	1060	128.3	49.6	26.7		1531	
75	840	49.6	26.7	82.6		1096	
82	1100	26.7	82.6	102.9	B+B, 85	1446	
89	640	82.6	102.9	125.7		1713	B+B
96	560	102.9	125.7	132.7		2129	
103	700	125.7	132.7	78.5		2319	Tilt
110	1140	132.7	78.5	36.5	Tilt, 112	1761	
117	720	78.5	36.5	44.2		1610	
124	780	36.5	44.2	61.7		1469	
131	700	44.2	61.7	98.3	Tilt, 133	1219	
138	460	61.7	98.3	125.3		1330	
145	460	98.3	125.3	131.1		2107	Tilt
152	340	125.3	131.1	125.1		2283	
159	280	131.1	125.1	107.2		1515	
166	540	125.1	107.2	97.4	Tilt, 168	1421	
173	820	107.2	97.4	76.3		1635	
180	1080	97.4	76.3	82.4	Siganex, 183	3126	Tilt
187	780	76.3	82.4	96.6		1872	
194	540	82.4	96.6	112.9		1580	
201	680	96.6	112.9	134.8	Tilt, 207	2202	Siganex
208	240	112.9	134.8	119.6		1678	
215	540	134.8	119.6	110.1		1279	
222	620	119.6	110.1	113.6		1328	
229	540	110.1	113.6	95.1		1225	
236	600	113.6	95.1	115.1		1481	

NIF4 = niveau d'infection de la feuille 4.

EEM = état d'évolution de la maladie

B+B = Baycor + Bayleton

\* = Jour julien où a été effectué le traitement

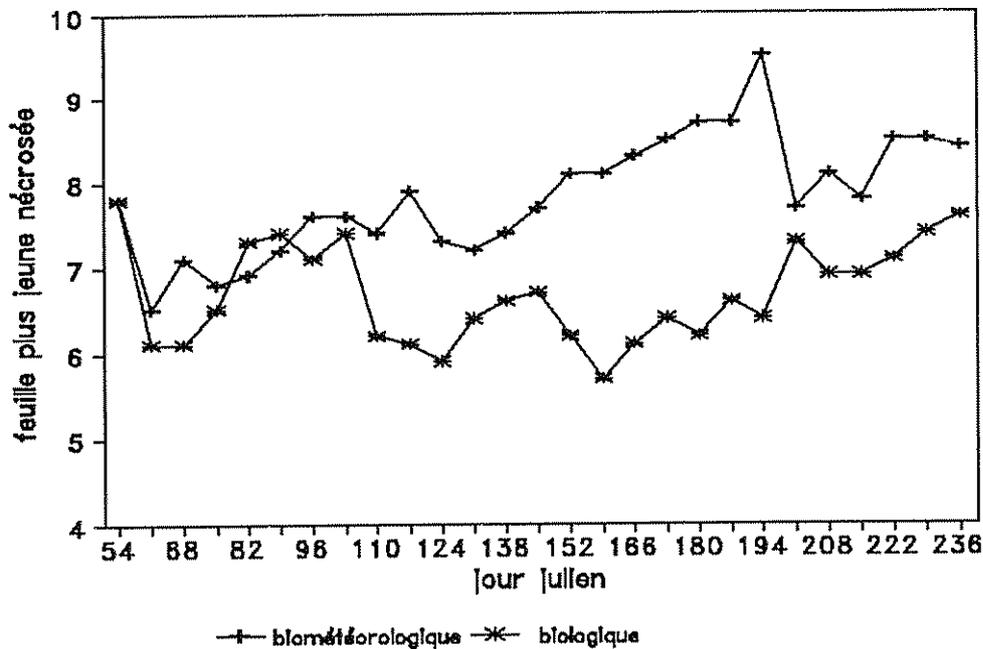


Figure 45. Comparaison des systèmes de préavis biologique et d'avertissement biométéorologique en termes de numéro de la plus jeune feuille nécrosée sur le site de Santa Teresita, 1993.

#### 4.3.7 Comparaison des applications de fongicides faites en suivant le système de préavis biologique (PB) et simulées par le système d'avertissement biométéorologique (SAB).

Dans les parcelles traitées en suivant le système de préavis biologique, situées à La Lola en 1990 et 1991, au CATIE en 1991 et à Santa Teresita en 1992, on a réalisé une simulation du nombre de traitements fongicides qui auraient été nécessaires en utilisant le système biométéorologique. Dans les tableaux 29, 30, 31 et 32, sont présentés ces résultats.

Les données de La Lola 1990 (tableau 29) montrent qu'il a été effectué une application au début de l'évaluation pour initialiser le système de PB. Cette première application permet de minimiser les variations spatiales du niveau d'infection des feuilles les plus jeunes à l'échelle de la plantation. Par la suite, les nombres d'applications correspondant aux deux systèmes ont été identiques. En ce qui concerne les dates de traitement, la deuxième application aurait dû être réalisée une semaine plus tôt conformément au SAB, alors que le troisième traitement qui a été effectué paraît avoir été tardif si on considère l'augmentation importante enregistrée par l'état d'évolution de la maladie. Ceci laisse supposer que si l'application avait été réalisée d'après le système du SAB, probablement le faible niveau d'infection aurait été maintenu pendant une période plus longue. On note que le jour 79, les augmentations de DCP 2 et de DCP 3 furent considérables, ce qui allait entraîner une augmentation très élevée du niveau d'infection de la plantation, comme l'a montré la variation de l'état d'évolution de la maladie.

Tableau 29. Comparaison des prévisions de traitements fongicides effectués conformément au système de préavis biologique (PB) et par le système d'avertissement biométéorologique (SAB). La Lola, 1990.

Jour julien	NIF4	Durée cumulée de la pluie			Etat d'évolution de la maladie	Traitement	
		DCP 1	DCP 2	DCP 3		PB	SAB
24	486	45.3	40.7	53.9	2342	Tilt	
32	280	40.7	53.9	45.7	1155		
37	273	53.9	45.7	67.5	587		
44	247	45.7	67.5	69.4	510		
51	480	67.5	69.4	49.1	1368		**
58	513	69.4	49.1	30.3	1546	Tilt	
65	513	49.1	30.3	11.1	1272		
71	300	30.3	11.1	47.8	706		
79	213	11.1	47.8	79.3	328		**
86	300	47.8	79.3	88.7	471		
93	387	79.3	88.7	71.1	1146		
100	447	88.7	71.1	58.9	1575	Benlate	
109	540	71.1	58.9	27.8	2066		
114	390	58.9	27.8	24.3	760		

\*\* = date de traitement prévue par le SAB.

Les données obtenues à La Lola en 1991 (tableau 30) montrent le même nombre de traitements fongicides (quatre) avec les deux systèmes. Au vu de l'état d'évolution de la maladie, il apparaît que les traitements n'ont pas été très efficaces et que, tant au début qu'à la fin de la période étudiée, une application aurait été nécessaire pour baisser le niveau d'infection, comme le suggère le SAB. Ceci met en évidence une limitation du système de préavis biologique, à savoir le manque de règles relatives à la date précise de traitement. A l'heure actuelle, c'est sur la base de l'expérience développée dans chaque zone que la date de traitement est arrêtée.

Les données obtenues au CATIE (tableau 31) indiquent le même nombre d'applications avec les deux systèmes. Il y a eu une première application pour initialiser le système de PB. La deuxième application aurait dû être réalisée suivant le SAB une semaine avant la date à laquelle elle a été effectuée, alors que pour la troisième, il y a coïncidence avec la deuxième application simulée par le SAB. Bien qu'une quatrième application n'ait pas été réalisée, il paraît évident, si l'on en juge par l'état d'évolution de la maladie au jour julien 276, qu'une telle application aurait dû être réalisée au plus tard une semaine après (jour 276) la date qu'indique le SAB.

Les données de Santa Teresita (tableau 32) montrent qu'il y a une première application pour initialiser le système de préavis biologique et homogénéiser spatialement le niveau d'infection. Pour les deuxième, troisième, quatrième et sixième applications, les deux systèmes coïncident. Les cinquième et septième traitements auraient dû être réalisés d'après le préavis biométéorologique une semaine avant la date à laquelle ils ont eu lieu.

Tableau 30. Comparaison des prévisions de traitements fongicides effectués conformément au système de préavis biologique (PB) et par le système d'avertissement biométéorologique (SAB). La Lola, 1991.

Jour Julien	NIF4	Durée cumulée de la pluie			Etat d'évolution de la maladie	Traitements	
		DCP 1	DCP 2	DCP 3		PB	SPB
204	920	50.7	63.9	98.1	2268		**
211	760	63.9	98.1	111.3	2699		
221	1340	98.1	111.3	123.1	3148		**
228	1420	111.3	123.1	111.1	3244	Tilt	
239	1240	123.1	111.1	94.8	2930		
246	1500	111.1	94.8	91.4	3383	Tilt	**
253	1600	94.8	91.4	63.9	3294		
260	1240	91.4	63.9	69.7	2866		
267	1200	63.9	69.7	58.6	2879	Calixin	
274	880	69.7	58.6	61.3	2720		
281	1080	58.6	61.3	42.2	2903		
288	920	61.3	42.2	27.2	2690	Calixin	
295	860	42.2	27.2	20.1	2536		
302	840	27.2	20.1	46.6	2503		
309	880	20.1	46.6	68.3	2614		**
323	940	46.6	68.3	98.3	2643		
337	1120	68.3	98.3	88.4	2662		

Tableau 31. Comparaison des prévisions de traitements fongicides effectués conformément au système de préavis biologique (PB) et par le système d'avertissement biométéorologique (SAB). CATIE, 1991.

Jour Julien	NIF4	Durée cumulée de la pluie			Etat d'évolution de la maladie	Traitements	
		DCP 1	DCP 2	DCP 3		PB	SAB
164	740	97.4	88.3	46.9	2187	Tilt	
171	900	88.3	46.9	53.8	3826		
178	660	46.9	53.8	57.7	2771		
185	600	53.8	57.7	48.3	2061		
192	540	57.7	48.3	54.1	1963		
199	600	48.3	54.1	65.1	2392		**
205	760	54.1	65.1	91.2	2449	Benlate	
212	1000	65.1	91.2	94.6	2556		
226	1400	91.2	94.6	129.5	2814	Tilt	**
233	800	94.6	129.5	86.2	1903		
240	760	129.5	86.2	39.3	1889		
261	680	86.2	39.3	46.1	1865		
268	860	39.3	46.1	53.3	2321		**
276	1020	46.1	53.3	56.3	2558		

\*\* = date de traitement prévue par le SAB.

Tableau 32. Comparaison des prévisions de traitements fongicides effectués conformément au système de préavis biologique (PB) et par le système d'avertissement biométéorologique (SAB). Santa Teresita, 1992.

Jour Julien	NIF4	Durée cumulée de la pluie			Etat d'évolution de la maladie	Traitements	
		DCP 1	DCP 2	DCP 3		PB	SAB
154	720	121.8	89.9	59.9	---		
161	680	89.9	59.9	33.1	2035	Tilt	
168	440	59.9	33.1	50.8	1495		
175	300	33.1	50.8	47.8	758		
182	280	50.8	47.8	53.9	900		
189	620	47.8	53.9	70.1	1820	Tilt	**
196	660	53.9	70.1	60.2	1955		
203	480	70.1	60.2	66.9	1433		
210	400	60.2	66.9	79.4	1545	Calixin	**
217	460	66.9	79.4	97.1	1423		
224	660	79.4	97.1	91.2	1861		
231	1060	97.1	91.2	81.7	2762	Tilt	**
238	1020	91.2	81.7	81.6	3167		
245	1400	81.7	81.6	59.3	3162		
252	1140	81.6	59.3	72.7	2238		
259	660	59.3	72.7	77.8	1454		**
266	1160	72.7	77.8	78.3	2244	Tilt	
273	1040	77.8	78.3	68.1	2280		
280	860	78.3	68.1	62.1	1883		
287	860	68.1	62.1	67.6	1411		
295	1000	62.1	67.6	89.8	1324	Tilt	**
302	700	67.6	89.8	90.3	1984		
309	680	89.8	90.3	82.3	1569		
316	940	90.3	82.3	77.5	1900		
323	1340	82.3	77.5	41.6	2560		**
330	1040	77.5	41.6	40.5	2111	B+B	

\*\* = date de traitement prévue par le SAB

#### 4.3.8 Conclusions

La durée des pluies affecte de manière considérable le développement de la Sigatoka noire dans la culture du bananier plantain. Nous avons montré que les évolutions temporelles des variables "niveau d'infection de la feuille quatre" et durée cumulée des pluies durant les quatre premières des six semaines précédant l'évaluation biologique, sont similaires, ce qui a permis de mettre au point un système d'avertissement biométéorologique (SAB).

Les résultats présentés dans le tableau 28 montrent que le SAB a permis une utilisation rationnelle des produits fongicides. Le système est simple, rapide et fait

appel à des règles de décisions objectives. Il a un caractère prédictif de deux semaines, ce qui permet de combattre la maladie à des stades plus sensibles aux produits fongicides et par conséquent à un moment plus opportun.

Les simulations effectuées pour comparer les dates des traitements chimiques par le SAB montrent une tendance de celui-ci à les prédire avant le PB. Ceci se révèle être important dans la lutte contre la Sigatoka noire sachant que cela permettrait de contrecarrer l'avance de la maladie quand le niveau d'infection est bas et par conséquent à un moment où l'intervention est plus efficace. De même, cela procurerait une certaine marge de temps en cas d'empêchements météorologiques ou logistiques pour effectuer une application, avant que le niveau d'infection dans la plantation ne devienne difficile à contrôler.

Les résultats précédents montrent que le système biométéorologique a un potentiel certain pour la prise de décision d'applications fongicides contre la Sigatoka noire. Cependant, il est souhaitable de poursuivre l'étude du SAB, principalement en établissant dans d'autres régions des parcelles de comparaison entre ce système et le préavis biologique. Il est raisonnable de penser qu'un tel système puisse aussi être adapté au cas du bananier.

Le SAB pourrait constituer un outil de décision accessible au petit producteur de bananier plantain, dont les possibilités financières de traitement chimique sont très limitées et doivent donc être gérées le plus efficacement possible à l'aide d'une méthode simple.

## **CONCLUSIONS GENERALES**

## CONCLUSIONS GENERALES

Que sa vocation soit vivrière ou commerciale, la culture du bananier plantain et bananier représente une activité agricole fondamentale pour plusieurs pays tropicaux. La Sigatoka noire (*Mycosphaerella fijiensis*) est considérée actuellement comme l'obstacle majeur à la culture de musacées. La protection raisonnée de ces agrosystèmes nécessite une étude approfondie des interactions entre l'hôte, l'agent pathogène et le milieu.

En ce qui concerne les relations entre l'hôte et le milieu physique, ce travail a permis de développer un modèle simple d'estimation de la durée de rosée sur la feuille cigare et la première feuille déroulée du bananier plantain à partir de données météorologiques classiques (modèle ROCIO). La plupart des valeurs de durée de rosée a été estimée avec une erreur de moins d'une heure par rapport aux durées observées. Sachant que l'architecture du bananier plantain et celle du bananier sont similaires, on peut supposer que le modèle validé pour le bananier plantain est aussi applicable au bananier. Ce modèle conçu pour un usage opérationnel permet de faire une estimation des durées de rosée, soit avec des données météorologiques du temps passé dans l'objectif d'analyser leurs relations avec le développement de la Sigatoka noire (ou d'autres maladies), soit en temps réel, à partir des données d'une station automatique pour prévoir le risque d'infection.

Concernant l'influence du climat sur la Sigatoka noire, notre travail propose un ensemble de résultats relatifs au rôle de la rosée et de la pluie d'une part et au développement d'un système d'avertissement biométéorologique d'autre part.

Dans la région tropicale humide du Costa Rica, la durée de rosée ne semble pas être un facteur limitant pour le développement de la Sigatoka noire. L'étude réalisée dans la région atlantique du Costa Rica, où on a tenté de relier la durée de rosée avec certains paramètres épidémiologiques, n'a pas mis en évidence l'existence de relations à caractère quantitatif. Dans ces conditions climatiques, la durée de rosée journalière est généralement supérieure à 12 heures, et alterne avec des périodes sans présence d'eau libre, ce qui crée des conditions optimales pour l'agent pathogène.

Les données de durée de rosée obtenues par le modèle ROCIO ont été utilisées comme données d'entrée d'une équation de prévision de la sévérité de la Sigatoka noire développée à partir de résultats expérimentaux publiés antérieurement. Ceci a permis de simuler le comportement de la maladie dans des régions avec une saison sèche prononcée, mais où le développement de l'irrigation rend possible la production de bananier plantain. Dans le cas analysé il apparaît que la durée d'humectation pendant la période sèche est très défavorable à la Sigatoka noire.

Le régime pluviométrique et la distribution de la durée journalière de la pluie dans la région atlantique du Costa Rica présentent des caractéristiques très favorables à la Sigatoka noire qui sont: l'absence d'une période sèche prolongée, l'alternance quotidienne de conditions sèches et mouillées, la prédominance de pluies qui débutent à partir de 15 heures et qui aboutissent à l'existence de durées continues d'humectation (pluie et rosée) pouvant atteindre 18 heures journalières.

Par ailleurs on a obtenu un certain nombre de résultats relatifs d'une part à l'interception de la pluie par le couvert végétal. Nous avons montré que l'interception

et l'écoulement des pluies le long des tiges sont l'un et l'autre d'environ 10% de la précipitation incidente. Le capacité de stockage est voisine de 2 mm.

L'étude de la libération des ascospores de *M. fijiensis* dans une plantation de bananier plantain a montré que, durant les jours sans pluie, la concentration des ascospores est faible pendant les 24 heures, mais augmente pendant la nuit, avec une tendance à croître au lever du soleil. Durant les jours de pluie, la libération a fortement augmenté peu de temps après le début des pluies ou peu de temps après la fin de l'épisode pluvieux; pendant les pluies prolongées, le comportement a été similaire.

Ces résultats suggèrent que pendant les périodes sans pluie la rosée permet de maintenir un faible taux de libération des ascospores, dont le rôle est important car il contribue à l'entretien d'un niveau minimal d'inoculum dans les plantations. Durant les périodes pluvieuses, la pluie est le facteur déterminant de la libération d'ascospores. L'alternance de périodes avec et sans pluie, de même que l'ocurrence de fréquentes pluies supérieures à 1 mm apparaissent nécessaires pour une production élevée des ascospores et pour leur libération.

Dans la région atlantique du Costa Rica, les résultats obtenus ont montré que les tendances de la variation temporelle du niveau d'infection de la feuille 4 (NIF4) du bananier plantain et de la durée cumulée des pluies pendant les quatre premières semaines de six semaines précédant l'évaluation biologique (NIF4) ont été très similaires. Ces observations ont servi de base pour développer un système d'avertissement biométéorologique destiné à définir le calendrier des traitements fongicides. Le système a été testé dans des conditions réelles de production. Ce système simple fonctionne à l'aide de règles de décision objectives et permet de faire une prévision à deux semaines, ce qui favorise une lutte précoce à des stades où la maladie est plus sensible aux produits fongicides. Mais il paraît essentiel maintenant de tester ce système d'avertissement dans d'autres conditions de climat et de production et de l'y adapter.

Des études complémentaires s'imposent pour affiner la connaissance du microclimat des couverts de musacées et de l'influence du climat sur la maladie. D'importants progrès restent à faire en ce qui concerne les interactions hôte-pathogène.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASRAR G., HIPPS L.E. and KANEMASU E.T. 1984. Assessing solar energy and water use efficiencies in winter wheat: a case study. *Agricultural and Forest Meteorology* 31: 47–58.

AUBERT B. 1971. Action du climat sur le comportement du bananier en zones tropicales et subtropicales. *Fruits* 26: 175–188.

BLAKE G.J. 1975. The interception process. *In: Prediction in Catchment Hydrology*. T.G. Chapman and F.X. Dunin (eds.), Australian Academy of Science, Canberra.

BLANCO M.V. 1987. Relación de los factores climáticos con los niveles de esporulación e infección de *Mycosphaerella fijiensis* var. *difformis* en el cultivo de banano en la zona de Río Frío. Costa Rica. Tesis Ing. Agr., San José, Costa Rica, 60 p.

BORGES O.L. 1971. Tamaño y densidad de estomas en clones cultivados y especies silvestres de *Musa*. *Agronomía Tropical* 21: 139–143.

BRUN J. 1963. La cercosporiose du bananier en Guinée. Etude de la phase ascosporee du *Mycosphaerella musicola*, Leach. Thèse Fac. Sci Univ. Paris Sud-Orsay. 190 p.

BUREAU E. 1990. Adaptation d'un système d'avertissement à la lutte contre la cercosporiose noire (*Mycosphaerella fijiensis*, Morelet) en plantation de banane plantain au Panamá. *Fruits* 45: 329–338.

BUREAU E., MARIN D. y GUZMAN J.A. 1992. El sistema de preaviso para el combate de la Sigatoka negra en banano y plátano. UPEB, Panamá, 42 p.

BURRAGE S.W. 1972. Dew on wheat. *Agricultural Meteorology* 10: 3–12.

BURUGY R.H. and POMEROY C.R. 1958. Interception losses in grassy vegetation. *Transactions of American Geophysical Union*, 39: 1095–1100.

BUSTAMANTE M. y LOPEZ S. 1982. La Sigatoka Negra del Plátano (*Musa* AAA y AAB) y su impacto económico en Centro América y sureste de México. México, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección de Sanidad Vegetal. 54 p.

BUTLER D.R. 1980. Dew and thermal lag: measurements and an estimate of wetness duration on cocoa pods. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106: 539–550.

BUTLER D.R. 1986. Evaporation from rain drops on leaves in a cereal canopy; a simulation model. *Boundary Layer Meteorology* 35: 329–338.

BUTLER D.R. and HUBAND N.D.S. 1985. Throughfall and stem-flow in wheat. *Agricultural and Forest Meteorology* 35: 329–338.

- BUTLER D.R. and KING S.C. 1982. An inexpensive balance for measuring throughfall in cereals. *Agricultural Meteorology* 27: 233–240.
- CALHERIOS de MIRANDA R.A. and BUTLER D.R. 1986. Interception of rainfall in a hedgerow apple orchard. *Journal of Hydrology* 87: 245–253.
- CAMPBELL G.S. 1977. *An Introduction to Environmental Biophysics*. New York, Springer-Verlag. 159 p.
- CHAMPION J. 1968. *El plátano*. 2ª ed. Barcelona, Blume. 247 p.
- COUTURIER D.E. and RIPLEY E.A. 1973. Rainfall interception in mixed grass prairie. *Canadian Journal of Plant Science* 53: 659–663.
- DELFS J. 1967. Interception and stemflow in stands of norway spruce and beach in West Germany. *In*: W.E. Sopper and H.W. Lull (eds.), *International Symposium on Forest Hydrology*. Pergamon, Oxford. p. 179–185.
- FLORES E.M., SOTO M. y BOLAÑOS R. 1985. Variación estacional del sistema foliar de cinco clones de banano. *Turrialba* 35: 339–346.
- FOURE E. 1988. Stratégies de lutte contre la cercosporiose noire des bananiers et des plantains provoquée par *Mycosphaerella fijiensis* Morelet. L'avertissement biologique au Cameroun. Evaluation des possibilités d'amélioration. *Fruits* 43: 269–274.
- FOURE E. et MOULION PEFOURA, A. 1988. La cercosporiose noire des bananiers et des plantains au Cameroun (*Mycosphaerella fijiensis*). Contribution à l'étude des premières phases d'infection parasitaire. Mise au point de tests précoces d'inoculation sur plants issus de vitro-culture. *Fruits* 43: 339–348.
- FOURE E. 1990. Contribution to genetic control of banana and plantain sigatoka leaf spot in Cameroon: studies on varietal susceptibility and early inoculation trials on plantlets produce by in vitro culture. *In*: *Sigatoka leaf spot diseases of bananas. Proceedings of an International Workshop held at San José, Costa Rica, March 28–April 1, 1989*. R.A. Fullerton y R.H. Stover (eds.) p. 290–305.
- FOURE E. et MOREAU A. 1992. Contribution à l'étude épidémiologique de la cercosporiose noire dans la zone bananière du Mounjo au Cameroun de 1987 à 1989. *Fruits* 47: 3–16.
- FOURE E., GRISONI M. et ZURFLUH R. 1984. Les Cercosporioses du bananier et leurs traitements. Comportement des variétés. Etude de la sensibilité variétale des bananiers et plantains a *Mycosphaerella fijiensis*, Morelet et de quelques caractéristiques biologiques de la maladie des raies noires au Gabon (II). *Fruits* 39: 365–378.
- FRANKEN W.; LEOPOLDO P.R.; MATSUI E. and RIBEIRO M.N.G. 1982. Estudo da interceptação da água de chuva em cobertura florestal amazônica do tipo terra firme. *Acta Amazonica* 12: 327–331.

FRIESLAND H. and SCHRODTER H. 1988. The analysis of weather factors in epidemiology. *In*: Experimental techniques in plant diseases epidemiology. J. Kranz y J. Rotems (eds.) London, Springer-Verlag. p. 116-133.

FRITSCHEN L.J. and DORAISWAMY P. 1973. Dew: an addition to the hydrologic balance of Douglas Fir. *Water Resources Research* 9: 891-894.

GALLO K.P. and DAUGHTRY C.S.T. 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active rayonnement in corn canopies. *Agronomy Journal* 78: 752-756.

GANRY J. 1980. Le développement du bananier en relation avec les facteurs du milieu: \* Action de la température et du rayonnement d'origine solaire sur la vitesse de croissance des feuilles. \* Etude du rythme de développement de la plante. *Fruits* 35: 727-743.

GANRY J. et MEYER J.P. 1972. La Lutte contrôlée contre le cercospora aux Antilles. Bases climatiques de l'avertissement. Technique d'observation et de numération de la maladie. *Fruits* 27: 665-676, 767-774.

GANRY J. et LAVILLE E. 1983. Les cercosporioses du bananier et leur traitements. Evolution des méthodes de traitement. *Fruits* 38: 3-20.

GAUHL F. 1990. Epidemiología y Ecología de la Sigatoka negra *Mycosphaerella fijiensis*, Morelet en plátano *Musa* sp. en Costa Rica. UPEB, Panamá, 126 p.

GOUDRIAAN J. 1977. Crop micrometeorology: a simulation study. *Simulation Monographs*. Wageningen: Pudoc. 249 p.

GUYOT H. et CUILLE J. 1958. Essai de prévision des attaques de cercospora en Guadeloupe. *Fruits* 13: 85-94.

GUZMAN O. and GOMEZ L. 1987. Permanence of free water on coffee leaves. *Experimental Agriculture* 23: 213-220.

HAYNES J.L. 1940. Ground rainfall under vegetative canopy of crops. *Journal of the American Society Agronomy* 32: 176-184.

HERRERA W. 1985. Clima de Costa Rica. San José, Costa Rica, EUNED. 115 p.

HIRST J.M. 1952. A automatic volumetric spore trap. *Annals of Applied Biology* 39: 257-265.

HOWARD A.M. and GILLESPIE T.J. 1985. A field guide for surface wetness duration measurement. Tech. Memo. 85-1., Dept. Land Resources Science, University of Guelph, Ontario, Canada. pp. 25 p.

HUBER L. 1987. Modélisation spatio-temporelle de la durée d'humectation d'un couvert végétal après une pluie. Thèse de docteur. INA-PG., Paris. 155 p.

HUBER L. 1988. La durée d'humectation d'un couvert végétal: présentation d'un modèle utilisable en protection des plantes. *In*: Deuxième conférence internationale sur les maladies des plantes. Bordeaux, 8-10 nov. 1988. 8 p.

- HUBER L. 1991. Determinisme et mesurage de la durée d'humectation. Thiverval-Grignon, France. INRA, Station de Bioclimatologie. 17 p.
- HUBER L. et WEHRLÉN J.M. 1988. La durée d'humectation en protection des plantes: mesure et modélisation. *La Défense des Végétaux* 252: 3-11.
- HUBER L. and GILLESPIE T.J. 1992. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology* 30: 553-577.
- HUSCHKE R.E. (ed.). 1959. *Glossary of Meteorology*. Boston, American Meteorological Society.
- INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL DE COSTA RICA. 1985. Atlas climatológico de Costa Rica. San José, C.R., 30 p.
- INGOLD C.T. 1981. Water and spore liberation. *In*: Water and plant disease. Volume V. T.T. Kozłowski, ed. New York, Academic Press.
- JACKSON I.J. 1975. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *Journal of Hydrology*, 24: 215-238.
- JACOME L.H.; SCHUH W. and STEVESON R.E. 1991. Effect of temperature and relative humidity on germination and germ tube development of *Mycosphaerella fijiensis* var. *difformis* *Phytopathology* 81: 1481-1485.
- JACOME L.H. and SCHUH W. 1992. Effects of leaf wetness duration and temperature on development of black Sigatoka disease on banana infected by *Mycosphaerella fijiensis* var. *difformis*. *Phytopathology* 82: 515-520.
- JARAMILLO R. 1987. Banana and plantain production in Latin America and the Caribbean. *In*: G. Persley and E. De Langhe (eds.). *Banana and plantain breeding strategies: Proceedings of an international workshop held at Cairns, Australia, 13-17 October, 1986*, ACIAR. p. 39-43.
- JIMENEZ F. 1986. Balance hídrico con énfasis en percolación de dos sistemas agroforestales: café-poró y café-laurel en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, Tesis Mag. Sci. CATIE-UCR, 104 p.
- JIMENEZ F. and LHOMME, J.P. 1994. Rainfall interception and radiation regime in a plantain canopy. *Fruits* (in press).
- JIMENEZ F., TAPIA A.C. and ESCALANT, J.V. 1994. Relation between rainfall length and development of black Sigatoka disease on plantain leaves. Proposal for a biometeorological prediction system for fungicide application. *Fruits* (in press).
- JONES A.L. 1986. Role of wet periods in predicting foliar diseases. *In*: *Plant disease epidemiology. Population dynamics and management*. K.J. Leonard y W.E. Fry (eds.). New York, Macmillan Publishing, Vol. I. p. 87-100.
- JONES D.R. 1990. Black sigatoka - A Threat to Australia. *In*: *Sigatoka leaf spot diseases of bananas. Proceedings of an International Workshop held at San José, Costa Rica, March 28-April 1, 1989*. R.A. Fullerton y R.H. Stover (eds.) p. 38-46

- KREITH F. and SELLER W.D. 1975. General principles of natural evaporation. In: Heat and Mass Transfer in the Biosphere. D.A. de Vries y N.H. Afgan (eds.). Washington, Scripta Books. p.207–227.
- LEACH R. 1946. Banana leaf spot (*Mycosphaerella musicola*) on the Gross Michel Variety in Jamaica. Kingston, Jamaica Gavernmment Printer. 118 p.
- LEACH R. 1964. Report of investigations into the cause and control of the new banana diseases in Fiji, black leaf streak. Council Paper of Fiji No. 38. 20 p.
- LEON J. 1987. Botánica de los cultivos tropicales. San José, Costa Rica, IICA. p. 87–98.
- LEOPOLDO P.R.; SOUSA A.P. y TUACEK S. 1981. Interceptacao da água de chuva em cultura de cana –de – açúcar. Brasil açucareiro 98: 9–16.
- LEYTON L.; REYNOLDS E.R.C. and THOMPSON F.B. 1967. Rainfall interception in forest and moorland. In: W.E. Sopper and H.W. Lull (eds.), International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon, Oxford, p. 131–136.
- LHOMME J.P. and JIMENEZ O. F. 1992. Estimating dew duration on banana and plantain leaves from standar meteorological observations. Agricultural and Forest Meteorology 62: 263–274.
- LONG P.G. 1979. Banana black leaf streak disease (*Mycosphaerella fijiensis*) in Western Samoa. Trans. Br. Mycol. Soc. 72: 299–310.
- LORENZO C.D., PRENDES C., RODRIGUEZ M.A. and BLES A.C. 1978. Contribución al estudio de la platanera canaria. Estomas y su distribución en la epidermis foliar. Annales de Edafología y Agrobiología 37: 1131–1144.
- MARIN D. y ROMERO R. 1992. El combate de la sigatoka negra. CORBANA, Boletín No.4, San José, Costa Rica, 22 p.
- MARTINEZ A. 1982. Determinación del área mínima foliar en plátano (*Musa AAB*) en el trópico húmedo. Revista del Instituto Colombiano Agropecuario 1: 183–186.
- MARTINEZ O.M. 1989. Determinación del ciclo biológico del patógeno de la Sigatoka negra del plátano *Mycosphaerella fijiensis* var. *difformis*, Mulder y Stover en Teapa, Tabasco, México. Tesis Ing. Agr., Universidad Autónoma de Chiapas, México, 71 p.
- MEREDITH D.S and LAWRENCE J.S. 1969. Black leaf streak disease of banana (*Mycosphaerella fijiensis*) Symptoms of disease in Hawaii, and notes on the conidial state of the causal fungus. Trans. Br. Mycol. Soc. 52: 459–476.
- MEREDITH D.S., LAWRENCE J.S. and FIRMAN I.D. 1973. Ascospore realese and dispersa in black streak of banana *Mycosphaerella fijiensis* . Trans. Br. Mycol. Soc. 60: 547–554.
- MONTEITH J.L. 1957. Dew. Quaterly Journal of the Royal Meteorological Society 83: 322–341.

- MONTEITH J.L. 1963. Dew: facts and fallacies. *In*: A.J. Rutter and F.A. Whitehead (eds.). The water relations of plants. London, Blackwell. p. 36–56.
- MONTEITH J.L. 1975. Principles of Environmental Physics. London, Arnold. 241 p
- MONTEITH J.L. and BUTLER D.R. 1979. Dew and thermal lag: a model for cocoa pods. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 105: 207–215.
- MONTEITH J.L. and UNSWORTH M.H. 1990. Principles of Environmental Physics. 2nd ed., London, Arnold. 291 p.
- MOULION-PEFOURA A. et MOURICHON X. 1990. Développement de *Mycosphaerella musicola* (maladie de sigatoka) et *M. fijiensis* (maladie des raies noires) sur les bananiers et platains. Étude du cas particulier des productions d'altitude. *Fruits* 45: 17–24.
- MOURICHON X. and FULLERTON R.A. 1990. Geographical distribution of the two species *Mycosphaerella musicola* Leach (*Cercorpora musae*) and *M. fijiensis* Morelet (*C. fijiensis*), respectively agents of Sigatoka disease and black leaf streak disease in bananas and plantains. *Fruits* 45: 213–218.
- MULDER J.C. and STOVER R. H. 1976. *Mycosphaerella* species causing banana leaf spot. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 67: 77–82.
- NOBEL P.S. and LONG S.P. 1985. Canopy structure and light interception. *In* Techniques in bioproductivity and photosynthesis. J. Coombs, D. Hall, S. Long y J.Scurlock eds. 2nd ed., Oxford, Pergamon Press, Chapter 4, p. 41–49
- NORMAN J.M. 1982. Simulation of microclimates. *In*: Biometeorology in Integrated Pest Management. J. Hatfield y I. Thomason (eds.). New York, Academic Press. p.65–99.
- PAYEN D. 1983. Modélisation d'épidémiology de *Sclerotinia Sclerotiorum* sur Tournesol. *EPPO Bulletin* 13: 277–281.
- PEDRO M.J. 1989. Relation of leaf surface wetness duration to meteorological parameters. Thesis PhD. University of Guelph. Ontario, Canada. 134 p.
- PEDRO M.J. and GILLESPIE T.J. 1982a. Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agricultural Meteorology* 25: 283–296.
- PEDRO M.J. and GILLESPIE T.J. 1982b. Estimating dew duration. II. Utilizing standard weather station data. *Agricultural Meteorology* 25: 297–310.
- PEREIRA A.R., MACHADO E.C. and De CAMARGO M.B.P. 1982. Solar rayonnement regime in three cassava (*Manihot esculenta* Crantz) canopies. *Agricultural Meteorology* 26: 1–10.
- PEREZ L. 1978. Estudio de la dinámica de formación de fructificaciones de *Mycosphaerella musicola* y factores ecológicos que la determinan. *Ciencia y Técnica en la Agricultura, Protección de Plantas* 1: 43–64.

- PEREZ L. 1983. Epifitiología de la mancha de plátano (Sigatoka) causada por *Mycosphaerella musicola*. Factores que influyen en el período de incubación y en el desarrollo de la enfermedad en Cuba. *Agrotecnia de Cuba* 15: 55–64.
- PONS N. 1990. Taxonomy of *Cercospora* and related genera. *In* Sigatoka leaf spot diseases of bananas. Proceedings of an International Workshop held at San José, Costa Rica, March 28–April 1, 1989. R. A. Fullerton y R.H. Stover (eds.) p. 360–370.
- QUINN N.W. and LAFLEN J.M. 1983. Characteristics of raindrop throughfall under corn canopy. *Trans. ASAE* 26: 1445–1450.
- QUIÑON V.L. 1972. Epidemiology and control of black leaf streak disease of banana caused by *Mycosphaerella fijiensis*. Tesis doctoral, Univ. de Hawaii p. 19–133.
- RAO M. and EDMUNDS J.E. 1985. Yield and growth performance of four plantains (*Musa* AAB group) cultivars in the wind ward Islands. *Tropical Agriculture* 62: 253–255.
- RAPILLY F. 1990. L'épidémiologie en pathologie végétale: mycoses aériennes. INRA, Paris. 317 p.
- REEVE J.E. 1960. Appendix on derivation of formulae (in inclined point quadrats, by J. Warren Wilson). *New Phytol.* 59: 1–8.
- RHODES P.L., 1964. A new disease in Fiji. *Commonwealth Phytopathological News* 10: 38–41.
- ROJIANI K.B., TARBELL K.A, SHANHOLTZ V.O. and WOESTE F.E. 1985. Simulation of correlated rainfall amount and duration data. *Transactions of the ASAE.* p. 129–132.
- ROMERO R. 1986. Observaciones sobre la incidencia de Sigatoka negra *Mycosphaerella fijiensis*, var. *difformis* en el cultivo del banano en la Zona Atlántica de Costa Rica. *ASBANA (Costa Rica)* 10: 22–25.
- ROTEM J. and REICHERT I. 1964. Dew: A principal moisture factor enabling early blight epidemics in a semi-arid region of Israel. *Plant Disease Reporter* 48: 211–215.
- ROYLE D.J. and BUTLER D.R. 1986. Epidemiological significance of liquid water in crop canopies and its role in diseases forecasting. *In* Water, Fungi and Plants. P.G. Ayres y L.Boddy (eds.) Oxford, Cambridge University Press. p. 139–156.
- RUDGARD S.A. and BUTLER D.R. 1987. Witches' broom disease on cocoa in Rondonia, Brazil: pod infection in relation to pod susceptibility, wetness, inoculum, and phytosanitation. *Plant Pathology* 36: 515–522.
- RUSSEL G., JARVIS P.G. and MONTEITH J.L. 1989. Absorption of radiation by canopies and stand growth. *In* Plant canopies: their growth, form and function. G.Russel, B. Marshal y P.G. Jarvis eds. Cambridge, Cambridge University Press. p. 21–39.
- RUTTER A.J. 1967. An analysis of evaporation from a stand of Scotts pine. *In*: International Symposium on Forest Hidrology. W.E. Sopper and H.W. Lull (eds.), Pergamon, Oxford. p. 403–417.

- RUTTER A.J. 1975. The hydrological cycle in the vegetation. *In: Vegetation and the Atmosphere*. J.L. Monteith (ed.), Vol. 1, Academic Press, London, Ch. 4, p. 111–154.
- SAEKI T. 1963. Light relations in plant communities. *In: Environmental control of plant growth*. L.T. Evans (ed.), New York, Academic Press. p. 79–94..
- SALTYER R.O. and McLLROY I.C. 1961. Dew and water absorption by leaves. *In: Practical Microclimatology*. Chap. 6. Australia, UNESCO. p. 1–24.
- SANDOVAL J. 1989. Estudio de la anatomía y morfología vegetativas de plantas de Musa in vitro, en condiciones de aclimatación y en el campo. Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sci. CATIE. 178 p.
- SASTRY P.S.N. 1988. Agrometeorology of the banana crop. WMO, Agricultural Meteorology CAgM. Report No. 29. 85 p.
- SATLER R. 1990. Análisis del crecimiento y de la productividad de tres cultivares de musáceas de los grupos AAA, AAB, y ABB desarrollados en el trópico húmedo de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sci. CATIE. 168 p.
- SCHULZE C.R.; SCOTT C.R. and NANNI U.W. 1978. Interception by *Pinus patula* in relation to rainfall parameters. *Journal of Hydrology* 36: 393–396.
- SIMMONDS N.W. 1962. The evolution of bananas. London, Longman. 170 p.
- SIMMONDS N.W. and SHEPHERD K. 1955. The taxonomy and origins of cultivated bananas. *Journal of the Linnean Society of Botany (London)* 55: 302–312.
- SOTO M. 1985. Bananos. Cultivo y Comercialización. San José, Costa Rica, Lil. 648 p.
- STAHEL G. 1937. Notes on cercospora leaf spot of bananas (*Cercospora musae*). *Tropical Agriculture* 14: 257–264.
- STERN R.D, DENNETT M.D. and DALE I.C. 1982. Analysing daily rainfall measurements to give agronomically useful results. II. A modelling approach. *Experimental Agriculture* 18: 237–253.
- STERN R.D. and DALE I.C. 1983. Modelling daily rainfall data. *In: Statistical methods for tropical drought analysis based on rainfall data*. WMO. Appendix 2. p. 1–4.
- STERN R.D., DENNETT M.D. and DALE I.C. 1982. Analysing daily rainfall measurements to give agronomically useful results. I. Direct methods. *Experimental Agriculture* 18: 223–236.
- STOVER R.H. 1964. Leaf spot of banana caused by *Mycosphaerella musicola*: factores influencing production of fructification and ascospores. *Phytopathology* 84 54: 1320–1326.
- STOVER R.H. 1968. Leaf spot of banana caused by *Mycosphaerella musicola*: perithecia and sporodochia production in different climates. *Tropical Agricultural (Trinidad)* 45: 1–12.

- STOVER R.H. 1971. A proposed international scale for estimating intensity of banana leaf spot (*Mycosphaerella musicola* Leach). *Tropical Agriculture (Trinidad)* 48: 185–196.
- STOVER R.H. 1972. Banana, plantain and abaca diseases. *Commonwealth Mycol. Institute Kew, Surrey, England* p. 37–89.
- STOVER R.H. 1980. Sigatoka leaf spots of bananas and plantains. *Plant Diseases* 64: 750–756.
- STOVER R.H. 1980a. Sigatoka leaf spots of bananas and plantains. *Plant Diseases* 64: 750–755.
- STOVER R.H. 1980b. Sigatoka leaf spot of banana and plantain. *Proceeding of the Sigatoka Workshop. United Fruit Co. (Honduras), Division of Tropical Research.*
- STOVER R.H. 1983. The effect of temperature on germ tube growth of *Mycosphaerella musicola* and *Mycosphaerella fijiensis* var. *difformis*. *Fruits* 38: 625–628.
- STOVER R.H. 1987. Producción de plátano en presencia de Sigatoka Negra. UPEB. Informe mensual No. 82. p. 50–56.
- STOVER R.H. 1990. Sigatoka leaf spots: Thirty years of changing control strategies:1959–1989. *In: Sigatoka leaf spot diseases of bananas. Proceedings of an International Workshop held at San José, Costa Rica, March 28–April 1, 1989. R.A. Fullerton y R.H. Stover (eds). p. 66–74.*
- STOVER R.H. and DICKSON J.D. 1976. Banana leaf spot caused by *Mycosphaerella musicola* and *M. fijiensis* var. *difformis*: A comparison of the first Central American epidemics. *FAO, Plant Protection Bulletin* 24: 36–42.
- STOVER R.H. and SIMMONDS N.W. 1987. Bananas. Third edition Singapore, Logman, Scientifics and Technical. 468 p.
- SUCKLING P.W., DAVIES J.A. and PROCTOR J.T.A. 1975. The transmission of global and photosynthetically active radiation within a dwarf apple orchard. *Canadian Journal of Botany* 53: 1428–1441.
- SUSUKI E. 1980. A summarized review of theoretical distributions fitted to climatic factors and markov chain models of weather sequences, with some examples. *In: Statistical climatology. S. Ikeda (ed.). Amsterdam, Elsevier. p. 1–20.*
- TEZENAS DU MONTCEL H. 1985. Le bananier plantain. Paris, France, Maisonneuve et Larose. 143 p.
- TROJER H. 1966. Algunas características agroclimáticas del tropico americano. Turrialba, Costa Rica, IICA. 27p .
- VAN DER WAL A.F. 1978. Moisture as a factor in epidemiology and forecasting. *In: Water deficits and plant growth. Vol.5: Water and plant disease. T.T. Kozlowski (ed.). London, Academic Press. p. 253–295.*

VARLET-GRANCHER C., GOSSE G., CHARTIER M., SINOQUET H., BONHOMME R. and ALLIARAND J.M. 1989. Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie* 9: 419-439.

WALLIN J.R. 1963. Dew, its significance and measurement in phytopathology. *Phytopathology* 53:1210-1216.

WIELEMAKER F. 1990. Practical notes on black sigatoka control. *In: Sigatoka leaf spot diseases of bananas: Proceedings of an international workshop held at San José, Costa Rica, March 28- April 1, 1989.* R. Fullerton y R.H. Stover (eds), San José, Costa Rica. p. 84-87.

YARWOOD C.E. 1959. Microclimate and infection. *In: Plant Pathology 1908-1958.* C.S. Holton *et al* (eds.) Madison, Univ. of Wisconsin Press. p. 548-556.

ZINKE P.J. 1967. Forest interception studies in the United States. *In: International Symposium on Forest Hidrology.* W.E. Sopper y H.W. Lull (eds.), Pergamon, Oxford, p 137-162.