

LUTTE INTÉGRÉE CONTRE LES RAVAGEURS (IPM) ET APPROCHE INTÉGRÉE DU PATHOSYSTÈME / *COFFEA ARABICA*

D. NANDRIS, F. KOHLER, L. MONIMEAU, F. PELLEGRIN

Centre ORSTOM, B.P. A5, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, Pacifique Sud

A. Lutte intégrée contre les ravageurs (IPM)

1) Introduction.

Pour situer la complexité des phénomènes étudiés et introduire cette revue, on peut rappeler quelques notions générales sur l'**Epidémiologie**. Cette discipline a forgé peu à peu, en moins de 30 ans, théorie, concept, et méthodologie spécifiques (Rapilly 1991). De descriptive et explicative, elle est devenue quantitative et prospective. Cette science concerne l'étude des populations de pathogènes au sein des populations de plantes-hôtes, ainsi que les maladies qui en résultent sous l'influence des interférences dues à l'environnement et à l'homme (Kranz, 1990). Les épidémies, c'est-à-dire le développement des maladies dans le temps et dans l'espace, sont des phénomènes complexes, impliquant de nombreux facteurs, comparables aux systèmes écologiques auxquels elles sont d'ailleurs intimement liées.

Les maladies et leurs épidémies doivent être considérées comme des **systèmes imbriqués de processus** caractérisés eux-mêmes par de multiples mécanismes réciproques de cause à effet, qui sont régulés par des phénomènes aléatoires, des fluctuations et des récurrences aussi bien que par des seuils et des discontinuités (Watt, 1966). Aussi, cette complexité conduit-elle à une grande diversité de schémas évolutifs qui, au sein du "carré de maladie" intégrant hôte, environnement, maladie et interférence humaine (Van der Plank, 1963), doivent être mesurés et analysés, ce qui génère généralement un important volume de données multivariées.

L'Epidémiologie concerne les maladies tant au niveau des populations que des communautés. Il s'agit donc d'une science éminemment quantitative qui requiert l'usage des mathématiques et des modèles afin de parvenir à analyser les effets et la pertinence des variables mesurées à partir des deux populations imbriquées que sont l'hôte et le pathogène et dont la résultante génère à son tour une population de lésions. Le but recherché est d'obtenir des résultats concrets utilisables efficacement en protection des cultures.

2) Diversité des agents nuisibles.

A cette évidente complexité, s'ajoute la multiplicité des agents nuisibles. Le mot anglais "pest", assez souvent réservé aux insectes ravageurs, intègre en fait tout organisme nuisible, gênant ou destructeur par rapport à une plante ou aux produits végétaux (Holliday 1989). La diversité des "agents nuisibles" est impressionnante puisqu'elle comprend les mauvaises herbes, les animaux (rongeurs, escargots), les insectes et les pathogènes (champignons, bactéries, virus, mycoplasmes). En outre, il est désormais admis que des désordres abiotiques tels que la pollution de l'air, la sécheresse, le pH du sol, ou des problèmes trophiques peuvent être adjoints à cette liste dans la mesure où ils provoquent, chez les plantes, des lésions ou des dysfonctionnements qui se traduisent par des "symptômes" et donc des "maladies" (Bos & Parlevliet 1995). Ces différents facteurs interagissent entre eux, ce qui constitue un des aspects de la complexité de l'agro-écosystème.

588



ASIC, 17^e colloque, Nairobi, 1997

Fonds Documentaire IRD

Cote : BX25363 Ex :

Devant cette diversité de catégories d'agents nuisibles, il est clair que les principes modernes de l'agriculture, comme par exemple l'implantation de cultures très homogènes au plan génétique et/ou l'usage immodéré d'engrais azotés (qui augmentent souvent la sensibilité des plantes aux maladies), sont autant de facteurs qui aggravent le potentiel de destruction des maladies (De Waard et al. 1993).

3) Contrôle chimique des maladies.

Devant cette variété de maladies menaçant l'agriculture, les méthodes de lutte, devenues totalement indispensables, demeurent très dépendantes des pesticides chimiques qui contribuent effectivement à une réduction significative des pertes de récoltes.

Malgré une efficacité démontrée, (James et al. 1993) leur contribution positive est contrebalancée par de réels effets négatifs sur l'environnement. Les plus récentes recherches en chimie analytique sur ce point ont démontré (i) que les pesticides avaient la capacité de se répandre, parfois sur de longues distances, dans le sol et dans l'eau, (ii) qu'ils avaient souvent une rémanence inquiétante, (iii) que des résidus étaient détectables dans les produits récoltés. Face à ces dangers, les industries chimiques mettent en oeuvre de gros efforts de recherche pour d'une part, tenter d'élucider le cheminement suivi par les pesticides pour se disséminer dans l'environnement, de comprendre d'autre part leurs mécanismes de dégradation et enfin pour en identifier les résidus (De Waard et al. 1993). La perception de plus en plus négative du public quant aux produits chimiques, conjuguée aux réels efforts des industries de fabrication font espérer que les nouvelles formulations atteignent des standards acceptables au plan toxicologique et environnemental.

4) Approches alternatives.

De nouvelles approches ont donc été recherchées puis adoptées pour apporter une alternative à cet usage exclusif des pesticides et pour minimiser leur impact sur l'environnement : ce sont les stratégies de "gestion intégrée des ravageurs" ou *Integrated Pest Management* (IPM), également nommée "Low Input Sustainable Agriculture" (LISA).

Selon une définition de la FAO, l'IPM représente un système de gestion des cultures qui, dans le contexte d'un environnement et d'une évolution des populations de ravageurs, utilise toutes les techniques de lutte disponibles, de la manière la plus cohérente possible, afin de maintenir le niveau des ravageurs en dessous du seuil de nuisance économique. Cette gestion rationnelle des ravageurs doit faire en sorte qu'il n'y ait pas de dépendance totale à une unique méthode de contrôle et prendre en compte les conséquences économiques, sociales et environnementales des stratégies de lutte. On comprend alors aisément que ceci ne peut être obtenu qu'au travers d'investigations résolument pluridisciplinaires pour acquérir des connaissances dans les domaines suivants :

- effets de l'homme et de l'environnement sur la culture et sur la dynamique des populations de ravageurs,
- effets des ravageurs sur la production, aux différents stades de développement de la culture,
- rentabilité économique de l'usage des méthodes de lutte,
- existence de procédures permettant l'acquisition, la synthèse et la diffusion des informations pratiques, sous une forme et des délais acceptables.

La finalité de ces approches intégrées réside dans la possibilité d'obtenir des réponses concrètes et rapides pour gérer les populations de pathogènes, si possible avant même que ne soient causés les premiers dommages.

5) Concepts et méthodologies.

Actuellement à la mode, les concepts de pertes de récoltes et de lutte intégrée ainsi que la terminologie correspondante ont subi d'importantes évolutions.

D'un point de vue historique, Zadoks (1987) rapporte que les premières enquêtes épidémiologiques nationales et internationales datent du début de ce siècle. Mais c'est sous l'impulsion des conditions dramatiques imposées par les deux guerres mondiales que la recherche agricole fut obligée de devenir efficace. Quelques chercheurs comme Moore (1952), Strickland (1953), Large (1966) *inter alia* jetèrent alors les bases des premiers véritables travaux sur les pertes de récolte et définirent des méthodologies dont beaucoup demeurent encore en vigueur. Leur contribution majeure fut de concevoir des schémas de réflexion sur les productions et sur les pertes en récolte qui établissaient les premières réglementations en matière d'agriculture à l'échelle nationale ou régionale. C'est à compter de 1967, lors du Symposium sur les pertes de récolte organisé par la FAO à Rome, que des méthodologies adaptées furent développées et que des mesures réellement pratiques furent édictées (e.g. recours aux pesticides ; timing de traitement ; conditions de récolte, de transport et de stockage).

Ultérieurement, furent développés les concepts épidémiologiques de dynamique des populations de ravageurs, de seuils de mise en oeuvre des méthodes, de prédiction de pertes, qui constituent les fondements des principes de la lutte intégrée contre les maladies et ravageurs (Stern et al. 1959, i.a.). En complément, les notions de dommage (*injury*), de dégâts (*damage*) et de pertes (*loss*) furent enfin clairement définies (Bos & Parlevliet 1995).

D'un point de vue méthodologique, différentes tendances sont à prendre en compte successivement (Kim & MacKenzie 1987).

- Une première période voit l'essor de méthodes "réductionnistes" qui, en résumé, tendent à maintenir toutes les variables constantes pour que seul le facteur étudié varie, ce qui permet d'en tester la signification. C'est alors l'analyse de variance qui fut utilisée massivement. Par exemple, pour évaluer l'effet d'engrais azotés sur la production de maïs, on s'efforce de contrôler tous les paramètres mais on en exclut les maladies. Comme le niveau d'azote affecte également la croissance des mauvaises herbes et le développement des pathogènes, le niveau de production est alors indirectement affecté, ce qui biaise l'expérimentation. Bien évidemment, pour traiter ces questions complexes, il importe de prendre en compte d'une part, plus de variables, et d'autre part, leurs interactions : ceci est inaccessible aux analyses mono-factorielles.

- De ce fait, sous l'impulsion de précurseurs comme Watt (1970), Zadoks (1971), Kranz & Hau (1980), est apparue une seconde manière de penser qui constitue la base du concept de la science des systèmes. Celle-ci postule que "le tout est plus que la somme des parties". Pour cerner un problème complexe, ce type d'approche prend en compte plutôt une combinaison de facteurs (interactions) que des facteurs individuels. En outre, cela permet d'intégrer tout le savoir existant ou, en tout état de cause, d'identifier les lacunes dans les connaissances afin de guider les recherches (Teng & Kropff 1995). Les principaux outils de la science des systèmes sont d'une part, les méthodes statistiques multivariées (Hau & Kranz 1990 ; Savary et al. 1995 ; i.a.) et d'autre part, la modélisation et la simulation qui permettent de tester les conséquences des variations sur une représentation du monde réel (Kranz 1990).

- Les fonctions de ces modèles sont diverses. Jeger et Tamsett (1983) distinguent les trois types suivants : (i) descriptif, (ii) de fonctionnement (fonction exploratoire), (iii) de prévision. La complexité d'un modèle et ses limites viennent du fait que le pathogène est influencé par l'environnement, que le statut de l'hôte est à son tour influencé par le pathogène et que l'hôte et le pathogène interagissent. Au sein d'un pathosystème, il est indispensable de spécifier les variables à étudier et de parvenir à comprendre leurs inter-relations.

Cela étant, il est important de garder à l'esprit les propos de Patten (1971) selon lesquels un modèle ne représente qu'une construction artificielle, une abstraction du monde réel, une approximation simplifiée de la réalité. Ceci implique donc qu'un modèle est rarement complet, achevé ou un objectif à lui seul. Sans ambages, Tomassone (1987) considère que tout modèle est faux et qu'il faut choisir le moins faux par rapport aux objectifs fixés.

- Une majorité de travaux de recherche se consacre encore, et uniquement, au pathogène le plus dommageable d'une culture, alors qu'une "approche synoptique" considérant, dans leur ensemble, les effets combinés des différents pathogènes sur la production est fortement recommandée (Shane & Teng 1987). Cette démarche, proposée pourtant par Stynes dès 1980, caractérise justement la voie retenue pour les recherches sur le caféier en Nouvelle-Calédonie.

Un bon exemple de l'ampleur du dispositif requis pour une approche réellement intégrée et synoptique est fourni par les travaux de Wiese (1982). Celui-ci a échantillonné 100 champs de pois aux USA en évaluant dans chacun, les ravageurs (insectes, mauvaises herbes, maladies, nématodes), le climat (grêle, gel, pluies, température), les caractéristiques du sol (nutriments, pH, topographie, texture, humidité, température), pratiques culturales (type de cultivar, rotations, pesticides, engrais, entretien). Des relevés furent effectués toutes les deux semaines pendant 4 mois. Les données obtenues ont permis la mise au point d'un modèle globalement interactif qui, sur la base de 12 variables, parvenait à expliquer 82% de la variabilité constatée *in situ*. Ces résultats n'ont pas été réellement reproductibles d'une année sur l'autre en raison de la variabilité dans le temps de la nature et de l'intensité des infestations parasitaires. Cependant, les travaux de Wiese ont eu le mérite de définir l'amplitude et la diversité des contraintes de la production en conditions d'exploitation agricole et non en station expérimentale. De ce fait, ils constituent une approche de référence pour la gestion et la lutte intégrée contre les maladies.

- Le concept d'**agriculture durable** (sustainability) ou de viabilité des agro-écosystèmes constitue désormais une composante importante dans les nouvelles approches IPM. Tous les experts s'accordent sur la nécessité de développer les recherches en "veillant à un accroissement régulier de la production agricole, tout en garantissant le maintien ou l'amélioration des ressources" (Fry 1982). La viabilité des agro-écosystèmes est en effet mise en péril par l'uniformisation des pratiques culturales, la mise en place de monocultures sur de très grandes surfaces, la mauvaise gestion des pesticides.

- Pour aboutir, il est clair que des recherches sur un thème aussi vaste ne peuvent se concevoir que dans le cadre d'**approches pluridisciplinaires** qui associent agro-pédologie, phytopathologie, physiologie végétale, amélioration des plantes, biologie moléculaire, bioclimatologie, socio-économie...

6) Caractéristiques des approches IPM

Assez généralement, la réalisation d'une stratégie d'IPM suit les étapes suivantes :

- définition de la situation agricole en intégrant tous les facteurs biotiques, physiques et socio-économiques,
- définition du profil des ravageurs, évaluation des pertes de récolte, chronique des pathogènes et analyse de leurs interrelations,
- résultats d'enquêtes et/ou d'expérimentations spécifiques visant à démontrer tel ou tel postulat suggéré par les observations de terrain,
- modèles de simulation (quantification du risque potentiel) & outils de gestion pour une mise en place rationnelle de stratégies de lutte.

L'objectif est de mettre au point des outils de gestion des contraintes agricoles. Assez généralement, de telles recherches sont réalisées tout d'abord en stations expérimentales afin de quantifier, en milieu contrôlé, les pertes de récoltes ; puis intervient une phase de terrain qui permet d'évaluer le risque en parcelles traditionnelles. Enfin, on réalise la simulation des dégâts sur la base des données acquise dans ces deux contextes. L'exemple des recherches sur le caféier dans le Pacifique tend à montrer que l'on peut aussi réaliser, en milieu traditionnel, des investigations souvent cantonnées aux stations expérimentales.

7) Diversité des techniques de lutte intégrée contre les ravageurs.

Par comparaison à l'usage exclusif des pesticides, on ne peut nier que les méthodes alternatives pour contrôler les maladies selon un concept d'IPM sont plus délicates à développer (De Waard et al. 1993). Cependant, tout en respectant les contraintes liées à l'environnement, à la santé publique et à l'économie mondiale, des approches de plus en plus sophistiquées se diversifient (Teng & Yang 1993). Il s'agit essentiellement (i) de la lutte biologique (Cook 1993), (ii) de la résistance induite, (iii) de l'engineering génétique ciblée soit sur les plantes (transgénie), soit sur les micro-organismes (transfert de gènes et biopesticides). Certaines de ces techniques sont déjà utilisées dans le cadre du caféier (Eskes et al. 1991 ; Martins & Moraes 1996 ; Quesada-Chanto & Jimenez-Ulate 1996 ; i.a.). De façon exhaustive, Reuveni (1995) fait l'inventaire des diverses techniques utilisables dans le cadre des programmes d'IPM :

- recours aux marqueurs biochimiques pour évaluer la résistance des plantes aux pathogènes,
- détection de gènes impliqués dans la résistance aux maladies,
- utilisation de l'hybridation somatique pour le transfert interspécifique d'une résistance aux maladies,
- utilisation des méthodes d'activation des mécanismes naturels de défense des plantes,
- utilisation de rhizobactéries comme fertilisants naturels,
- recours aux ennemis naturels des ravageurs, en liaison avec les pesticides,
- usage de biopesticides tels que les baculovirus, des champignons (pour le contrôle des mauvaises herbes).

8) Systèmes de prédiction.

La finalité majeure des recherches liées à l'IPM réside dans l'élaboration de systèmes de prédiction qui ont pour but d'évaluer le niveau prévisible de maladie, permettant au planteur d'initier, de manière raisonnée, une stratégie de contrôle (Johnson 1987). Sur quelles bases reposent ces systèmes de prédiction ?

- Par le passé, l'**Environnement** a été de loin le composant le plus souvent utilisé (Hyre et al. 1959). En effet, son incidence sur la maladie se fait à la fois de façon directe et indirecte. Les effets directs sont dus aux conditions physiques (température, humidité, présence d'eau libre sur les feuilles) qui influent sur la germination des spores, la pénétration puis l'infection. Plus indirectement, l'Environnement agit aussi bien sur les conditions de survie du pathogène, de sa dissémination, que tout particulièrement, sur la sensibilité de l'hôte à l'égard des agressions.

- Encore récemment, une majorité de modèles était basée sur la quantification du **pathogène**, privilégiant des relations par exemple, entre la densité d'inoculum et la maladie. Des méthodes telles que le piégeage de spores ou la détermination de la densité de pathogènes dans le sol furent très utilisées (Fry et al. 1983 ; Kushalappa & Lagesse 1981 ; i.a.).

- Il était également admis que les variations dans le temps de l'**hôte** étaient singulièrement plus faibles que celles du pathogène et de l'environnement. De ce fait, rares sont les modèles construits autour de l'hôte. Malgré tout, il est souvent intéressant de prendre en compte la phénologie de l'hôte car elle peut refléter des changements, soit du microclimat, soit de la réceptivité de l'hôte avec l'âge, soit enfin une sensibilité différentielle de la culture en fonction des périodes climatiques (Pscheidt & Stevenson 1983 ; Van der Plank 1982).

- En fait, pour optimiser la représentation d'un système biologique, on perçoit intuitivement qu'il est nécessaire d'**intégrer les trois composants** simultanément, afin de ne pas se contenter de postulats invérifiables. Pour aboutir au stade de la prédiction, trois phases sont nécessaires : analyse, synthèse et gestion du système. Sachant que l'agro-écosystème peut être subdivisé en 4 sous-systèmes (biologique, environnemental, socio-économique et technologique), que chacun d'entre eux doit être considéré à la fois individuellement et sous l'angle de ses interactions avec les autres, la complexité augmente ainsi rapidement ; seul le recours à des ordinateurs de plus en plus performants a rendu possible cette évolution (Johnson 1987). *In situ*, le choix des nombreuses variables pertinentes à retenir dépend à la fois de l'expérience et de l'intuition, comme de la capacité à pouvoir acquérir les données. Il est ensuite nécessaire de recourir à des méthodes statistiques adaptées pour hiérarchiser les variables.

L'étape finale pour la mise en oeuvre d'un système de prédiction est la synthèse de l'information au travers d'un **algorithme** afin de parvenir à une aide à la décision. Compte-tenu de la nature des facteurs régulant la maladie, du degré d'interaction entre les composants du carré de maladie et du degré de sophistication requis pour la mise en oeuvre de la méthode, quatre approches sont envisageables (Johnson 1987) :

- la prévision de maladie, qui détermine si les conditions biologiques et météorologiques favorables à l'apparition et au développement d'une maladie sont réunies (e.g. BLITECAST, MacKenzie 1981),
- la prédiction d'une infection qui évalue à l'avance, le devenir d'une maladie en se basant sur les relations

entre densité d'inoculum et intensité prévisible de la maladie (Fry 1982),

- la prévision du risque, qui prend en compte un grand nombre de facteurs pour évaluer quelle est la probabilité de développement d'une maladie. Au delà d'un seuil prédéfini, il importe d'adopter des mesures culturales ou de lutte particulières (Young et al. 1978),

- la prédiction épidémique, qui s'applique surtout à des épidémies polycycliques. Grâce à des évaluations séquentielles de la sévérité de la maladie, on prévoit l'évolution probable d'une épidémie (e.g. EPIPRE, Zadoks 1982).

9) Conclusions

Par comparaison avec la situation qui prévalait encore il y a 20 ans, il est clair que la compréhension des maladies et que les techniques pour les combattre se sont grandement améliorées. La recherche ayant généré de nouvelles stratégies et des méthodologies performantes, la lutte intégrée contre les ravageurs et les maladies représente désormais la démarche à préconiser pour concilier efficacité et innocuité.

Il faut donc s'interroger sur le peu d'utilisations pratiques des préconisations résultant de ces différentes approches... S'agit-il d'un "problème de fond" lié au manque de validation et à la défiance des professionnels quant aux prédictions issues de ces systèmes ? Ou s'agit-il plutôt d'un "problème de forme", lié à la mauvaise diffusion des informations techniques sur les services qu'ils peuvent rendre ? En tout état de cause, de nouveaux efforts doivent être entrepris afin de réaliser la compatibilité de ces systèmes avec les aspects économiques de la production et du type de dommages subis par la culture.

De façon beaucoup plus globale, il importe absolument d'améliorer l'efficacité du transfert des résultats de la recherche vers le monde paysan. Sur ce point, la situation alarmante en matière de caféiculture a été stigmatisée par Muller (1995) lors du précédent Colloque ASIC à Kyoto <<... le fossé entre une caféiculture productive donnant l'accès légitime aux biens matériels et une caféiculture rudimentaire, apanage de la pauvreté, ne fait que se creuser... Dès lors, faire de la recherche utile c'est donc assurer l'application des résultats en milieu paysan>>. Ainsi que le soulignent Nyambo et al. (1996), ceci ne peut se faire qu'au travers d'une indispensable prise en compte de la composante socio-économique, trop souvent absente de nos programmes de recherche.

Conjoncturellement, le problème devient crucial car la demande en produits des cultures de rente, et particulièrement en café, est en pleine explosion. Pour y faire face, on ne peut malheureusement pas espérer d'accroissement substantiel des disponibilités en terres cultivées. Il n'est donc pas possible de faire d'exclusive quant aux approches et aux outils concernant le contrôle des ravageurs et des maladies. Ceux-ci doivent être optimisés pour accroître la productivité des terres disponibles afin de répondre à cet accroissement des besoins. Mais en tant que scientifiques, nous ne pouvons nier que les produits et/ou les stratégies de lutte préconisés ont ou auront des effets non prévus (James et al. 1990). Il nous revient donc la responsabilité de les contrôler, en cumulant science efficace et déontologie.

B. Approche intégrée du pathosystème/*Coffea arabica*

1) Introduction

Du fait de l'importance économique du café à travers le monde et des contraintes phytosanitaires qui affectent sa culture, de nombreux travaux de recherche ont abordé la pathologie fongique du caféier sous différents aspects : biologie des agents pathogènes, épidémiologie, génétique du parasitisme, méthodes de lutte, etc. Pour *Coffea arabica*, les recherches sont consacrées dans leur grande majorité, à l'étude de la rouille due à *Hemileia vastatrix* Berk. et Br., pathogène particulièrement dommageable dans de nombreux pays producteurs (Shieber 1972 ; Eskes et al. 1991 ; Sierra Sanz et al. 1994).

En matière d'épidémiologie, de nombreux auteurs se sont intéressés aux effets des conditions environnementales sur le développement de la rouille (Pedro 1983 ; Oseguera 1985) en focalisant leurs études sur un paramètre particulier comme l'altitude des plantations (Avelino et al. 1991 ; Whan et al. 1994), l'intensité de la lumière incidente (Eskes 1982), le temps d'eau libre sur les feuilles (Nascimento et Tubelis 1980), les amplitudes extrêmes des températures au cours du cycle cultural (Schrödter 1965 ; Brown et al. 1995), l'état physiologique de l'hôte (Eskes et Toma-Braghini 1982 ; Coutinho et al. 1994), etc. Pour l'essentiel, ces recherches ont été réalisées en laboratoire et/ou en station par quantification des phénomènes épidémiques, soit dans leur globalité (Zheng Fuchong et al. 1991 ; Farrera 1994), soit en analysant successivement les différentes phases du processus épidémique (pénétration, germination, sporulation et dissémination) (Nutman et Roberts 1963 ; Villegas 1988 ; Loaisiga et al. 1996). Les acquis de ces recherches permettent de mieux comprendre le développement des épidémies de la rouille dans les zones de caféiculture.

A partir de ces travaux, des modèles prédictifs réalisés par différents auteurs (Kushalappa et al. 1984,

Becker-Raterink 1985 ; Montoya et Sierra 1993 ; i.a.) se sont attachés à intégrer les principaux paramètres influant sur le développement de la rouille. Atteignant souvent un niveau élevé de complexité pour définir les différentes étapes du processus épidémique, ils semblent difficilement transposables hors station, dans des exploitations traditionnelles.

Les recherches épidémiologiques menées depuis 1991 en Nouvelle-Calédonie (NC) sur le caféier arabica se démarquent sensiblement des travaux cités précédemment. En effet, la prise de conscience de la complexité des agro-écosystèmes tropicaux et le développement de nouvelles méthodes de traitement des données ont fait émerger un thème de recherche qui, prenant en compte les principes énoncés plus haut quant à la nécessité d'une gestion intégrée pour contrôler les maladies des plantes, privilégie l'aspect fonctionnel des relations biocénotiques existant au sein d'un "pathosystème". A ce titre, Savary et al. (1995) confirment l'intérêt d'une approche holistique d'un pathosystème intégrant des caractéristiques aussi diverses que les variations spatio-temporelles de l'intensité de maladie, des informations précises sur le sol et le climat, les itinéraires culturels et les aspects socio-économiques inhérents à la culture ; des outils statistiques appropriés contribuent à l'analyse de ces divers paramètres.

Les recherches développées sur des plantations de caféiers en NC, consistent à étudier le fonctionnement d'un pathosystème multiple associant, dans des contextes écologiques contrastés, le caféier arabica, ses principaux pathogènes fongiques (*Hemileia vastatrix*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Cercospora coffeicola*) et l'Environnement. L'intégration des caractéristiques pathologiques et environnementales des sites d'enquête, puis la modélisation de leurs interrelations permettent d'identifier et de hiérarchiser les paramètres mésologiques qui régissent l'émergence puis le développement des maladies du caféier. Cette caractérisation du déterminisme des évolutions pathologiques puis la prévision du risque épidémique sont les objectifs affichés pour l'optimisation des techniques de lutte.

2) Matériels & Méthodes

Méthodologies des enquêtes

Le dispositif d'enquête pluri-local est constitué par des sites traditionnels de caféiculture, choisis selon des critères de diversité aussi larges que possible. La distribution et la sévérité des attaques provoquées par chacun des pathogènes sont très contrastées en NC, ce qui a constitué un facteur favorisant cette étude. La démarche épidémiologique est subordonnée à deux étapes dont la rigueur conditionne la capacité ultérieure à utiliser les données acquises *in situ*.

La première consiste à réaliser un "état des lieux" le plus détaillé possible dans chaque site. Il s'avère en effet indispensable d'intégrer, dès le début des enquêtes, les multiples caractéristiques nécessaires à l'obtention, à terme, d'interprétations diversifiées. A titre d'exemple, il est nécessaire de caractériser globalement les classiques paramètres physico-chimiques d'un site ainsi que d'en quantifier l'hétérogénéité édaphique (mesures de pH et pédocomparateurs). En effet, la croissance d'un arbre sur un substrat particulier peut se traduire, par rapport à ses voisins, par un comportement particulier au plan physiologique et/ou, pathologique. De même, la position précise dans le site et la pérennité des arbres et des rameaux, la description précise de chaque rameau se révèlent ultérieurement comme des indicateurs précieux pour étudier l'évolution des mécanismes.

La seconde étape a consisté à réaliser un suivi mensuel durant tout le cycle cultural du caféier et ce, pendant plusieurs années consécutives ; ce continuum des relevés permet d'analyser les situations épidémiologiques dans la durée en dégagant les grandes tendances et en minimisant l'effet des impondérables conjoncturels. Des procédures particulières d'enquêtes (suivi feuille-à-feuille,...) et de caractérisation de l'environnement par acquisition automatique de données météorologiques ont été mises au point ou adaptées (Lamouroux et al. 1995). A ce titre, l'importance du facteur humain dans la fiabilité des observations de terrain doit être absolument prise en compte dès l'origine, faute de quoi, la variance inter-observateurs peut masquer la variance biologique recherchée.

Gestion des données

Ces données brutes caractérisant les contextes étudiés ainsi que les informations épidémiologiques accumulées au cours du temps génèrent des fichiers informatiques de taille importante (p.m. plus de 40.000 données par mois dans le cadre de cette étude). Le stockage et la gestion des données pathologiques ou environnementales ont été réalisés avec la base de données ORACLE. Grâce à un ensemble de requêtes SQL (Structured Query Language), on obtient alors des tableaux de données synthétiques. Ces requêtes permettent de moduler le niveau d'analyse à une échelle de précision croissante : position des feuilles sur le rameau, sélection de patrimoines de feuilles de même âge (afin de servir de bases à des analyses rigoureuses de durée de cycle infectieux, d'évolution de la gravité des symptômes durant la période d'infection,...), position et/ou âge des rameaux, études interarbres (intrasite) et intersites, etc.

L'interprétation statistique de ces données est réalisée avec le logiciel ADE-4 (Analyses multivariées et expression graphique des Données Environnementales) développé à Lyon par Thioulouse, Chessel, Dolédec & Olivier (1997) ; les nouveaux modules de statistiques multivariées complexes se sont révélés particulièrement bien adaptés à la dimension spatio-temporelle de la problématique "caféier".

3) Résultats

Typologies & Costructure Pathologie/Environnement

La répétition dans le temps des observations génèrent des fichiers de données de type cubique (variables x sites x dates d'observation) dont l'analyse simultanée (et non, date par date) est assez particulière (Pellegrin et al 1995). Pour de tels fichiers constitués de tableaux successifs, le module Statico établit, entre autre, un "compromis" révélant les structures communes aux différentes dates pour obtenir une typologie claire des sites d'enquêtes en fonction, soit de leurs caractéristiques édaphiques, soit des dommages pathologiques. Il est important de signaler que, malgré des climatologies variant d'une année à l'autre, la position statistique de ces sites sur le plan du "compromis" évolue peu. Ceci entérine d'une part, la fiabilité des observations mensuelles et confirme d'autre part, la stabilité, dans chaque site, de l'expression des interactions entre le caféier et ses pathogènes.

De façon complémentaire, il est possible d'établir la costructure de ces deux "cubes" de données Pathologie et Environnement, en maximisant à chaque relevé leur covariance, puis en estimant la stabilité de la relation entre ces deux groupes de variables. Cette analyse recherche les combinaisons de variables (ou axes de co-inertie) qui expriment la co-variation temporelle (succession des observations) et la costructure spatiale existant entre les nuages de points représentant les données. La projection de ces variables sur des axes définit des plans précisant les liens entre les deux cubes de données. Les combinaisons de variables ainsi identifiées mettent en évidence des tendances significatives originales (Pellegrin et al 1995) : on retiendra par exemple que la rouille s'exprime préférentiellement dans des sites caractérisés par des sols mal structurés, peu fertiles, un pH faible, par de faibles pluies, des températures minimales relativement basses, un taux d'ombrage important et une altitude élevée. Malgré de fortes variations, d'une année à l'autre, de la pression parasitaire caractérisant certains sites et malgré la diversité des conditions climatiques enregistrées depuis 1992, les analyses de fichiers pluriannuels (sur 4 années) indiquent le rythme d'expression de ces liaisons et confirment bien la réalité de ce déterminisme.

Les tendances majeures résultant des précédentes interprétations ont servi de base à la réalisation d'une première modélisation visant à prédire le niveau de maladie. Bien que des valeurs significatives aient été obtenues, cette première approche statistique (analyse discriminante & bootstrap, sur moyennes annuelles) n'a pas été retenue car elle faisait abstraction de la cinétique épidémique.

Optimisation du modèle

Au terme de cette première phase des recherches, on pouvait considérer que les grandes tendances régissant le fonctionnement du pathosystème caféier étaient identifiées. Il est apparu cependant nécessaire de détailler ces mécanismes épidémiques en étudiant leur variabilité, qui s'exprime à la fois par une certaine hétérogénéité du comportement des arbres d'un même site et par des fluctuations annuelles des cinétiques épidémiques de certains sites. Aussi, pour renforcer la cohérence des approches épidémiologiques, des améliorations ont été recherchées à trois niveaux :

a) **Un premier niveau** a été consacré à l'évaluation de la part de variabilité imputable à : (i) la diversité génétique des populations d'agents pathogènes, afin de savoir si les différences d'infestations constatées *in situ* reflètent des potentialités différentes de l'agent causal, (ii) une diversité génétique des arbres, avec pour conséquence une plus ou moins forte sensibilité aux maladies, (iii) une possible infestation des sols en nématodes phytoparasites, susceptibles dans ce cas d'affecter gravement la physiologie du caféier.

- **Analyse des populations d'*H. vastatrix***. En premier lieu, grâce au concours du Dr. Rodrigues (CIFC, Portugal), la distribution spatiale des races a été précisée en NC : la race II est prédominante dans la majorité des sites étudiés, mais une cohabitation avec la race I ou III existe dans certaines parcelles.

De façon complémentaire, des travaux de biologie moléculaire sont en cours afin de prendre en compte les fluctuations spatio-temporelles du pathogène. Le caractère microcyclique de cette Urédinale strictement biotrophe, qui ne possède pas de reproduction sexuée connue et dont seules les urédospores semblent participer au cycle de développement, a nécessité des mises au point techniques particulières. Les différentes voies explorées (PCR-RFLP, RAPD) ont globalement infirmé l'existence d'une diversité entre les sites étudiés. En revanche, les premiers essais d'amorces amplifiant des régions extragéniques répétées (REP) du génome indiquent un certain polymorphisme intersite. Ces expérimentations se poursuivent pour parvenir à la mise au point d'un outil pratique de typage rapide des rouilles collectées sur le terrain.

- **Analyse des populations de *C. gloeosporioides*** (isolé de lésions foliaires). Cette approche, initialement pluri-méthodologique (zymogrammes, VCG, RAPD), a été recentrée sur la seule RAPD. Une structuration des populations a été mise en évidence alors que des souches intrasites provenant d'arbres voisins sont globalement homogènes. L'hypothèse retenue pour justifier cette importante diversité génétique intersites conduit à envisager un taux élevé de recombinaisons obtenu par reproduction sexuée.

- **Diversité intra- et interspécifique des caféiers**. Grâce au concours de P. Lashermes & P. Trouslot (LRGAPT, ORSTOM-Montpellier), une analyse systématique du génome des caféiers des sites de l'enquête a été réalisée par RAPD. Au sein des arabica suivis depuis 1992, la présence simultanée des variétés Bourbon et Typica ainsi que l'existence d'hybrides intraspécifiques de ces deux variétés ont été démontrées. Ce typage génétique des arbres est désormais pris en compte pour préciser les modalités de comportement particulier de ces catégories.

Les caractéristiques climatiques très particulières de NC autorisent la culture simultanée de plants d'arabica

et de robusta à la même altitude, voire dans une même parcelle. L'existence de nombreux arabica ayant acquis des caractères "robustoïdes", particulièrement la résistance à la rouille, a été démontrée par le CIRAD et l'ORSTOM. Ces hybrides "Timor-like" représentaient, en matière d'épidémiologie, une source potentielle d'hétérogénéité qu'il importait également d'évaluer. Les analyses par RAPD ont démontré l'absence d'hybride interspécifique au sein des arbres de l'enquête. Ceci confirme que la moindre sensibilité à la rouille de certains de ces arbres n'est pas due à une acquisition de caractères "robustoïdes".

- **Physiologie des caféiers.** Outre l'aspect strictement métabolique qui est abordé, pour partie, au travers des pédocomparateurs et de l'évaluation de l'hétérogénéité édaphique de chaque site, différents facteurs externes peuvent influencer sensiblement sur la physiologie des arbres et partant, sur leur sensibilité aux maladies fongiques.

En particulier, l'infestation du système racinaire par des nématodes phytoparasites est connue - particulièrement en Amérique latine - pour constituer une contrainte majeure affectant le caféier arabica. (Bertrand et al. 1995). Grâce à la collaboration de J.L. Sarah (Nématologie, CIRAD-Montpellier), un inventaire nématologique a pu être réalisé pour tous les sites du dispositif. Au terme de deux échantillonnages réalisés à 6 mois d'intervalle, les comptages réalisés sur des prélèvements de terre et de racines révèlent une infestation généralement réduite dans la grande majorité des sites. Globalement, il apparaît donc légitime de s'affranchir, dans le cas des sols calédoniens, de la contrainte nématologique.

b) Le second niveau concerne l'optimisation des données épidémiologiques et mésologiques en élaborant de nouvelles variables plus discriminantes et en analysant des sous-fichiers catégoriels plus homogènes.

- Grâce aux capacités de gestion d'ORACLE, il a ainsi été possible de calculer, dans chaque site, la durée moyenne de vie des catégories de feuilles saines ou infectées par tel ou tel pathogène. Pour les feuilles malades, ce paramètre - lié à la prise en compte (feuille par feuille...) des périodes d'infection initiale puis de mortalité - est précieux puisqu'il reflète le pouvoir pathogène, mesuré directement *in situ*, en s'affranchissant d'expérimentations de stations ou en serre. Bien que la variance intersites soit forte, ceci donne néanmoins un aperçu original quant aux potentialités réelles d'agression de chacun des trois pathogènes. Ainsi, par comparaison avec un ensemble de feuilles saines (250 jours de vie, en moyenne), *C. coffeicola* apparaît nettement comme le plus dommageable des trois pathogènes (durée < 60j.). Pour la rouille, la durée moyenne de cycle infectieux sur les feuilles est de 80 jours alors que pour l'anthracnose, la survie des feuilles infestées est d'au moins 170 jours, ce qui dénote une faible agressivité à l'égard de l'hôte. Dans le même ordre d'idée, il a été possible d'établir que les co-infections impliquant rouille puis anthracnose (ou l'inverse), ne contribuent pas réellement à accentuer le processus parasitaire. Enfin, comme ces durées moyennes de cycle infectieux sont relativement stables d'une année à l'autre, il y a lieu de penser que ces valeurs sont représentatives du comportement pathogénique.

- Après une procédure de tri, on obtient des informations détaillées sur l'état sanitaire et la production de chacun des arbres d'un site, ainsi que sur l'évolution de ces deux indicateurs au cours de cycles culturels successifs. Ces paramètres pouvant être croisés à leur tour, par exemple, avec la nature de la variété de caféier utilisée, on obtient alors différents sous-fichiers de plus en plus homogènes dont l'analyse peut améliorer la description des mécanismes du pathosystème.

- De même, les informations climatiques enregistrées depuis 1992 sont optimisées en recherchant aussi bien les périodes de contraintes bioclimatologiques pour chaque pathogène (e.g. extrêmes de température, abondance des pluies ayant un pouvoir lessivant sur les spores, ou déclenchant au contraire la germination) que les contraintes physiologiques de l'hôte (e.g. effet du pF, anoxie racinaire ou stress hydrique ; ...).

c) Le troisième niveau a trait à l'optimisation des outils statistiques. A cet égard, l'évolution du logiciel (ADE-3, puis ADE-4) et la création de modules spécifiques comme "Statico" sont allées de pair, grâce au soutien de l'équipe de D. Chessel (Univ. Lyon1), avec la définition des problèmes biométriques. Cette adaptabilité constitue sans aucun doute une caractéristique et un atout majeurs d'ADE-4.

Sur la base des facteurs édaphiques et climatiques identifiés impliqués dans le fonctionnement du pathosystème, les efforts se portent depuis 1996, en collaboration avec l'Université de Lyon1, sur la conception d'un nouvel outil statistique de prédiction, dans un contexte donné, du niveau de sévérité des maladies et du type de cinétique correspondant.

Pour ce faire, plusieurs pistes théoriques ont été explorées et particulièrement, une adaptation de la méthode de régression PLS (partial least squares) proposée en chimiométrie et dont elle est devenue un standard méthodologique (Tenenhaus et al. 1995). Sous le nom de "PLS de deuxième génération" ou PLSgen2, cette régression multivariée particulière permet : (i) de prédire l'ensemble des variables à expliquer par l'ensemble des variables explicatives, soit de façon univariée (PLS1) soit de façon multivariée (PLS2), (ii) d'analyser les relations entre deux tableaux de données même quand le nombre d'observations est inférieur à celui des variables, (iii) de conserver dans le modèle toutes les variables explicatives importantes même lorsque celles-ci sont fortement corrélées entre elles, (iv) d'obtenir des équations de régression cohérentes avec les coefficients de corrélation. Appliquée aux données du pathosystème caféier, la PLSgen2 a donné des résultats satisfaisants en terme de prédiction du niveau de maladie sur caféier. Toutefois, les résultats des différentes régressions PLS semblent plutôt orienter la modélisation vers des processus univariés, avec d'éventuelles interactions entre les différents pathogènes.

4) Conclusions

Les résultats de ces modules complémentaires concernant le diversité de l'hôte et de ses pathogènes, la définition de nouvelles variables pathologiques et bioclimatiques, l'homogénéisation des fichiers de données par focalisation sur des sous-ensembles plus homogènes sont autant de facteurs de clarification, qui après agrégation à l'ossature du modèle, permettent désormais d'augmenter aussi bien les coefficients de corrélation entre les caractéristiques pathologiques et environnementales, que le taux de résolution des prévisions du niveau de sévérité des attaques fongiques sur caféier. L'intégration de ces divers éléments débouche maintenant sur la phase de synthèse finale de ce programme.

Pour une gestion intégrée des maladies fongiques du caféier, ces études ont été résolument conçues de façon synoptique, systémique, trans-disciplinaire & pluri-méthodologique. Elles ont fait l'objet de multiples collaborations qui ont contribué à la cohérence du développement du programme.

Cet ensemble de procédures épidémiologiques et d'outils informatiques fait maintenant l'objet d'une diffusion et de formations à l'échelle régionale. Mais il devrait pouvoir également intéresser d'autres équipes qui, travaillant sur d'autres pathogènes (e.g. CBD) ou sur des ravageurs du caféier (scolyte, nématodes), souhaiteraient appréhender, dans de bonnes conditions, la complexité biologique de leur propre pathosystème.

Bibliographie

- AVELINO, J., MULLER, R.A., CILAS, C., VELASCO-PASCUAL, H., 1991 : Développement et comportement de la rouille orangée du caféier (*Hemileia vastatrix*) dans des plantations en cours de modernisation, plantées de variétés naines, dans le sud-est du Mexique. *Café Cacao Thé*, vol. XXXV, n°1, 21-37.
- BECKER-RATERINK, S., 1985 : Epidemiology and Control of Coffee Leaf Rust in Latin America. *Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent*, 50/3b, 1119-1123.
- BERTRAND, B., ANZUATO, F., PENA, M.X., ANTHONY, F., ESKES, A.B., 1995 : Genetic improvement of coffee for resistance to root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) in Central America. ASIC 16th International Scientific Colloquium on coffee, 630-636.
- BOS, L., PARLEVLIEF, J.E., 1995 : Concept and terminology on plant/pest relationships : toward consensus in plant pathology and crop protection. *Ann. Rev. Phytopathol.* 33, 269-102.
- BROWN, J.S., KENNY, M.K., WHAN, J.H., MERRIMAN, P.R., 1995 : The effect of temperature on the development of epidemic of coffee leaf rust in Papua New Guinea. *Crop Protection*, 14 (8), 671-676.
- COOK, R.J., 1993 : Making greater use of introduced microorganisms for biological control of plant pathogens. *Ann. Rev. Phytopathol.* 31, 53-80.
- COUTINHO, T.A., RUKENBERG, F.H.J., ASCH, M.A.J. VAN, 1994 : The effect of the leaf age on infection of *Coffea* genotype by *Hemileia vastatrix*. *Plant Pathology*, 43 (1), 97-103.
- DE WARD, M.A. et al., 1993 : Chemical control of plant diseases : problems and prospects. *Ann. Rev. Phytopathol.* 31, 403-421.
- ESKES, A.B., 1982 : The effect of light intensity on incomplete resistance of coffee to *Hemileia vastatrix*. *Neth. J. Pl. Path.* 88, 191-202.
- ESKES, A.B., and M. TOMA-BRAGHINI, 1982 : The effect of leaf age on incomplete resistance of coffee to *Hemileia vastatrix*. *Neth. J. Pl. Path.* 88, 219-230.
- ESKES, A.B., MENDES, M.D.L., ROBBS, C.F., 1991 : Laboratory and field studies on parasitism of *Hemileia vastatrix* with *Verticillium lecanii* and *V. leptobactrum*. *Café Cacao Thé*, vol. XXXV, n°4, 275-282.
- ESKES, A.B., MENDES, M.D.L., ROBBS, C.F., 1991 : Laboratory and field studies on parasitism of *Hemileia vastatrix* with *Verticillium lecanii* and *V. leptobactrum*. *Café Cacao Thé*, vol. XXXV, n°4, 275-282.
- FARRERA, P.R.E., 1994 : Comparison of monomolecular, logistic and Gompertz functions to describe the development of coffee rust. *Fitopatologia Venezolana*, 7 (2), 36-41.
- FRY, W.E., 1982 : Principles of plant disease management. New York/London : Academic Press. 378 p.
- FRY, W.E., APPLE, A.E., BRUHN, J.A., 1983 : Evaluation of potato late blight forecasts modified to incorporate host resistance and fungicide weathering. *Phytopathology*, 73, 1054-1059.
- HAU, B., KRANZ, J., 1990 : Mathematics and statistics for analysis in epidemiology. in *Epidemics of Plant Diseases, Mathematical Analysis and Modeling*. 12- 52, Kranz J., Springer-Verlag. 268 pp.
- HOLLYDAY, P., 1989 : A dictionary of plant pathology. Cambridge Univ. Press. 369 pp.
- HYRE, R.A., BONDE, R., JOHNSON, B. 1959 : The relation of rainfall relative humidity and temperature to late blight in Maine. *Plant Dis. Rep.*, 43, 51-54.
- JAMES, J.R., TWEEDY, B.G., NEWBY, L.C., 1993 : Effort by industry to improve the environmental safety of pesticides. *Ann. Rev. Phytopathol.* 31, 423-439.
- JEGER, M.J., TAMSETT, J., 1983 : The status of models in crop protection : an analysis using data base systems. *W.P.R.S. Bulletin*, VI-2, 57-76.
- JOHNSON, K.B., 1987 : The role of predictive systems in disease management. in *Crop loss assessment and pest management*. Teng Ed. APS Press St Paul, Minnesota. 176-190.
- KIM, C.H., MACKENZIE, D.R., 1987 : Empirical models for predicting yield loss caused by a single disease. in *Crop loss assessment and pest management*. Teng Ed. APS Press, 126-132.
- KRANZ, J., 1990 : *Epidemics of Plant Diseases, Mathematical Analysis and Modeling*. Kranz.Springer-Verlag. 268 pp.

- KRANZ, J., HAU, B., 1980 : Systems analysis in epidemiology. *Ann. Rev. Phytopathol.* 18, 67-83.
- KUSHALAPPA, A.C., AKUTSU, M., OSEGUERA, S.H., CHAVES, G.M., MELLES, C.A., MIRANDA, J.M., BARTOLO, J.F., 1984 : Equations for predicting the rates of coffee rust development based on net survival ratio for monocyclic process of *Hemileia vastatrix*. *Fitopatol. Bras.*, 9, 255.
- KUSHALAPPA, A.C., LAGESSE, R.M., 1981 : LEAFAL : A computer program for quantitative analysis of leaf fall in coffee, principally from rust. *Phytopath. Z.*, 101, 97-105.
- LAMOUREUX, N., PELLEGRIN, F., NANDRIS, D., KOHLER, F., 1995 : The *Coffea arabica* fungal pathosystem in New Caledonia : Interaction at two different spatial scales. *J. Phytopathology*, 143, 403-413.
- LARGE, E.C., 1966 : Measuring plant disease. *Ann. Rev. Phytopathol.* 4, 9-28.
- LOAISIGA, G., GUTIERREZ, G.Y., MONTERROSO, S.D., 1996 : Epidemiology and production of *Coffea-Hemileia* pathosystem. *Manejo Integrado de Plagas*, 41, 1-7.
- MACKENZIE, D.R., 1981 : Scheduling fungicide applications for potato late blight with BLITECAST. *Plant Dis.*, 65, 394-399.
- MADDEN, L., PENNYPACKER, S.P., MACNAB A.A., 1978 : FAST, a forecast system for *Alternaria solani* on tomato. *Plant Dis.*, 68, 1354-1358.
- MARTINS, E.M.F., MORAES, W.B.C., 1996 : Development of *Hemileia vastatrix* in coffee plants with genetic or induced resistance. *Journal of Phytopathology*, 144 (11-12), 519-526.
- MONTOYA, E.C., SIERRA, C.A., 1993 : A study of a simulation model of rust on coffee in Colombia : mathematical development and implementation of the model. *Fitopatologia Colombiana*, 17 (1-2), 2-11.
- MOORE, W.C., 1952 : Introduction "Plant Pathology", *Plant. pathol.* 1:1.
- MULLER, R.A., 1995 : Quelques réflexions sur l'avenir de la caféiculture (L'impact possible de la recherche sur le secteur productif). Kyoto, ASIC 16ème Colloque Scientifique International sur le Café, 503-513.
- NASCIMENTO, F.J.L. do, TUBELIS, A., 1980 : Leaf in low-pruned and high-pruned coffee trees. *Turrialba*, 30 (1), 93-98.
- NUTMAN, F.J., ROBERTS, F.M., 1963 : Studies on the biology of *Hemileia vastatrix*. *Berk & Br. Trans. Br. Mycol. Soc.*, 46, p.27.
- NYAMBO, B.T., MASABA, D.M., HAKIZA, G.J., 1996 : Integrated pest management of coffee for small-scale farmers in East Africa : needs and limitations. *Integrated Pest Management Review*, 1 (3), 125-132.
- OSEGUERA, S., 1985 : Effect of biological and climatic factors on the development of coffee rust (*Hemileia vastatrix*). *Semana Científica, Universidad de Honduras, La Ceiba (Honduras)*, p.10.
- PATTEN, B.C., 1971 : Introduction to modeling. In : Patten, B.C. (ed) *Systems analysis and modeling in ecology*. Vol 1, Academic Press, London- New York, p3.
- PEDRO, Jr M.J., 1983 : Effects of meteorological Factors on the Development of Coffee Leaf Rust. *EPPO Bull.*, 13 (2), 153-155.
- PELLEGRIN, F., NANDRIS, D., WESTRELIN, S., KOHLER, F., 1995 : Situation pathologique des arabica en Nouvelle-Calédonie, corrélations entre pathogénèse et environnement. ASIC 16th International Scientific Colloquium on Coffee, 690-698.
- PSCHIEDT, J.W., STEVENSON, W.R., 1983 : Forecasting and control of potato early blight caused by *Alternaria solani*, in Wisconsin. *Phytopathology*, 73, 804.
- QUESADA-CHANTO, A., JIMENEZ-ULATE, F., 1996 : *In vitro* evaluation of *Bacillus* sp. for biological control of the coffee phytopathogen *Mycena citricolor*. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 12 (1), 97-98.
- RAPILLY, F., 1991 : L'Épidémiologie en pathologie végétale - Mycoses aériennes. INRA, 318 pp.
- REUVENI, R., 1995 : Novel approaches to integrated pest management. Boca Raton, USA, Lewis Publishers, 369 pp.
- SAVARY, S., MADDEN, L.V., ZADOKS, J.C., KLEIN-GEGBINCK, H.W., 1995 : Use of categorical information and correspondence analysis in plant disease epidemiology. *Advances in Botanical Research*, 21, 214-240.
- SAVARY, S., MADDEN, L.V., ZADOKS, J.C., KLEIN-GEGBINCK, H.W., 1995 : Use of categorical information and correspondence analysis in plant disease epidemiology. *Advances in Botanical Research*, 21, 214-240.
- SCHIEBER, E., 1972 : Economic impact of coffee rust in Latin America. *Ann. Rev. Phytopath.*, 10, 491-510.
- SCHRÖDTER, H., 1965 : Methodisches zur Bearbeitung Phytometeoropathologischer Untersuchungen, dargestellt am Beispiel der Temperaturrelation. *Phytopathol. Z.*, 43, 154-166.
- SHANE, W.W., TENG, P.S., 1987 : Generating the database for disease-loss modeling. *in* Crop loss assessment and pest management. Teng Ed. APS Press, 82-89.
- SIERRA SANZ, C.A., MONTOYA RESTREPO, E.C., 1994 : Control of coffee rust based on natural infection levels and its effects on production. *Fitopatologia Colombiana*, 18 (1-2), 14-22.
- STERN, V.M., et al., 1959 : The integrated control concept. *Hilgardia*, 29, 81-101.
- STRICKLAND, A.H., 1953 : Pest assessment work in England and Wales, 1946-1951. *Plant. Pathol.*, 2, 78-79.
- STYNES, B.A., 1980 : Synoptic methodologies for crop loss assessment. *in* Crop loss assessment, Ed. P.S. Teng, S.V. Kruva, Univ. of Minn. Agric. Exp. Stn., St Paul, 166-175.
- TENENHAUS, M., GAUCHI, J.P., MENTARDO, C., 1995 : Régression PLS et applications. *Revue de Statistique Appliquée*, 53 (1), 7-63.
- TENG, P.S., KROPFF, M.J., 1995 : Systems approaches for agricultural development. IRRI, 2nd International Symposium, Los Baños.
- TENG, P.S., YANG, X.B., 1993 : Biological impact and risk assessment in plant pathology. *Ann. Rev. Phytopathol.* 31, 495-521.
- THIOULOUSE, J., CHESSEL, D., DOLEDEC, S., OLIVIER, J.M., 1997 : ADE-4 : a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing*, 7 (1), 75-83.
- TOMASSONE, R., 1987 : Un essai de synthèse. *in* Modélisation et Protection des Cultures. C.R. Acad. Agric. Fr., 73 (7), 187-192.

- VAN DER PLANK, J.E., 1963 : Plant diseases : epidemics and control. Academic Press, London- New York.
- VAN DER PLANK, J.E., 1982 : Host-pathogen interactions in plant disease. Academic Press, London- New York.
- VILLEGAS, G.C., BAEZA-ARAGON, C.A., 1988 : Factores naturales que intervienen en la diseminacion de esporas de *Hemileia vastatrix* Berk. y Br.. CENICAFE, 111-126.
- WATT, K.E.F., 1966 : The nature of systems analysis. *in* Watt K.E.F., (eds) Systems analysis ecology. Academic Press, London- New York, p1.
- WATT, K.E.F., 1970 : The systems point of view in pest management. In Concepts of pest management. Eds, Rabb, R.L., Raleigh, North Carolina State Univ. Press. 242 pp.
- WHAN, J.H., BROWN, J.S., KENNY, M.K., MERRIMAN, P.R., 1994 : Development of strategies to control coffee leaf rust in Papua New Guinea. PNG coffee, 10 (1), 6-10.
- WIESE, M.V., 1982 : Crop management by comprehensive appraisal of yield determining variables. Ann. Rev. Phytopathol. 20, 419-432.
- YOUNG, H.C., PRESCOTT, J. M., SAARI, E.E., 1978 : Role of disease monitoring in preventing epidemics. Ann. Rev. Phytopathol., 16, 263-285.
- ZADOKS, J.C., 1971 : Systems analysis and the dynamics of epidemics. Phytopatology, 61, 600-610.
- ZADOKS, J.C., 1984 : EPIPPE, a computer-based scheme for pest and disease control in wheat. *in* Cereal Production, ed. E.J. Galagher, 215-225, London, Butterworths, 254 pp.
- ZADOKS, J.C., 1987 : Rationale and concepts of crop loss assessment for improving pest management and crop protection. *in* Crop loss assessment and pest management. Teng Ed. APS Press, St Paul, Minnesota. 1-5.
- ZHENG FUCHONG, WANG ZHENGZHONG, LIN KONGXUN, 1991 : Spacial Dynamic of Coffee Rust. Chinese J. of Trop. Crops, 12 (1), 75-83.