

UTILISATION DES MODÈLES POUR L'ÉTUDE DES RELATIONS PLANTE-RAVAGEUR EN PROTECTION DES CULTURES

Olivier BONATO

ORSTOM / IITA Plant Health Management Division
B.P. 08-0932 Cotonou, Bénin

Résumé

*La gestion d'un agrosystème requiert une connaissance approfondie des relations qui existent entre une plante et son ravageur. Les modèles fondés sur des relations occasionnelles décrivent généralement une situation dans laquelle le dégât provoqué est représenté de manière qualitative (relation occasionnelle entre le miride polyphage *Psallus ambiguus* et le pommier). Les modèles qui considèrent les flux de matériel peuvent être séparés en deux grands types : ceux fondés sur des relations bivariées (influence de l'attaque du borer du riz *Maliarpha separatella* sur le rendement) et ceux pour lesquels les relations sont multivariées (le coton et ses ravageurs *Anthonomus grandis*, *Heliothis zea* et *Dysaphis plantaginea*). Les relations multivariées tiennent compte de la dynamique des populations du phytophage et de la formation du rendement dans un mode plus explicite que les relations bivariées. Les deux premiers exemples présentent l'avantage d'être facilement utilisables en protection des cultures. Les modèles de simulation (manioc et acariens vert et rouge) sont les seuls à tenir compte de la dynamique d'une population ayant une structure d'âge variable dans le temps et dans un environnement non constant. L'application de tels modèles de simulation ne peut se faire directement dans la pratique phytosanitaire; en revanche leur utilisation permet l'étude de la gestion des agrosystèmes et donc l'élaboration de stratégies de lutte contre un ou plusieurs phytophages.*

Introduction

Jusqu'au début des années 1970, la protection des cultures se limitait à l'étude des moyens de lutte contre les ravageurs. Depuis, les méthodologies se sont orientées vers l'approfondissement de la connaissance de l'agrosystème, c'est-à-dire de la dynamique des organismes associés à la culture pour essayer d'élaborer des stratégies de contrôle et de gestion. Le développement de programmes de lutte intégrée a motivé l'intégration des principes d'analyse des systèmes dans la recherche agronomique (HUFFAKER & CROFT, 1976). Dans ce type d'approche, la culture est considérée comme un système de production (agrosystème) composé de populations animales (phytophages, prédateurs ou parasitoïdes) et végétales (tiges, feuilles, fruits, racines) appartenant à des niveaux trophiques différents. Ces populations se développent sous l'influence de variables directrices et interagissent.

Dans cette présentation nous nous intéresserons à la relation particulière qui existe entre une plante et un phytophage. Devenue indissociable du concept de lutte intégrée depuis son introduction en protection des cultures (STERN *et al.*, 1959), cette relation est basée sur la notion de seuil économique et de quantification de perte de rendement.

La quantification du taux de perte, qui servait initialement à justifier l'utilisation de pesticides, a permis le développement de divers modèles dont le degré de complexité est fonction du niveau de connaissance du système considéré. Les applications de ces modèles vont de la simple recommandation d'interventions phytiaitriques à l'étude et à la recherche de solutions complexes pour une gestion optimale des agrosystèmes.

Le but de cette présentation n'est pas de discuter de manière approfondie chaque modèle mais plus simplement de donner une idée globale des différents types de modèles utilisés pour l'étude des relations plante-ravageur à l'aide d'exemples.

Modèle basé sur des relations occasionnelles

Ce type de modèle permet de caractériser qualitativement un dégât occasionné par un ravageur. L'insecte étudié est généralement polyphage et se nourrit sur d'autres végétaux. La relation qu'il entretient avec la plante n'est donc qu'occasionnelle. On peut citer à titre d'exemple les travaux de SCHAUUB *et al.* (1988) qui concernent les dégâts commis par le miride *Psallus ambiguus* Fall. sur la variété de pommier « Glockenapfel » dans une région de la Suisse orientale (fig. 1). La relation entre la dynamique des populations du psylle et le dégât (déformation superficielle du fruit) peut être décrite de la manière suivante :

$$\log_{10}(q) = a_0 + a_1 N \quad \text{éq. [1]}$$

q = proportion de fruits non attaqués,

a_0 , a_1 = coefficients de régression,

N = densité de psylles estimée avec la technique du battage.

Ici l'étude de la dynamique des populations de l'insecte et de la formation du rendement se limite à la période pendant laquelle l'équation 1 est validée. Cette relation est à la fois statique et réductrice car elle ne concerne que le moment relatif à la formation du rendement. Bien que les informations apportées par ce type de modèle soient très facilement transférables en protection phytosanitaire, le domaine de validité pour l'utilisation de cette relation est fortement lié aux erreurs inhérentes à l'estimation des paramètres. Les résultats obtenus sur deux années montrent que cette erreur, qui est étroitement dépendante de la façon d'échantillonner, ne fait qu'augmenter l'incertitude de la décision à prendre. Dans l'exemple présenté (fig. 1), le producteur préférera faire un traitement chimique préventif plutôt que de prendre un risque qui peut devenir lourd de conséquences.

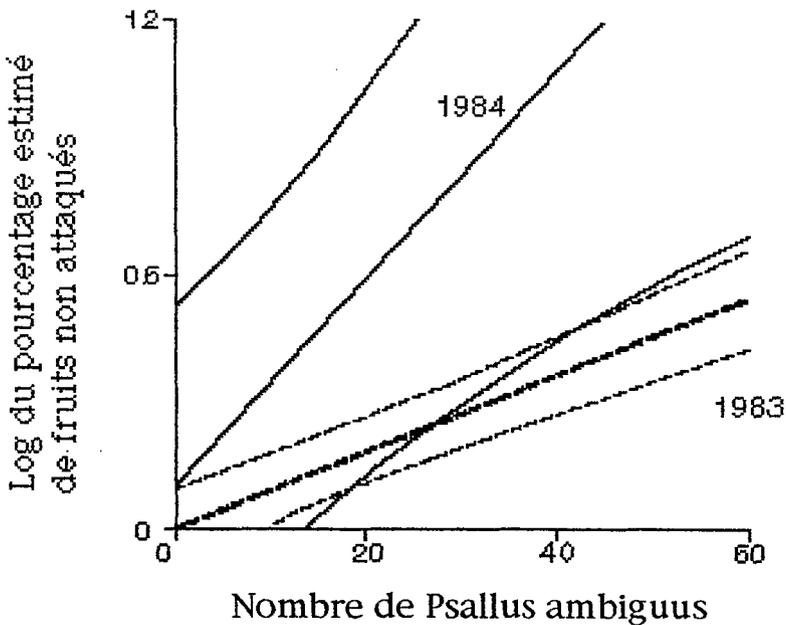


Figure 1

Relation entre fruits sains (non attaqués) et densité du miride *Psallus ambiguus* (SCHAUB *et al.*, 1988)

Modèle basé sur des flux de matériel

Modèle statistique simple (relations bivariées)

Ce type de modèle permet de caractériser quantitativement un dégât occasionné par un ravageur. Prenons le cas de la pyrale du riz, *Maliarpha separatella* Rag., dont le développement des stades larvaires à l'intérieur des tiges agit sur la formation et la production des grains de riz (fig. 2). L'interaction entre la pyrale et le rendement peut s'écrire :

$$Y = 1 - \frac{1}{p_1 + p_2 \cdot \exp(-p_3 \cdot IN)} \quad \text{éq. [2]}$$

Y = rendement,

P_1, P_2, P_3 = coefficients d'ajustement,

IN = pourcentage d'infestation des tiges.

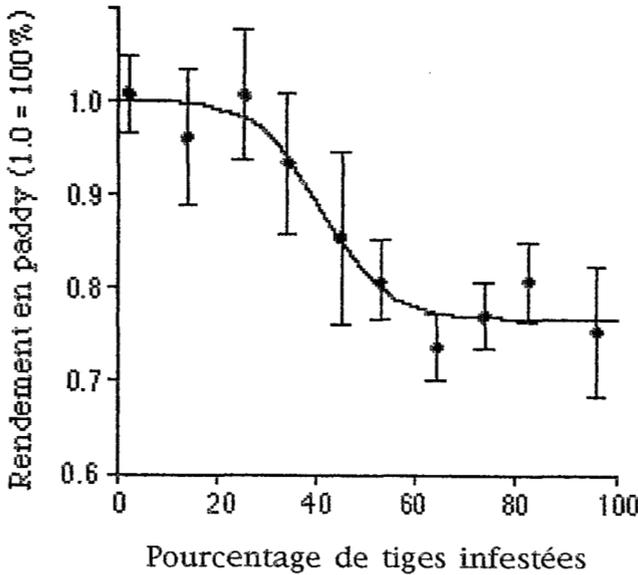


Figure 2

Relation entre rendement et pourcentage de tiges de riz infestées avec le borer africain *Maliarpha separatella* (BIANCHI *et al.*, 1992)

La relation a été construite à partir d'expérimentations menées pendant la période de sensibilité majeure pour la culture (BIANCHI *et al.*, 1989). Pour l'estimation des dégâts, des cages de Nylon d'une superficie de 4 m² sont installées en plein champ et infestées artificiellement. La dynamique des populations de *M. separatella* ainsi que le processus de formation du rendement ne sont donc considérés que d'une manière implicite. Cette relation (éq. 2) a permis la détermination d'un seuil économique (BIANCHI *et al.*, 1992).

Dans la pratique, on peut à l'aide d'un tel modèle procéder à un échantillonnage des œufs de pyrale pendant la période de sensibilité maximale des plantes, prévoir le niveau d'infestation des tiges, son incidence sur la réduction du rendement et donc décider de l'application d'une mesure de lutte contre le ravageur. La validité de l'équation 2 est toutefois limitée aux cultures qui ont le même niveau de rendement.

Modèle statistique complexe (relations multivariées)

GUTIERREZ *et al.* (1981) ont étudié au Nicaragua l'incidence des populations de *Anthonomus grandis* Boh. et de *Heliothis zea* Boddieila sur le rendement des plantations de coton (production et destruction des fruits) (fig. 3). La relation qui existe entre le taux de production des fruits et leur destruction tient compte de la dynamique du système et contient implicitement toute la variabilité liée à la formation du rendement et à la dynamique des populations des insectes. Le rendement (R) de la culture peut être exprimé comme suit :

$$R = R_s \left(1.0 - e^{-\alpha \beta_1 / \beta_2} \right) \quad \text{éq. [3]}$$

R_s = rendement en l'absence des ravageurs,

α = constante estimée avec la méthode des moindres carrés,

β_1 = taux de production des fruits,

β_2 = taux de destruction des fruits.

La relation permet de caractériser d'une part un niveau de compensation du dégât et d'autre part un seuil économique commun pour les deux ravageurs. A la différence d'une méthode traditionnelle, le niveau de compensation et le seuil sont exprimés dans cet exemple comme des relations entre les taux et pas directement entre les densités des phytophages.

De BERNADINIS *et al.* (1992) proposent un modèle statistique complexe pour l'étude des interactions entre le puceron *Dysaphis plantaginea* (Pass.) et le pommier. Cet aphide n'occasionne pas directement des dégâts sur les fruits comme le miride mais agit sur la photosynthèse et la distribution des assimilats. Dans une telle situation, le modèle choisi doit tenir compte de la variabilité supplémentaire liée à la physiologie de la plante. Ceci suppose une connaissance approfondie des mécanismes physiologiques qui régulent la croissance.

L'utilisation du concept de flux énergétique ou pool métabolique (GUTIERREZ & WANG, 1976) est particulièrement adapté pour représenter ce type d'interactions. Le principe, dont le développement est basé sur la théorie de la prédation (FRAZER & GILBERT, 1976; GUTIERREZ *et al.*, 1981, 1984, 1987; GRAF *et al.*, 1990), est le suivant : par intervalle de temps DT, chaque population, a besoin pour assurer sa croissance d'une certaine quantité de matériel (*Demande*). Cette demande sera satisfaite en fonction du matériel acquis (*Offre*). L'*Offre* sera ensuite distribuée selon certaines priorités prédéfinies (*Allocations proportionnelles*). Dans notre exemple, le taux d'accroissement d'une pomme (*croissance fruit*) est calculé comme suit :

Croissance fruit = Allocation proport. {Demande fruit (1 - e^{-offre/demande})}

$$\Delta F = a_1 B_1 \left(1 - e^{-\left(S_{(*)} \cdot e^{-N_a a_2 \Delta T} \right) / B_v(*) + B_f(*) + B_a(*)} \right)$$

Demande (par intervalle de temps)

$B_v(*)$ = demande des parties végétatives (tronc, feuilles, tiges et respiration),

$B_f(*)$ = demande des fruits (respiration),

$B_a(*)$ = demande des aphides (et leur respiration),

a_1 = allocation proportionnelle.

Offre (par intervalle de temps)

$S_{(*)}$ = production en fonction de la radiation, de la surface foliaire, du LAI.

$e^{-N_a a_2 \Delta T}$ = réduction proportionnelle de la production due à l'attaque des aphides.

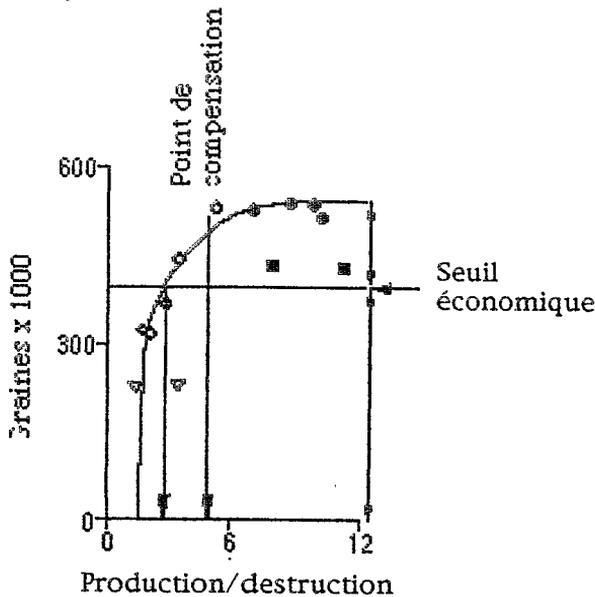


Figure 3

Rendement du coton en fonction du rapport taux de production/taux de destruction.

Anthonomus grandis et *Heliothis zea* sont responsables de la destruction (GUTIERREZ *et al.*, 1981).

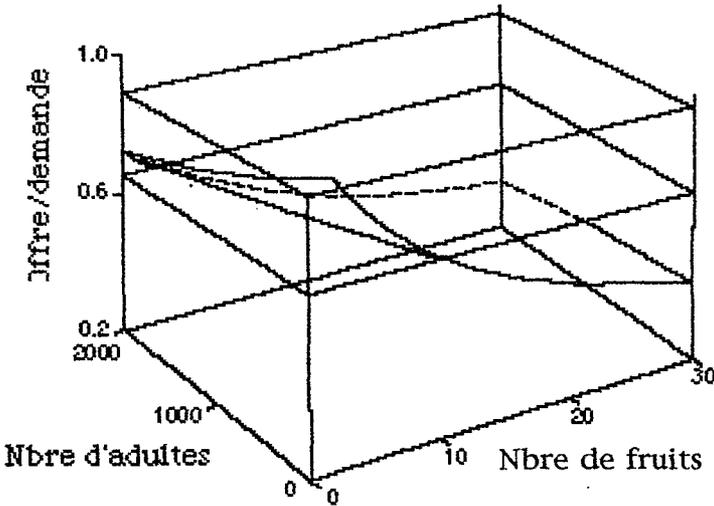


Figure 4

Rapport Offre/Demande calculé avec le modèle de pool métabolique, pour un rameau de pommier infesté avec le puceron *Dysaphis plantaginea* (DE BERARDINIS *et al.*, 1992).

Les coefficients a_1 et a_2 sont estimés à partir d'expérimentations menées aux champs. Avec ce modèle on décrit la croissance des pommes en fonction de la densité d'aphides et de fruits présents sur le rameau. Les résultats montrent que la demande en matériel de la part des fruits est satisfaite ($Offre/Demande = 0,95$ fig. 4) lorsque la densité d'aphides et de fruits présents sur le rameau est basse.

Les expériences conduites en plein champ servent d'éléments de base pour la construction de ces modèles. L'influence des ennemis naturels sur les populations de phytophages est donc implicitement prise en compte. Les domaines de validité de ces deux exemples sont ici plus grands que ceux de tous les précédents.

La difficulté liée à l'estimation du développement des éléments du système entraîne l'impossibilité d'une utilisation directe dans la protection phytosanitaire de ces deux derniers modèles.

Modèle de simulation

Un agrosystème est généralement composé de plusieurs populations végétales et animales qui interagissent et qui se développent sous l'influence de facteurs ambiants non constants. La dynamique de ces populations, dont la structure varie dans le temps, peut être représentée avec un modèle de simulation (BAUMGÄRTNER & GUTIERREZ, 1989 SEVERINI *et al.*, 1990). SEVERINI *et al.* (1990) ont montré que le modèle à retard distribué (MANETSCH, 1976; VANSICKLE, 1977) s'avère particulièrement adapté pour l'étude

des événements phénologiques du développement de populations d'organismes poékilo thermes. Dans le système d'équations de MANETSCH (1976), la cohorte constitue l'unité de base de chacune des populations considérées et les effets de la mortalité et de l'immigration sont simulés via l'attrition (VANSICKLE, 1977) :

$$\frac{dr_{j,i}(t)}{dt} = \frac{k_j}{DEL_j(t)} \left\{ r_{j,i-1}(t) \left[1 + \frac{AR_{j,i}(t) \cdot DEL_j(t)}{k_j} + \frac{dDEL_j(t)}{k_j \cdot dt} \right] \cdot r_{j,i}(t) \right\}$$

$i = 1, 2, \dots, k_j$

$r_{j,i}(t)$ = flux intermédiaire, flux d'individus sortant du sous-stade k_j ,

$DEL_j(t)$ = durée instantanée de développement,

$AR_{j,i}(t)$ = taux instantané de perte (attrition),

k_j = nombre de sous-stades ou paramètre de stochasticité,

$r_{j,0}(t)$ = flux d'individus entrant dans le premier sous-stade.

L'association du système d'équation de MANETSCH (1976) (développement des populations avec mortalité et migration) au modèle de flux énergétique ou de pool métabolique (interactions entre les populations, compétition, phytophagie et prédation) permet de traiter des relations très complexes à l'intérieur d'un agrosystème. Cette approche démographique a été largement utilisée avec succès dans l'analyse des agrosystèmes comme par exemple ceux du coton, du pommier, du niébé, de la vigne et du manioc (GUTIERREZ *et al.*, 1987; BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990; TAMO & BAUMGÄRTNER, 1991; WERMELINGER *et al.*, 1991; BONATO, 1993).

BONATO (1993) a développé un modèle qui décrit les interactions entre le manioc et deux acariens phytophages, l'acarien vert du manioc *Mononychellus progresivus* Doreste et l'acarien rouge *Oligonychus gossypii* en Afrique centrale (Congo) (figs. 5, 6 et 7). Selon l'approche démographique qu'il utilise, le manioc est composé de différentes populations d'organes : feuilles, tiges, racines non tubérisées, et tubercules. La dynamique de la masse, c'est-à-dire la croissance en matière sèche de chacun de ces organes est étudiée ainsi que la dynamique du nombre pour les feuilles uniquement. Pour les acariens on ne s'intéresse qu'aux informations relatives à la dynamique du nombre d'œufs et de stades mobiles (immatures et adultes).

Les réponses du modèle (croissance du manioc et dynamique des populations d'acariens) montrent une très bonne correspondance avec les données observées sur le terrain (fig. 5).

Les simulations mettent en évidence la très grande sensibilité de la croissance du manioc à la pluviométrie, puisqu'une réduction des pluies de 60 % (en l'absence d'acariens) entraîne une perte d'environ 50 % de la matière sèche des tubercules (fig. 6). De même, les densités d'acariens simulées ont un effet non négligeable à la fois sur le rendement et sur l'ensemble de la croissance de la plante (fig. 7). L'impact des acariens est le plus important lorsque les attaques se produisent sur des plants qui sont en reprise de croissance. Pendant ces périodes, les plants de manioc ont très peu de feuilles et les acariens entraînent une défoliation prématurée, diminuent la croissance des nouvelles feuilles et par conséquent la croissance de la plante toute entière. La plante a un effet modéré sur les populations d'acariens et la principale cause de régulation (à l'exception de la chute des feuilles) demeure la prédation.

Le principe des simulations est de pouvoir à la fois pondérer l'importance des facteurs considérés et d'en identifier de nouveaux. Ce dernier exemple nous montre que ce type de modèle ne se limite plus uniquement à la gestion d'un ravageur mais permet d'aller au-delà, c'est-à-dire d'entrer dans l'analyse de l'agrosystème, moyen le plus fiable pour la recherche d'une stratégie de gestion durable du système.

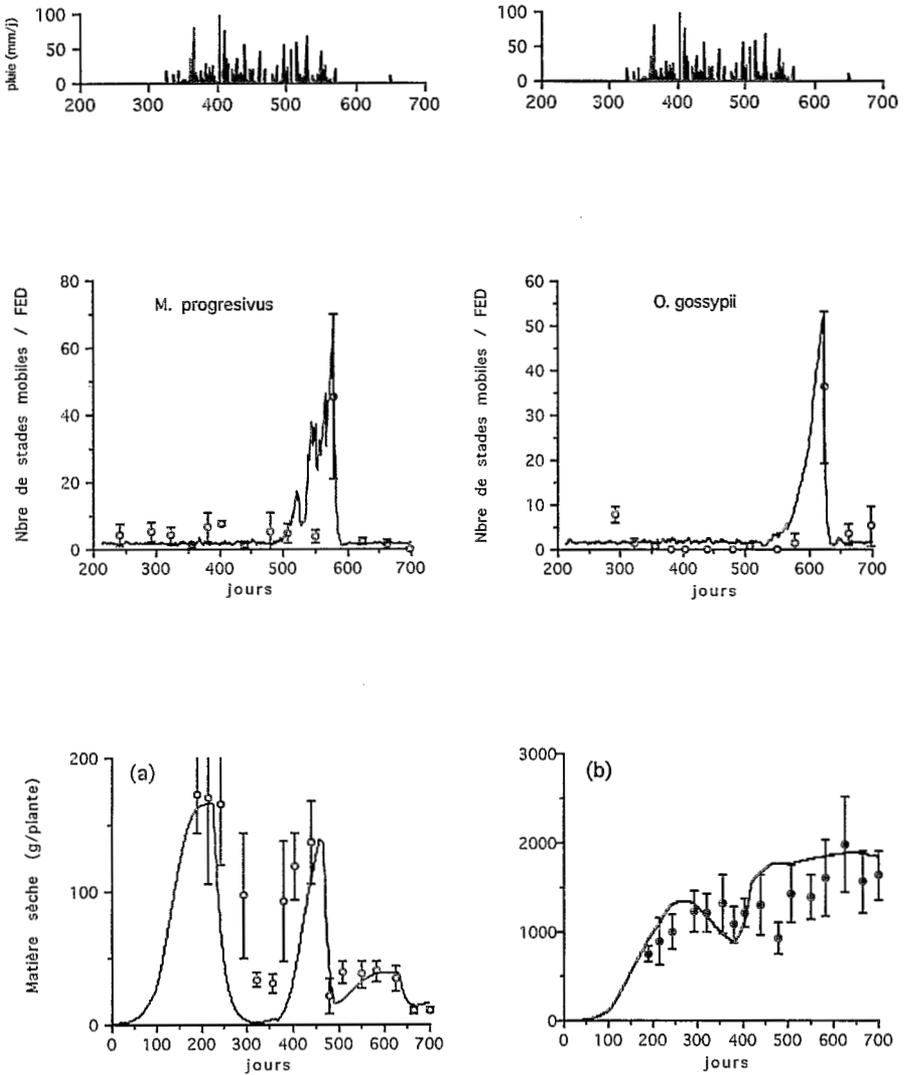


Figure 5

Dynamique du nombre de stades mobiles par feuille de manioc entièrement développée (FED) de *Mononychellus progresivus* et de *Oligonychus gossypii*, et phénologie de la matière sèche des feuilles (a) et des tubercules (b) en fonction du nombre de jours après la plantation. Le trait continu correspond aux données simulées, les points (symboles) aux densités relatives observées et aux poids mesurés + intervalle de confiance ($\alpha = 0,05$).

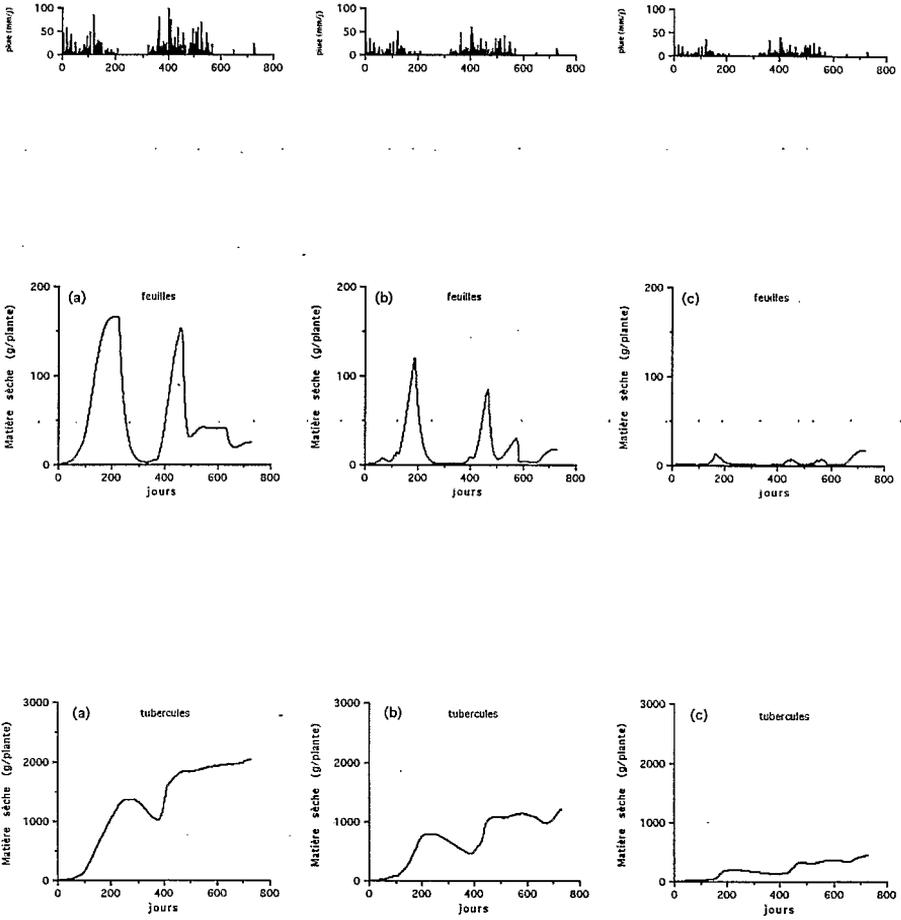


Figure 6

Simulations de la production de matière sèche des feuilles et des tubercules de manioc en fonction de la pluviométrie : (a) conditions météorologiques de la saison 1989-1991 à Mantsoumba (Sud-Congo); (b) = 60 % des pluies; (c) = 40 % des pluies.

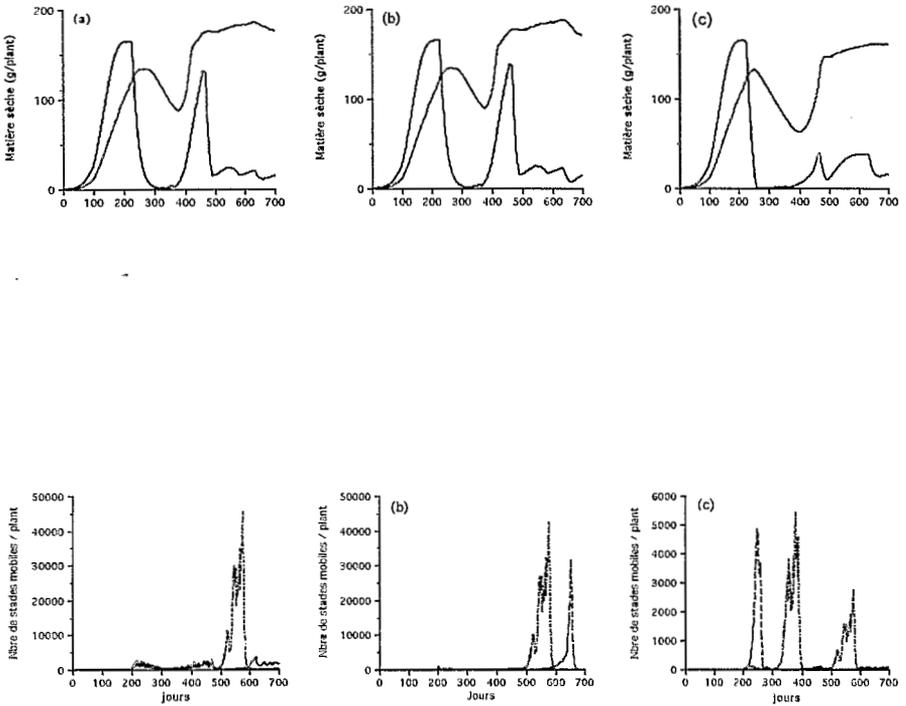


Figure 7

Simulation des effets de différentes densités de *M. progresivus* (—) et d'*O. gossypii* (---) sur la production de matière sèche des feuilles (—) et des tubercules ($\times 10$) (.....). (a) = densités de *M. progresivus* et d'*O. gossypii* d'environ 80 œufs et 40 stades mobiles par feuille en dehors des pics de pullulations. (b) = le pic de pullulation de *M. progresivus* et d'*O. gossypii* dure 4 mois au lieu de 3 (observations de terrain). (c) = 2 pics de pullulations pour *M. progresivus* et *O. gossypii*. Le 1^{er} entre le 200^e et le 400^e jour, le 2nd entre le 500^e et le 650^e jour.

Conclusion

Plus on augmente le niveau de complexité d'un système, c'est-à-dire plus le nombre d'interactions étudiées est élevé, plus les résultats obtenus sont difficilement utilisables directement dans la pratique. La prévision d'un événement phénologique est un outil facilement réalisable et utilisable. Par contre, dès que l'on s'intéresse d'une manière plus détaillée aux systèmes et à leurs évaluations, l'application pratique des résultats ne peut plus se faire directement et simplement mais au contraire suivant certaines règles et conditions bien définies (BAUMGÄRTNER *et al.*, 1990). Comme nous l'avons vu, le passage d'un modèle qui décrit une relation occasionnelle (entre une plante et un ravageur) à un modèle de simulation, requiert l'intégration d'un nombre croissant de variables ainsi qu'un approfondissement de la connaissance des mécanismes qui régulent les processus de développement des organismes. La validité des modèles ainsi développés ne se limite plus à une situation agricole particulière mais au contraire s'étend à tout agrosystème de même type. Sur le plan pratique, l'étude des agrosystèmes avec de tels modèles aide beaucoup à la compréhension des interrelations entre les différentes populations et permet une meilleure gestion de la culture notamment par l'élaboration de stratégies durables de lutte contre les phytophages.

Références

- BAUMGÄRTNER J. & GUTIERREZ A. P., 1989. *Simulation techniques applied to crops and pest models*. In: Cavalloro, R. & Delucchi, V. (Eds). Parasitism 88. Proc. Sci. Congr., Barcelona, 25-28 oct. 1988. Bol. Sanid. Veg., Fuera Ser., 17: 175-214.
- BAUMGÄRTNER J., WERMELINGER B., HUGENTOBLER U., DELUCCHI V., BARONIO P., DE BERARDINIS E., OERTLI J.J., & GESSLER C., 1990. Use of a dynamic model on dry matter production and allocation in apple orchard ecosystem research. *Acta Hort.* 276: 123-139.
- BIANCHI G., BAUMGÄRTNER J., DELUCCHI V., RAHALYAVOLOLONA N., SKILLMAN S. & ZAHNER P., 1989. Sampling eggs of *Maliarpha separata* Ragonot (Lep. Phycitinae) in Madagascan rice fields. *Trop. Pest Manage.* 35: 420-424.
- BIANCHI G., RASOLARISON R., GENINI M., 1992. IPM in Madagascar. Noxiousness of the African white stem borer, *Maliarpha separata* Ragonot (Lep. Phycitinae) in irrigated paddy fields at Lake Alaotra. *Insect Sci. Appl.*
- BONATO O., 1993. *Dynamique des populations de l'acarien vert du manioc Mononychellus progresivus et de l'acarien rouge Oligonychus gossypii au Congo. Modélisation du sous-système acariens phytophages-manioc*. Thèse. Doc. univ. Montpellier II, 146 p.
- DE BERARDINIS E., BARONIO P., & BAUMGÄRTNER J., 1992. The effect of aphid (*Dysaphis plantaginea* Pass., Hom., Aphididae) feeding on apple fruit growth. *Ecol. Model.* (soumis, 1992).

- FRAZER B.D. & GILBERT N., 1976. Coccinellids and aphids: a quantitative study of the impact of adult ladybirds (Coleoptera: Coccinellidae) preying on field populations of pea aphids (Homoptera: Aphididae). *J. Entomol. Soc. Brit. Columb.* 73: 33-56.
- GRAF B., BAUMGÄRTNER J.U. & GUTIERREZ A. P., 1990. Modelling agroecosystem dynamics with the metabolic pool approach. *Mitt. Schweiz. Ent. Ges.* 63: 465-476.
- GUTIERREZ A.P., WANG Y., 1976. *Applied population ecology: models for crop production and proceedings series*. In: Norton, G. A. & Holling, C. S. (Eds). *Pest Manage. IIASA Proc. Ser. 4*, Pergamon Press, Oxf., 4: 255-280.
- GUTIERREZ A.P., DAXL R., LEON QUANT G. & FALCON L., 1981. *Estimating economics thresholds for bollworm Heliothis zea Boddie and boll weevil Anthonomus grandis Boh., damage*.
- GUTIERREZ A.P., BAUMGÄRTNER J.U. & SUMMERS C.G., 1984. Multitrophic models of predator-prey energetics. II. A realistic model of plant-herbivore-parasitoid-predator interactions. *Can. Ent.* 116: 933-949.
- GUTIERREZ A.P., SCHULTESS F., WILSON L.T., VILACORTA A.M., ELLIS C.K. & BAUMGÄRTNER J.U., 1987. Energy acquisition and allocation in plant and insects: an hypothesis for the possible role of hormones in insect-feeding patterns. *Can. Entomol.* 119: 109-129.
- HUFFAKER C. B. & CROFT B.A., 1976. Integrated pest management in U.S.: progress and promise. *Environ. Health Perspect.* 14: 167-183.
- MANETSCH T.J., 1976. Time-varying distributed delay models and their use in aggregative models of large systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 6: 547-553.
- SCHAUB L., STAHEL W.A., BAUMGÄRTNER J. & DELUCCHI V., 1988. Elements for assessing mirid (Heteroptera: Miridae) damage threshold on apple fruits. *Crop Protection* 7: 118-124.
- SEVERINI M., BAUMGÄRTNER J. & RICCI M., 1990. *Theory and practice of parameter estimation of distributed delay models for insect and plant phenologies*. In: GUZZI R., NAVARRA R.A. & SHUKLA J. (Eds). *Meteorol. Environ. Sci., World Sci. Publ., Singapore: 674-719*.
- STERN V.M., SMITH R. F., VAN DEN BOSCH R. & HAGEN K. S., 1959. The integrated control concept. *Hilgardia* 29: 81-101.
- TAMO M. & BAUMGÄRTNER J., 1991. Analysis of the cowpea agro-ecosystem in West Africa. I. A demographic model for carbon acquisition and allocation in cowpea, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. *Ecol. Model* 65: 95-121.
- VANSICKLE J., 1977. Attrition in distributed delay models. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 7: 635-638.
- WERMELINGER B., BAUMGÄRTNER J. & GUTIERREZ A.P., 1991. A demographic model of assimilation and allocation of carbon and nitrogen in grapevines. *Ecol. Model.* 53: 1-26.