

Contribution à la mise au point d'une lutte intégrée contre *Coelaenomenodera minuta* Uh., principal ravageur de *Elaeis guineensis* en Afrique de l'Ouest

- Théorie de la mesure et de la simulation de l'attaque du palmier à huile par son ravageur.
- Théorie de la mesure et de l'estimation de l'extension des attaques du ravageur sur les plantations de palmiers à huile — applications pratiques.

R. LECOUSTRE (1) et P. de REFFYE (2)

Résumé. — Les études sont brièvement situées dans le cadre des recherches en cours sur *Coelaenomenodera minuta*. Les travaux préliminaires à l'élaboration de la théorie de la mesure et de la simulation de l'attaque du palmier à huile par son ravageur à l'aide d'un processus aléatoire de contagion et le modèle numérique mis au point sont explicités dans un premier temps. La modélisation de l'extension et d'intensification des attaques de *Coelaenomenodera* sur les plantations de palmiers à huile est définie. Une application de la méthode des variables régionalisées à la cartographie des foyers de pullulations estimée par krigeage ponctuel à partir de sondage est ensuite développée. Les possibilités d'utilisation des méthodes d'investigations retenues dans ces études sont enfin soulignées.

INTRODUCTION

Dans un précédent article [10] la nécessité d'entreprendre des études très précises sur les facteurs qui régissent la dynamique des populations de *Coelaenomenodera minuta* a été mise en évidence. C'est ainsi que les études ont été menées dans le but de définir : une méthode précise de mesure des attaques sur un palmier et sur l'ensemble d'une plantation. Un modèle de simulation des attaques sur un palmier avec leur évolution en intensité et en extension à l'échelle des plantations a été élaboré.

Une tentative d'application à notre problème de ce qu'il est convenu d'appeler des biomodèles, en collaboration avec l'INRA, n'a pas abouti. Il a donc été décidé d'entreprendre des études avec d'autres méthodes d'investigation et de calcul : la recherche opérationnelle [4], et la géostatistique [16] dont l'application à la biologie est très récente et a particulièrement été développée en Côte d'Ivoire par Reffye [23, 24].

I. — MODÉLISATION DE L'ATTAQUE SUR UN PALMIER

Le *Coelaenomenodera minuta* est le principal ravageur du palmier à huile en Afrique de l'Ouest et, en particulier,

en Côte d'Ivoire. C'est un coléoptère Chrysomelidae Hispinae, il est strictement phyllophage tout au long de sa vie [18].

Le modèle mis en œuvre se doit de décrire parfaitement l'aspect des attaques sur une palme et sur un palmier, il doit en outre permettre de simuler ces attaques ou d'en apporter une méthode précise, et si possible simple, de mesure.

La mise au point de ce modèle a nécessité la réalisation de deux études préliminaires destinées, respectivement, à modéliser la distribution du nombre d'œufs par lieu de ponte, et l'architecture et la croissance du palmier.

1. — Études préliminaires.

a) Distribution du nombre d'œufs par lieu de ponte.

Les femelles du ravageur insèrent leurs œufs dans l'épaisseur du parenchyme puis les recouvrent de débris végétaux agglomérés ; ils sont ainsi pondus par groupes de 1 à 12.

L'observation permet de remarquer que les classes (1, 2, ..., 12 œufs) ne sont pas représentées à des fréquences comparables et que le maximum de fréquence apparaît pour 2 ou 3 œufs par lieu de ponte. La distribution du nombre d'œufs par lieu de ponte n'est donc pas constante.

L'ajustement à une loi mathématique de distribution a pu se faire. La loi utilisée, qui servira à modéliser numériquement cette distribution caractéristique, rend compte d'ordinaire d'un phénomène de fragmentation de stocks ; c'est la loi log normale [1].

(1) IRHO/CIRAD, Station Principale de La Mé, Biomathématiques/Statistiques ; B.P. 13 Bingerville (Côte d'Ivoire).

(2) CIRAD-Informatiques ; B.P. 5035, 34032 Montpellier Cedex (France).

b) Architecture et croissance du palmier.

Le stipe du palmier est formé à partir d'un bourgeon orthotrope à croissance continue qui émet des palmes. Chaque palme porte environ 300 folioles, une palme est émise tous les 14 à 21 jours selon les lignées dans les conditions agroclimatiques de la Station de La Mé.

L'angle phyllotaxique entre les palmes consécutives varie de $135,7^\circ$ à $137,5^\circ$, ce qui détermine la présence de spires visibles le long du stipe surtout grâce aux bases pétiolaires [6,25]. Les spires dites d'ordre 8 sont utilisées pour repérer les palmes, ce qui permet par là même de connaître leur âge approximatif (Fig. 1).

Un modèle d'architecture des plantes [22] appliqué au palmier à huile permet de construire et de dessiner sur table traçante une représentation de la plante (Fig. 2), on remarquera l'excellente concordance d'aspect avec le palmier de la figure 3.

En première approximation, dans les conditions normales d'une plantation, on peut considérer que la surface foliaire reste constante dans le temps durant la phase continue de croissance de la plante (5-25 ans).

Une étude précédente montre que les 100 folioles de la partie médiane de la palme (Fig. 4), de surfaces semblables, sont susceptibles de recevoir la même attaque ; la moyenne de l'attaque sur la palme se déduisant de l'attaque moyenne sur une de ces folioles par la formule :

$$\bar{A} = 0,65 \times N \times \bar{a},$$

- \bar{A} est l'attaque moyenne sur la palme,
- \bar{a} est l'attaque moyenne sur 1 foliole médiane,
- N le nombre total de folioles sur la palme.

Ce sont donc ces folioles médianes qui sont prises en compte pour les observations de base au cours de l'étude. L'attaque est en fait proportionnelle à la surface de la foliole.

2. — Théorie de la mesure et de la simulation de l'attaque du palmier à huile par son ravageur à l'aide d'un processus aléatoire de contagion.

Puisque les études préliminaires ont permis de modéliser la distribution du nombre d'œufs par lieu de ponte, il est



FIG. 1. — Détail d'un jeune palmier : une spire d'ordre 8 est matérialisée (O).

possible de simplifier les mesures en retenant le lieu de ponte comme unité d'attaque.

On distingue des attaques récentes, caractérisées par la présence d'au moins 1 œuf non incubé ou de 1 parasite d'œufs vivant dans le lieu de ponte, et des attaques anciennes.

On remarque, dans les deux cas d'attaques possibles, qu'il existe des folioles très attaquées, par rapport au niveau moyen d'attaque et des folioles indemnes d'attaque. Cela signifie que l'attaque est aléatoire.

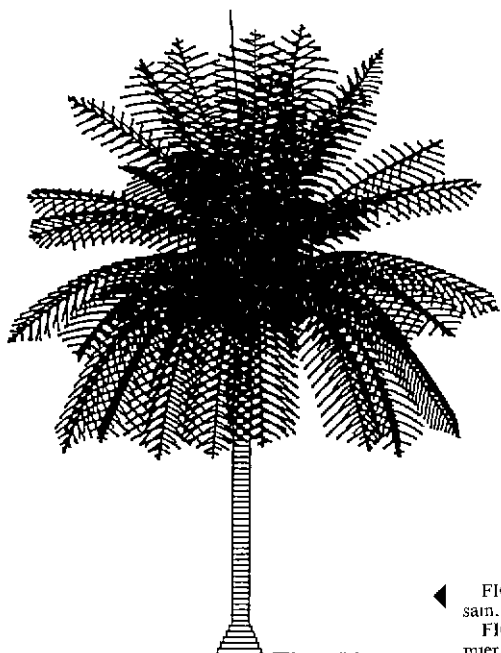


FIG. 2. — Simulation d'un palmier san.
FIG. 3. — Aspect général d'un palmier de 15 ans



La description biologique de l'activité de ponte du ravageur peut se schématiser comme suit : les œufs sont pondus selon une certaine fréquence sur les folioles, ils restent des œufs vivants jusqu'à la fin de l'incubation, jusqu'à ce qu'ils meurent, etc.

Ce schéma montre que nous sommes dans un cas particulier des processus de naissance et de mort : la théorie des files d'attente [4]. Cette théorie prévoit que, si aucun phénomène biologique ne vient perturber ces files d'attente, la distribution du nombre de « stations » (lieux de ponte) occupées (vivants) doit suivre la loi de distribution bien connue, dite Loi de Poisson :

$$P_n = \exp(-\lambda/\mu) (\lambda/\mu)^n / n!$$

où :

- λ est la fréquence de ponte par unité de temps,
- $1/\mu$ la durée moyenne où les œufs restent « œuf vivant »,
- n le nombre de lieux de ponte vivants/foliole,
- P_n la probabilité d'avoir n lieux de ponte vivants sur la foliole.

Lorsque le processus est stationnaire la distribution ne dépend guère de la distribution du « temps de service » $1/\mu$.

Dans le cas du *Coelaenomenodera*, on remarque une forte déviation par rapport à la loi de Poisson ; il y a plus de folioles vierges d'attaques mais aussi plus de folioles très infestées pour la même attaque moyenne.

Le phénomène biologique qui peut expliquer cette déviation a été mis en évidence, il s'agit d'un phénomène de contagion. La preuve de ce processus est apportée en observant des folioles diversement infestées, on compte sur ces folioles le nombre de lieux de ponte visuellement déterminés comme frais ; on effectue un second comptage 10 jours après la première observation. Les résultats (Tabl. I) montrent que les folioles initialement les plus infestées reçoivent, dans le même temps, plus de nouvelles attaques que les autres.

Il est légitime, dans ce cas, de penser que le nombre de lieux de ponte déjà présents sur la foliole modifie la loi d'arrivée des nouveaux lieux de ponte. Ceci nous place dans le cas dénommé processus de contagion [3]. La fréquence de ponte sur une foliole serait donc une fonction du nombre de lieux de ponte frais déjà sur la foliole et d'une certaine durée d'attractivité.

TABLEAU I. — Preuves du processus de contagion

Nombre de folioles examinées	Nombre moyen de lieux de ponte	
	« frais » initiaux	10 jours plus tard
91	0	0,41
86	7,5	3,00
20	17,5	4,20

L'hypothèse la plus simple que l'on puisse formuler est linéaire, la fréquence de ponte par unité de temps sur une foliole An dt vaut alors :

$$An \, dt = \lambda (1 + Rn) \, dt,$$

où

- λ est la fréquence de ponte instantanée sur les folioles vierges,
- n le nombre de lieux de ponte attractifs ($1/\mu$ est alors la durée moyenne de l'attractivité élémentaire),
- R un facteur de proportionnalité appelé taux de contagion.

Ces considérations permettent de calculer la loi mathématique qui sert de modèle numérique pour l'attaque du ravageur sur la palme et le palmier aussi bien pour les attaques récentes que pour les attaques anciennes ; cette loi est une loi binômiale négative [12], le cas où $1/R$ est entier a été décrit par Neyman pour l'étude des agrégats d'individus [22] ($1/R$ est le paramètre « indice de Neyman »).

La fonction génératrice de cette distribution binômiale négative s'écrit :

$$G(z) = (1/(1 + Rm(1-z)))^{1/R},$$

où m est la moyenne de la distribution et s'exprime :

$$m = \lambda (1 - \exp(\lambda R - \mu)) / (\mu - \lambda R),$$

les paramètres de la loi se calculent par le maximum de vraisemblance. On a R plus simplement par :

$$R = \frac{V - m}{m^2}$$

Cette loi est très proche de la loi du processus de croissance de population développée par Kendall [7] ; les hypothèses prises par cet auteur pour générer cette loi, appliquées à un insecte, impliquent que celui-ci présente rarement des déplacements importants. La confirmation a été

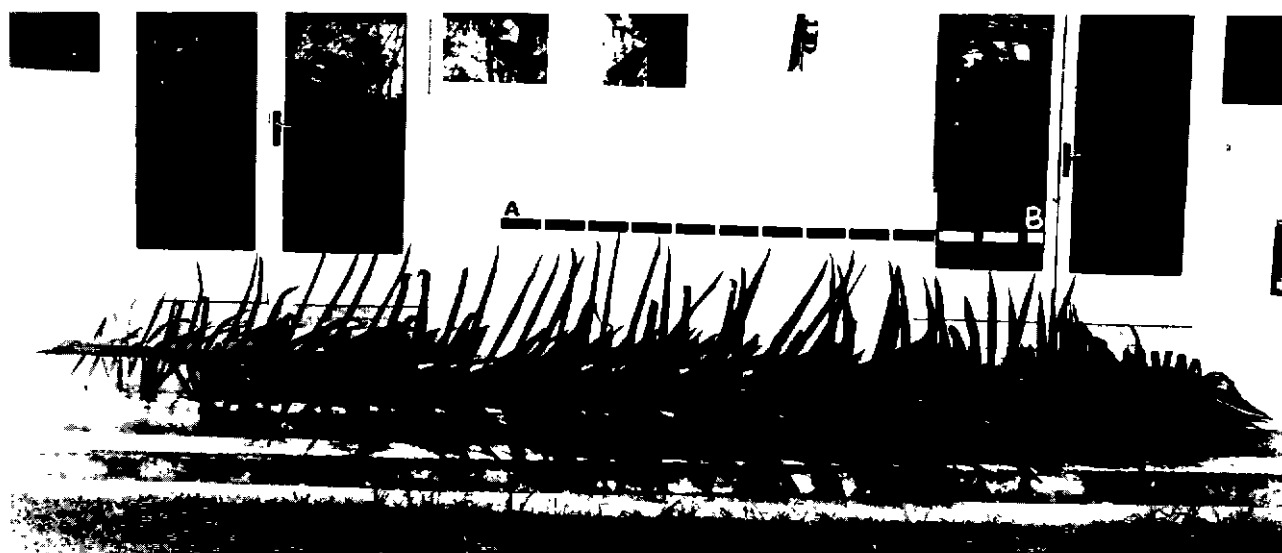


FIG 4 — Aspect d'une palme : A-B : zone « médiane ». folioles de même surface.

TABLEAU II. — Attaque instantanée sur un palmier, valeurs observées (O) et calculées selon le modèle numérique mis au point (C)

Palme N°		Nombre de lieux de ponte frais par foliole								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
5	O	98	2							
	C	98,0					2,0	...		
9	O	94	4	1	1					
	C	93,5	4,1	1,6				0,8	...	
13	O	93	6	1						
	C	93,0	6,2					0,8	...	
17	O	98	1	0	0	0	1			
	C	98,0	0,9					1,1	...	
21	O	91	7	2						
	C	91,0	7,5					1,5	...	
25	O	97	3							
	C	97,0						3,0	...	
29	O	93	7							
	C	93,0						7,0	...	
33	O	96	3	0	1					
	C	96,0	2,8						1,2	...

apportée par de nombreuses observations réalisées en 1982-1983 : moins de 5 p. 100 des adultes de *Coelaenomenodera minuta*, même dans des conditions de défoliation moyenne, quittent, au cours de la journée, le palmier sur lequel ils ont été repérés le matin.

Ce seul modèle, dont les paramètres se calculent aisément à partir de la moyenne et de la variance des distributions, permet de décrire et d'expliquer l'aspect des attaques sur un palmier (Tabl. II, III) ; les feuilles les plus basses sont les plus attaquées car ce sont les plus vieilles : **accumulation** des attaques dans le temps, **contagion** entre les attaques qui augmente encore cet effet.

Il est possible de visualiser les résultats de ce modèle en simulant une attaque sur le palmier calculé et tracé antérieurement (Fig. 2). Pour rendre cette attaque visible sur le dessin on supprime arbitrairement un tronçon de foliole lorsque celle-ci a reçu un certain nombre d'attaques ; on simule alors parfaitement l'aspect d'une défoliation due au ravageur considéré, ce que peuvent confirmer les praticiens de la Défense des cultures sur palmier à huile (Fig. 5, 6).

Les observations nombreuses réalisées pour l'élaboration de ce modèle et par la suite montrent que le produit de la fréquence de ponte instantanée sur les folioles vierges (λ) par le taux de contagion (R) est constant et peu différent

TABLEAU III. — Attaque cumulée sur un palmier, valeurs observées (O) et calculées selon le modèle numérique mis au point (C)

Palme N°		Nombre de lieux de ponte cumulés par foliole										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	O	94	4	2								
	C	94,0	4,6						1,2	...		
9	O	90	5	3	2							
	C	89,9	6,5	2,1					0,8	...		
13	O	84	10	6								
	C	83,7	12,6						4,1	...		
17	O	91	4	2	1	2						
	C	90,9	4,9	1,9	0,9					1,1	...	
21	O	64	17	11	6	2						
	C	63,0	21,4	8,7	3,8					1,5	...	
25	O	45	12	17	10	8	3	2	1	1	0	1
	C	41,8	22,0	13,2	8,2	5,2	3,3	2,2	1,4		2,7	...
29	O	47	23	18	6	4	2					
	C	45,2	28,2	14,4	6,8	3,1					7,0	...
33	O	55	16	13	7	5	2	0	1	0	1	
	C	54,0	20,6	10,6	6,0	3,5	2,1			1,2	...	

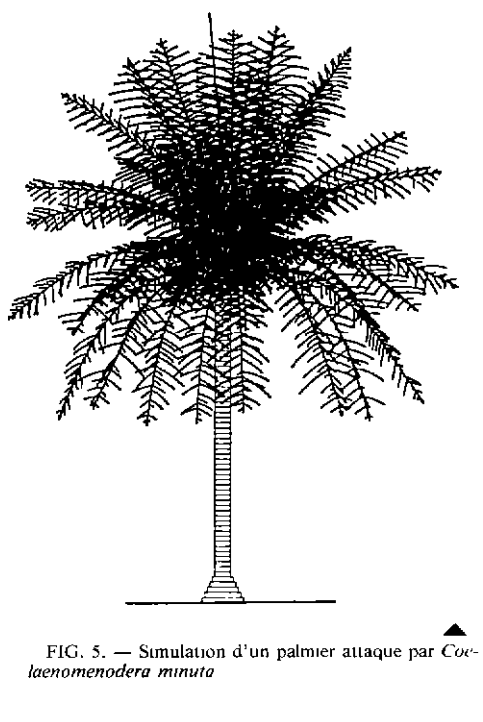


FIG. 5. — Simulation d'un palmier attaqué par *Coelacnaenomenodera minuta*

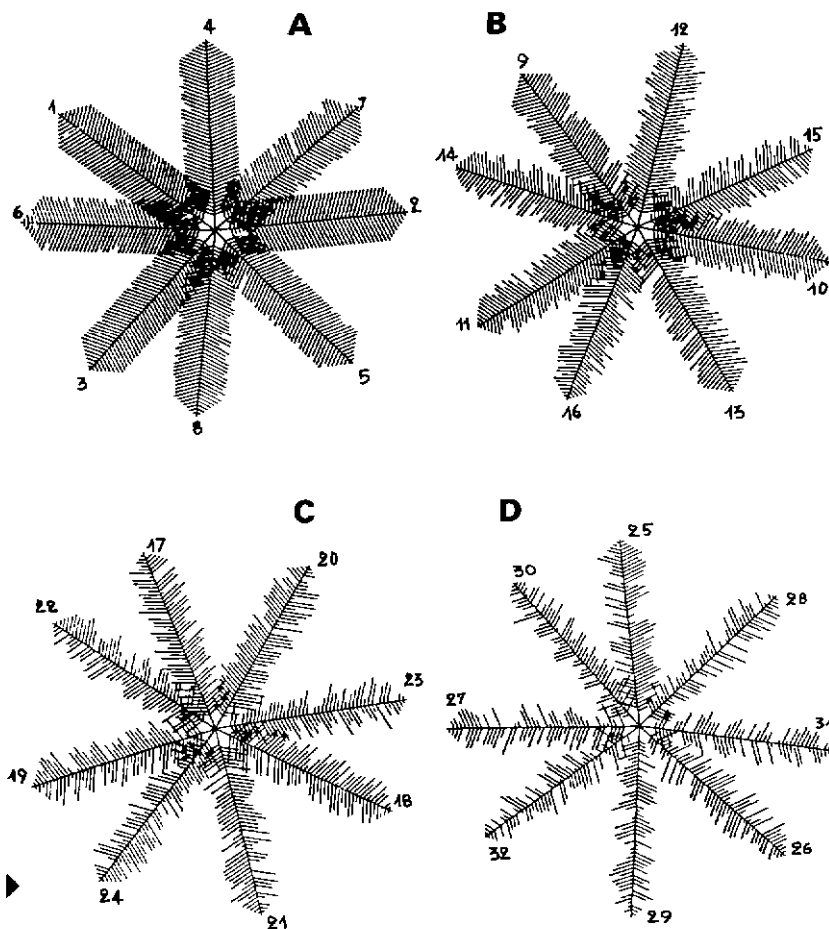


FIG. 6. — Simulation d'un palmier attaqué par *Coelacnaenomenodera minuta*, représentation en « vue de dessus » par niveau de palmes
(A) : niveau 1 - (B) : Niveau 9 - (C) Niveau 17 - (D) : Niveau 25

de 0,45. D'autre part les caractéristiques de cette loi font que $P_0 = \exp(-\lambda t)$. Ces deux considérations montrent qu'il est possible de simplifier grandement l'observation, surtout dans le cas des attaques cumulées ; puisqu'il suffit d'observer le nombre de **folioles indemnes d'attaque** pour être capable de reconstituer toute la distribution (Tabl. IV, V).

II. — MODÉLISATION DE LA DIFFUSION DE L'ATTAQUE SUR UNE PARCELLE

Les observations montrent que, dans de nombreux cas, les attaques débutent par des foyers de dimensions réduites et qui, s'ils ne sont pas contrôlés, deviennent coalescents et

TABLEAU IV. — Attaque instantanée sur un palmier, valeurs observées (O) et calculées selon le modèle numérique mis au point, paramètres estimés à partir de la distribution totale (C1) à partir de P_0 et $\lambda R = 0,45$ (C2)

Palme N°		Nombre de lieux de ponte frais par foliole								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
9	O	99	0	1						
	C1	99,0				.. 1,0 ..				
	C2	98,0				.. 1,0 ...				
17	O	93	6	0	0	0	0	1		
	C1	93,1	4,3				.. 2,7			
	C2	93,0	5,4	1,1			.. 0,4 ...			
25	O	88	6	2	2	1	1			
	C1	88,0	6,6	2,5	1,3	0,7		.. 0,9		
	C2	88,0	9,0	2,1			... 2,0			
29	O	76	13	10	1					
	C1	75,0	17,5	5,1			2,4 ..			
	C2	76,0	16,8	4,9			.. 2,3 ..			

TABLEAU V. — Attaque cumulée sur un palmier, valeurs observées (O) et calculées selon le modèle numérique mis au point, paramètres estimés à partir de la distribution totale (C1), à partir de P_0 et λt R (C2)

Palme N°		Nombre de lieux de ponte cumulés par foliole										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	O	94	5	1								
	C1	94,0	5,2					... 0,8 ...				
	C2	94,0	4,7					... 1,3				
17	O	85	8	5	1							
	C1	85,1	7,8	3,1				... 2,7 ...				
	C2	85,0	11,1	2,7				... 1,2 ...				
25	O	42	18	17	10	5	6	1	1			
	C1	40,4	24,3	14,4	8,5	5,0	2,9			... 4,5 ...		
	C2	42,0	29,3	15,6	7,4	3,3	1,4			... 1,0 ...		
29	O	23	22	18	11	10	8	2	2	3	1	
	C1	22,9	22,9	17,9	12,7	8,6	5,6	3,6	2,2		3,6	
	C2	23,0	27,2	21,0	13,4	7,6	4,0	2,0	1,0		0,8	

forment de grandes taches pouvant même se généraliser à l'ensemble d'une plantation.

Cette dernière partie des études de modélisation s'articule en deux périodes, l'une a trait à la modélisation proprement dite des phénomènes d'extension et d'intensification des attaques, l'autre définit une méthode de mesure et de cartographie de celles-ci à partir d'un sondage sur le terrain.

1. — Théorie de l'extension des attaques de *Coelaenomenodera* sur les plantations de palmiers à huile.

La forte convergence rencontrée dans la modélisation de l'attaque du palmier à huile par son ravageur avec les théories de Kendall nous a conduit à observer les déplacements des adultes de *Coelaenomenodera minuta* entre 6 h 30 et 19 h sur de nombreux sites, à des périodes différentes de l'année et dans des conditions de densité et de défoliation variables, cette observation porte sur plusieurs centaines d'insectes.

On constate que, en moyenne, au cours d'une journée :

- 50 p. 100 environ des adultes observés ne quittent pas la foliole où ils sont posés au début de l'observation,
- 25 à 30 p. 100 quittent la foliole où ils étaient posés pour une autre foliole de la même palme, ce qui n'exclut pas la possibilité d'un retour ultérieur à la foliole initiale,
- 20 à 25 p. 100 quittent la palme où ils étaient posés pour une palme du même palmier, ce qui n'exclut pas la possibilité d'un retour ultérieur à la palme, voire à la foliole initiale,
- moins de 5 p. 100 quittent le palmier où ils étaient posés pour un palmier immédiatement voisin. Aucun retour au palmier d'origine n'a pu être observé.

On est donc en présence d'un insecte qui se déplace peu ; de plus, ces déplacements se font apparemment de palmier à palmier. Puisqu'on connaît le processus qui régit cette diffusion, il est aisé de bâtir un modèle *a priori* qui soit explicatif.

Dans le cas de l'infestation d'une plantation, on sait que les foyers se développent en fonction de 3 paramètres qui sont :

— le taux de multiplication (dépendant de la fécondité de l'insecte et de la mortalité à ses différents stades) dont la valeur est la cause des augmentations d'indices moyens sur les parcelles (M),

— le taux de diffusion, dont l'importance détermine fortement la rapidité d'extension des foyers (C),

— l'unité de temps qui, arbitrairement, sera retenue égale à la durée moyenne d'un cycle.

Si l'on part d'une distribution donnée au début de l'infestation, les populations s'accroissent par leur taux de multiplication propre et une circulation des insectes s'opère entre les palmiers qui aboutit à une nouvelle répartition des attaques après chaque unité de temps. Il faut donc avoir une idée *a priori* du processus de diffusion lui-même et savoir ensuite le mesurer.

Comme les insectes circulent de palmier en palmier, l'hypothèse la plus simple à considérer est que la probabilité de franchir la distance qui sépare deux palmiers est constante. On peut ainsi envisager comme loi de probabilité de diffusion, en fonction de la distance K franchie par l'insecte, par unité de temps, le processus suivant :

— $P(0) = 1 - C =$ proportion d'insectes restant sur l'arbre émetteur,

— $P(1) = (1 - C) =$ proportion d'insectes émigrant sur les palmiers immédiatement voisins,

— $P(K) = (1 - C) C^K =$ proportion d'insectes émigrant sur les palmiers distants du palmier émetteur de K fois l'intervalle entre 2 palmiers.

Cette loi de probabilité décroît exponentiellement et se rencontre fréquemment dans d'autres cas (fiabilité, diffusion).

En connaissant le nombre N_K total de palmiers situés à la distance K du palmier émetteur, chaque palmier élémentaire reçoit donc en proportion :

$$P(1)(K) = (1 - C) C^K / N_K.$$

Un autre aspect des attaques de *Coelaenomenodera*, constaté expérimentalement, est l'effet de bordure ou de clairière ; les insectes s'accumulent sur les bords des parcelles comme s'ils ne pouvaient franchir tous les distances interparcelles ou les clairières.

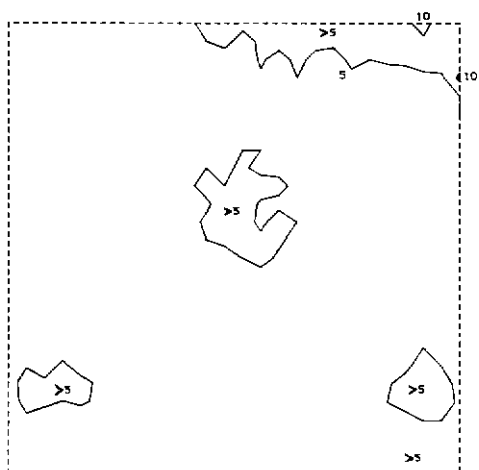
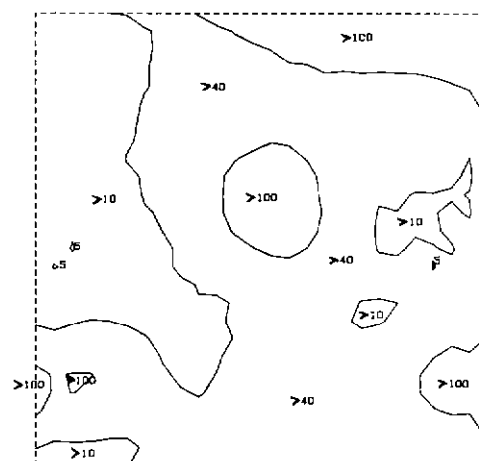


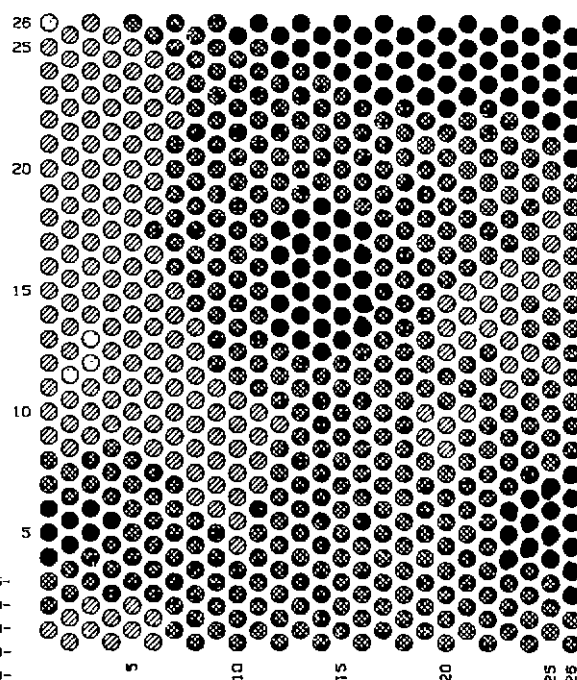
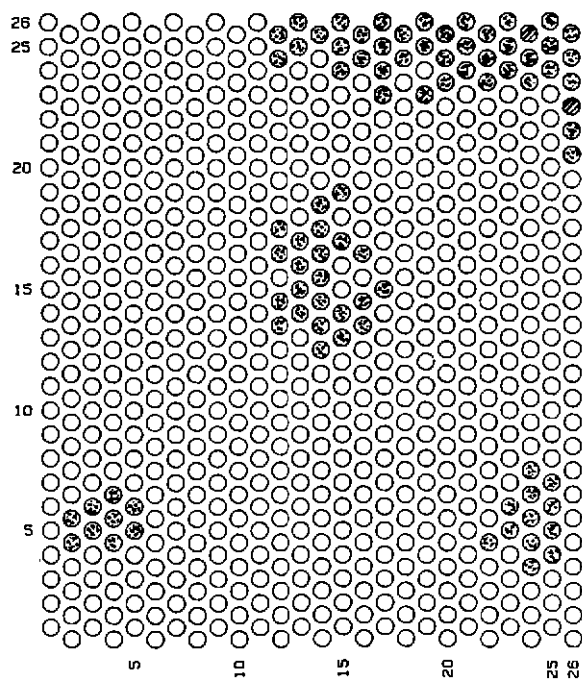
FIG. 7 — Représentation en « courbes de niveau », état initial de la parcelle ▲



▲ FIG. 9 — Représentation en « courbes de niveau », état de la parcelle après cinq cycles
Taux mult. = 2 ; Taux diff. = 0,42

FIG. 8. — Représentation individuelle, état initial de la parcelle. ▼

▼ FIG. 10 — Représentation individuelle, état de la parcelle après cinq cycles
Taux mult. = 2 ; Taux diff. = 0,42



○ 0 à 5-
○ 5 à 10-
○ 10 à 40-
● 40 à 100-
● 100 à 1000-

Pour modéliser ce phénomène on redistribue donc, sur les arbres de bordure de la parcelle, tout ou partie des individus qui auraient dû sortir de celle-ci.

Afin de pouvoir observer les résultats de la diffusion avec effet de bordure ainsi modélisée on propose une représentation graphique de ce phénomène (Fig. 7 à 10). La représentation en « courbes de niveau » est très explicite mais est difficile à mettre en œuvre pour des plantations en triangle équilatéral, nous lui préférons donc la cartographie représentant chaque palmier individuellement.

Le problème expérimental majeur est bien évidemment de parvenir à estimer correctement, en fonction de l'unité du temps retenue, les taux de diffusion et de multiplication qui y sont associés.

La méthode à utiliser consiste à faire fonctionner ce modèle de diffusion à partir des valeurs d'indices d'attaques sur tous les arbres d'une parcelle, on doit alors aboutir à une cartographie prévisionnelle de l'évolution de

l'intensité et de l'extension de l'attaque sur une parcelle qu'il faut confronter aux évolutions réelles.

Comme il n'est pas concevable pratiquement de mesurer les attaques sur tous les palmiers d'une parcelle, cette démarche nécessite la mise au point d'une cartographie des attaques à partir de sondages réalisés à intervalles réguliers.

2. — Mise au point d'une méthode d'estimation de l'attaque des *Coelaenomenodera minuta* sur les palmiers à partir d'un échantillonnage par la méthode des variables régionalisées.

Lorsqu'on observe la distribution d'une variable spatiale (les indices d'attaque dans notre cas) on remarque qu'il y a des corrélations entre les valeurs mesurées dans certaines zones, ce qui implique l'existence d'une structure propre. La connaissance de cette structure doit permettre d'estimer, par une interpolation, les valeurs prises par la variable entre les différents points de sondage.

On considère que les valeurs prises par une variable régionalisée sont une réalisation particulière d'une fonction aléatoire stationnaire douée d'une fonction d'autocorrélation.

Soit : une telle fonction $F(X)$, on s'intéresse à des points espacés d'une distance H . Dans la théorie des variables régionalisées, l'accroissement $F(X + H) - F(X)$ ne dépend pas de la position de X , il admet une espérance et une variance uniquement fonctions de H .

On définit le demi-variogramme :

$$G(H) = E [F(X + H) - F(X)]^2 / 2.$$

C'est une mesure de variance de la variable régionalisée entre deux points distants de H .

Lorsque H est petit, le demi-variogramme croît linéairement avec H ; à partir d'une certaine distance, les corrélations sont nulles (cette distance peut d'ailleurs être nulle, auquel cas les géostatisticiens disent que l'on a un « effet de pépites pures ») et l'on tend donc vers une variance maximale, la valeur de H pour laquelle ce maximum est atteint s'appelle la portée du demi-variogramme ; en géologie, la portée donne une estimation de l'expansion des gisements ; la figure 11 donne un exemple de demi-variogramme observé calculé à partir du sondage représenté sur la figure 12.

Pour simplifier les calculs on ajuste généralement le demi-variogramme obtenu à un modèle théorique courant. Le plus employé est le modèle sphérique de Matheron [16] donné par :

- $G(H) = C_0 + C_1 (3/2 H/a - 1/2 (H/a)^3)$ pour $H \leq a$,
- $G(H) = C_0 + C_1 \dots \dots \dots$ pour $H > a$,

où :

- a est la portée du demi-variogramme,
- C_0 l'effet de pépites pures à l'origine,
- $C_0 + C_1$ la valeur de l'asymptote au point $H = a$

(Fig. 12).

Une théorie de l'estimation locale, sans biais, des valeurs de la variable régionalisée par sondage a été mise au point par Krige ; cette méthode, qui tient compte du demi-variogramme, est appelée **krigeage**. Elle permet de calculer

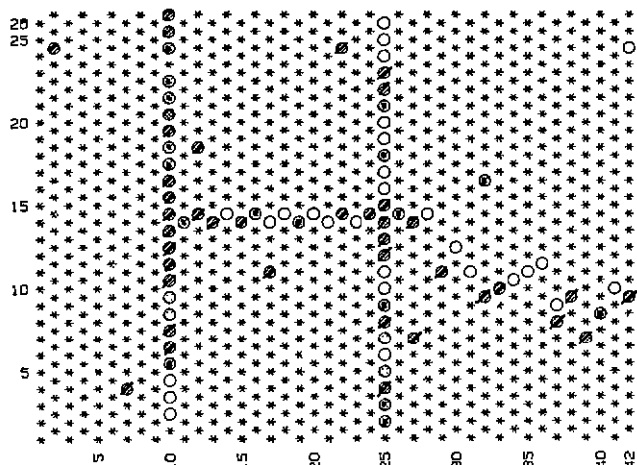


FIG. 12 — Boubo C-41 - Schéma de sondage.

la valeur de la variable en un point quelconque entouré de n points sondés dont les valeurs sont pondérées dans le calcul par des coefficients. Il est inutile de se servir de sondages situés à une distance supérieure à la portée du demi-variogramme.

La précision des estimations dépend à la fois de la qualité de l'ajustement du demi-variogramme modélisé à partir de celui observé dans les sondages et de la densité de ceux-ci.

Lorsque le point calculé coïncide avec un point observé, l'estimation retrouve la valeur observée de la variable en ce point.

Enfin, la variance d'estimation en un point ne dépend que du demi-variogramme et de la disposition des sondages autour de ce point. Ceci permet donc de calculer la densité de l'échantillonnage à prendre en fonction de la précision recherchée.

Le krigeage ponctuel permet ainsi d'établir une cartographie de la parcelle qui autorise à délimiter les foyers de pullulation, ce qui permet d'évaluer, d'une part l'import

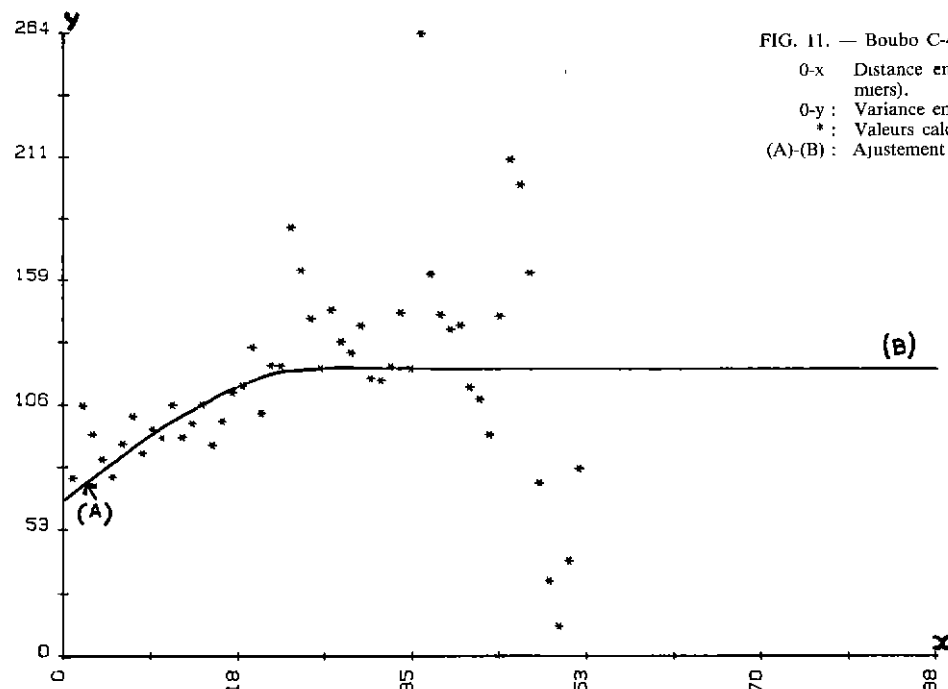


FIG. 11. — Boubo C-41 - Allure du variogramme obtenu
 0-x Distance entre points (1 = distance entre 2 palmiers).
 0-y : Variance entre points de sondage
 * : Valeurs calculées.
 (A)-(B) : Ajustement modèle de Matheron.

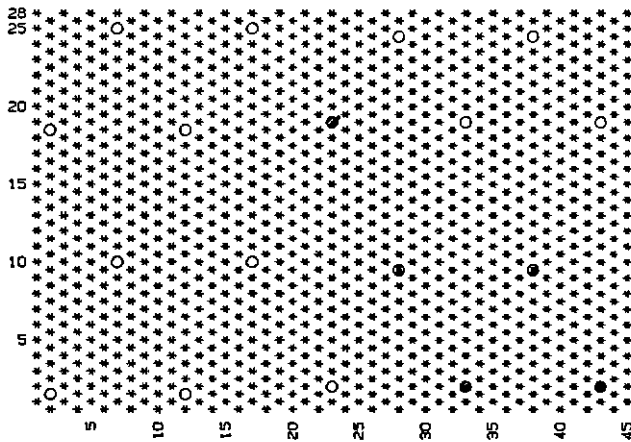


FIG. 13 — LM F-40 — Schéma de sondage.

tance des dégâts avec précision et de faciliter, d'autre part, la délimitation des zones à contrôler. La portée du demi-variogramme indicatrice de la dimension moyenne des foyers peut aussi donner une idée approximative du stade atteint par la diffusion, c'est-à-dire de l'âge des foyers : plus la portée est grande, plus le foyer doit être âgé.

Les figures 13 et 14 montrent respectivement la répartition de l'échantillon retenu pour les sondages, et la cartographie de la parcelle obtenue par krigeage.

CONCLUSION

La modélisation de l'attaque du palmier à huile par son ravageur de Côte d'Ivoire, *Coelaenomenodera minuta* a permis de mettre en évidence un certain nombre de paramètres nécessaires et suffisants pour décrire entièrement la situation.

On constate expérimentalement que, bien que l'attaque moyenne instantanée soit potentiellement identique sur toute la couronne, l'accumulation des attaques en fonction du temps, et le jeu de la contagion due aux lieux de ponte restés attractifs, font que les feuilles les plus basses sont les plus ravagées.

Les implications importantes du processus mis en évidence sont que les distributions des attaques sur les folioles d'une palme d'un âge donné sont des distributions en lois binômiales négatives. On montre en outre que le pourcentage de folioles indemnes d'attaque ne dépend pas du taux de contagion mais seulement de la « pression d'infestation ».

Cette partie de l'étude fournit une méthode d'échantillonnage rigoureuse de la mesure de l'attaque du palmier ainsi que la précision attendue sur les paramètres pour la taille d'un échantillon donné. Elle permet de reconstituer schématiquement le passé de l'infestation d'un palmier en analysant les caractéristiques de l'attaque de la première à la dernière palme, ce qui permet de remonter environ 20 mois dans le passé en moyenne.

La construction d'un modèle de dispersion des attaques des ravageurs et de leur extension est une tentative néces-

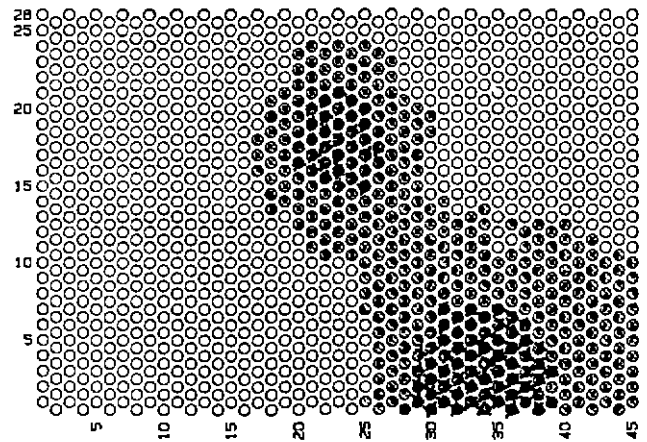


FIG. 14. — LM F-40 — Cartographie des indices d'attaque à partir du sondage

saire pour modéliser le processus. Le modèle retenu est simple. On aboutit à la détermination de 3 variables : le taux de multiplication, le taux de diffusion et l'unité de temps.

Il faut noter que, conformément au schéma de plantation des palmiers à huile, les calculs sont effectués sur une maille hexagonale centrée, après avoir été mis au point préalablement sur maille carrée.

L'application de la méthode des variables régionalisées permet *a posteriori*, à partir du concept de demi-variogramme, de se faire une idée sur la dimension des foyers de pullulation. D'autre part, le krigeage permet d'estimer la totalité de l'importance des attaques à partir d'un sondage restreint (de l'ordre de 5 p. 100). On peut ainsi réaliser une cartographie automatique de l'intensité des attaques.

Les résultats expérimentaux obtenus à partir de nombreuses observations sur le terrain permettent de mieux connaître les formes théoriques des demi-variogrammes rencontrés, ce qui autorise une meilleure précision dans le krigeage. Ces demi-variogrammes, comme on pouvait s'y attendre, sont de type classique. Cependant un fort « effet de pépites » est constaté dans 50 p. 100 des cas, ce qui rend difficile la prévision ponctuelle de l'infestation. Ceci est dû à la faible diffusion du *Coelaenomenodera* dans les parcelles de palmiers à huile. Les extensions se faisant plutôt par à-coups sur des distances aléatoires.

Il résulte de ce phénomène que l'on peut trouver des palmiers très faiblement contaminés proches de palmiers très infestés, augmentant ainsi notablement « l'effet de pépites ». Pratiquement, il faut donc effectuer des sondages denses (> 10 p. 100) dans ce cas afin d'avoir une estimation correcte de l'infestation en plantation.

Les méthodes d'investigation biomathématique retenues ont permis chaque fois [11] de poser clairement un problème relatif à la biologie du *Coelaenomenodera* et d'en résoudre les articulations. Ces techniques d'approche biomathématiques sont applicables directement ou méthodologiquement à beaucoup d'autres problèmes (viroses du manioc...).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AITCHISON J., BROWN J. A. C. (1981). — *The lognormal distribution-with special references to its uses in economics*. University of Cambridge, Dept of Applied Economics, Monograph : 5, Cambridge University Press, U.S.A.
- [2] BURGESS T., WEBSTER R. (1981-1982). — Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties *J. Soil Sci.*, 1981, **31**; 1982, **32** (Trad. fr.: Document IRAT, Nogent-s-Marne, Fr, 1983, 75 p.)
- [3] BARTLETT M. S. (1978). — *An introduction to stochastic processes*, Cambridge University Press, U.S.A.
- [4] FAURE R. (1918). — *Précis de recherche opératonnelle*. Dunod, Paris, Fr
- [5] FELLER W. (1957). — *An introduction to probability theory and its applications*. Vol. 1, Wiley and Sons, G.B
- [6] HIRSCH P. J. (1978). — Angle de divergence des feuilles du palmier à huile : Mesures et conséquences possibles (bilingue fr.-angl.). *Oléagineux*, **33**, N° 3, p. 109-112.
- [7] KENDALL M. G. (1945). — Naissance de populations. *Biometrika*, **35**, p. 6-15
- [8] LECOUSTRE R. et REFFYE P. de (1982). — Modélisation et simulation de la dynamique des populations de *Coelaenomenodera* et des interactions avec ses parasites et le palmier. *Rapport interne I.R.H.O.*, 26 p. (Mission de REFFYE, 10 août-23 septembre 1982)
- [9] LECOUSTRE R. et REFFYE P. de (1982). — Théorie de la mesure et de la simulation de l'attaque du palmier à huile par son ravageur à l'aide d'un processus aléatoire de contagion *Informatique et Biosphère. Actes du X^e colloque, INA-PG*, Paris, 26-28 avril 1982, p. 335-369
- [10] LECOUSTRE R. et REFFYE P. de (1983). — Théorie de la mesure et de l'estimation de l'extension des attaques de *Coelaenomenodera* sur les plantations de palmiers à huile *Rapport interne I.R.H.O.*, 20 p. (Mission de REFFYE, 17 octobre-19 novembre 1983).
- [11] LECOUSTRE R. et REFFYE P. de (1984). — Contribution à la mise au point d'une lutte intégrée contre *Coelaenomenodera minuta* Uh., principal ravageur de *Elaeis guineensis* en Afrique de l'Ouest. Modélisation de la dynamique des populations de *Coelaenomenodera* et applications pratiques (bilingue fr.-angl.). *Oléagineux*, **39**, N° 10, p. 461-469
- [12] LEGAY J. M. (1963). — A propos de la répartition de la Cécydomyie du hêtre, *Mikiola fagi*. Un exemple de distribution binomiale négative *Ann. Epiphyties*, **14** (1), p. 49-56.
- [13] MARBEAU J. P. (1976). — Géostatistique forestière, état actuel et développement nouveaux pour l'aménagement de la forêt tropicale. *Thèse de doctorat « Géostatistique forestière »*, Ecole des Mines, Paris, Fr.
- [14] MARIU D. et MORIN J.-P. (1972). — La biologie de *Coelaenomenodera elaeidis* Mik IV — La dynamique des populations du ravageur et de ses parasites. *Oléagineux*, **27**, N° 10, p. 469-474
- [15] MARIU D., DESMIER de CHENON R., JULIA J.-F. et PHILIPPE R. (1981). — *Coelaenomenodera* Ravageurs du palmier à huile et du cocotier en Afrique occidentale. *Oléagineux* (N° spéc. trilingue fr.-angl.-esp.), **36**, N° 4, p. 178-181
- [16] MATHERON G. (1965). — La théorie des variables régionalisées et ses applications. *Cah. Centre de Morphologie*, N° 5, Ecole des Mines, Paris.
- [17] MAULIK S. (1920). — A new hispid beetle injurious to the oil palm in the Gold Coast. *Bull. Ent. Res.*, **X**, Pt 2, p. 171-174.
- [18] MORIN J.-P. et MARIU D. (1970). — Etude sur la biologie de *Coelaenomenodera elaeidis* Mik. I. — Morphologie et étude de développement. *Oléagineux*, **25**, N° 1, p. 11-16
- [19] MORIN J.-P. et MARIU D. (1971). — La biologie de *Coelaenomenodera elaeidis* Mik III — La reproduction. *Oléagineux*, **26**, N° 6, p. 373-378
- [20] NARBONI Ph. (1979). — Application de la méthode des variables régionalisées à des forêts du Gabon *Note Statistique n° 18 CTFT*.
- [21] NAYLOR T. H. et BALINTFY J. (1966). — Computer simulations techniques Wiley Ed., G.B.
- [22] NEYMAN (1965). — *In - Problèmes d'Ecologie - l'échantillonnage des peuplements animaux des milieux terrestres* Masson et Cie, Paris, Fr.
- [23] REFFYE P. de (1979). — Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sans l'effet de la pesanteur Application au *Coffea robusta* *Thèse Université Paris Sud*, Centre d'Orsay.
- [24] REFFYE P. de et al (1980). — Etude de la pollinisation du cacaoyer à partir du trafic des insectes. Modèle mathématique et simulations *Café Cacao Thé*, **24**, N° 2, p. 83-100.
- [25] RUER P. (1968). — Contribution à l'étude du système du palmier à huile *Thèse Université de Paris*.

SUMMARY

Contribution to the development of an integrated control method against *Coelaenomenodera minuta* Uh., main pest of *Elaeis guineensis* in West Africa.

R. LECOUSTRE et P. de REFFYE, *Oléagineux*, 1986, **41**, N° 8-9, p. 367-376.

The studies are briefly put into the context of research underway on *Coelaenomenodera minuta*. Preliminary work carried out to formulate a theory of measurement and simulation of pest attacks on oil palm using a random contagion process and the resulting numerical model are explained. Modelling of the spread and acuteness of *C. minuta* attacks on oil palm plantations is defined. Application of the regionalized variable method to the mapping of foci where swarming takes place, estimated using the Krige method based on surveys is then developed. The possibilities of using the investigation methods adopted in these studies are described.

RESUMEN

Contribución en el desarrollo de un control integrado de *Coelaenomenodera minuta* Uh., mayor plaga del *Elaeis guineensis* en el África Occidental.

R. LECOUSTRE y P. de REFFYE, *Oléagineux*, 1986, **41**, n° 8-9, p. 367-376

Se presenta brevemente el ámbito de los estudios, realizados dentro de las investigaciones pendientes sobre *Coelaenomenodera minuta*. En una primera etapa se aclaran las labores preliminares a la elaboración de la teoría de la medición y simulación del ataque de la palma africana por su plaga mediante un proceso aleatorio de contagio, y también el modelo numérico que se desarrolló. Se define la modelización de la extensión e intensificación de los ataques de *Coelaenomenodera* en las plantaciones de palma africana. Luego se amplía una aplicación del método de las variables regionalizadas, en la cartografía de los focos de pululación evaluada por « krigeage » puntual en base a sondeos. Por último se recalca las posibilidades de utilización de los metodos de investigaciones elegidos en estos estudios.

