

Recherche d'un protocole standard d'épandage d'insecticide dans les rivières traitées par le programme de lutte contre l'onchocercose

(Programme de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest)

Luc LE BARBÉ (1) et Alain GIODA (2)

RÉSUMÉ

Pour contrôler l'onchocercose en Afrique de l'Ouest, un programme de l'OMS, l'OCP (Onchocerciasis Control Programme), mène depuis plus de quinze ans une lutte antivectorielle en procédant à des épandages aériens d'insecticides sur les gîtes larvaires du vecteur, localisés dans les zones à courant relativement rapide des rivières.

A partir de neuf traçages effectués dans des rivières très diverses de la zone du programme, les auteurs proposent un protocole standard de traitement, établi à partir du modèle monodimensionnel de la diffusion et qui ne nécessite que la connaissance de paramètres simples à collecter soit à partir de jaugeages soit à partir de cartes topographiques.

Les auteurs précisent les incertitudes des résultats obtenus pour en déduire des coefficients de sécurité à appliquer et définir les limites d'application du protocole. En dernier lieu les auteurs proposent un mode d'essai *in situ* des insecticides.

MOTS CLÉS : Protocole standard de traitement — Épandage aérien d'insecticide — Onchocercose — Afrique de l'Ouest.

ABSTRACT

TOWARDS A STANDARD INSECTICIDE SPRAYING CONTROL IN RIVERS TREATED BY ONCHOCERCIASIS CONTROL PROGRAMME

The aim of the OCP (WHO'S Onchocerciasis Control Programme) is to control the onchocerciasis or river blindness (a tropical parasitosis) in Western Africa. This programme has been carrying out for more than fifteen years a drive using aerial insecticide spraying on vector larvae zones located in the river reaches characterized by a relatively fast flow.

The data are collected from nine tracing carried out in very diverse rivers of the study field. The authors propose a standard treatment procedure derived from a one dimensional diffusion model which only requires simple parameters to be collected either from gaugings or from topographic maps.

The authors specify result uncertainties in order to deduce security coefficients to apply and define limits of treatment procedure. Finally, directions for insecticide experiments "in situ" are proposed.

KEY WORDS : Treatment procedure — Insecticide spraying — Onchocerciasis — West Africa.

INTRODUCTION

L'onchocercose est une maladie débilitante due à la prolifération dans le corps humain de microfilaires qui peuvent envahir le globe oculaire et ainsi provoquer la cécité. Le vecteur de cette maladie est une petite mouche « *Simulium damnosum* » qui à l'état larvaire se développe dans les zones à courant relativement rapide des rivières. Des foyers très importants de cette maladie existent donc le long de certains cours d'eau d'où le nom qui lui est parfois donné de « cécité des rivières ».

(1) Hydrologue ORSTOM, BP 11416, Niamey (Rép. du Niger).

(2) Hydrologue ORSTOM, Centre ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex.

L'onchocercose est très répandue en Afrique de l'Ouest et outre son aspect dramatique sur le plan humain, elle est un frein au développement et à la mise en valeur des terres fertiles bordant les fleuves.

Aussi depuis plus de quinze ans, un programme de l'OMS, l'OCP (Onchocerciasis Control Programme), a été mis en place pour éradiquer cette maladie en s'attaquant au vecteur par des épandages aériens d'insecticide sur les gîtes larvaires qui sont facilement localisables. Afin d'optimiser ses procédures d'épandage, l'OCP a demandé à l'ORSTOM de réaliser une étude expérimentale de la propagation de l'insecticide dans les rivières et d'en tirer des procédures opérationnelles de traitement.

1. LE CADRE

1.1. LES OBJECTIFS

Avant d'être utilisés par l'OCP, les insecticides subissent une série de tests, en laboratoire et dans les conditions naturelles. L'efficacité du produit est évaluée directement par le taux de mortalité qu'il entraîne sur une population larvaire soumise à diverses concentrations durant des temps également variables.

Pour les deux principaux insecticides utilisés par l'OCP, le B.t. (insecticide biologique) et l'abate ou téméphos (organophosphoré), ces essais ont montré que le taux de mortalité était lié à la dose (produit de la concentration par le temps de passage) et à la température par des fonctions de type :

$$y = a \log (D_0) + b T_e + c \quad (\text{Université du Québec, 1985}),$$

où : a, b et c sont des constantes,
y le probit du taux de mortalité,
 D_0 la dose = $\int c(t) dt$,
 T_e la température.

Le premier objectif de l'étude était donc de trouver les moyens de pouvoir prédire pour chaque épandage quelle sera la dose à différentes distances du point d'injection et d'en déduire un protocole standard de traitement.

On peut concevoir pour d'autres produits des modes d'action différents. Il nous est donc apparu nécessaire de pouvoir prédire, outre la dose, la concentration maximale et l'écart type de la courbe concentration-temps, qui est un bon estimateur du temps de passage. Enfin il fallait également proposer à l'OCP un moyen d'essai *in situ* des insecticides dont l'efficacité est liée à la dose.

1.2. LES CONTRAINTES

Sachant que l'OCP traite chaque semaine, entre 3 000 et 15 000 km d'un réseau de 50 000 km de rivières, il était difficile, dans un souci d'application des résultats, d'employer un modèle de propagation qui ne soit pas monodimensionnel. De même, les paramètres de ce modèle devaient être facilement obtenus par le biais de données accessibles à partir des jaugeages (débits, vitesse, largeur) et des cartes topographiques éditées (pente du fond du lit des rivières). De telles simplifications se traduisent obligatoirement par des incertitudes dans les prédictions. Il fallait donc les préciser pour en déduire des valeurs de coefficients de sécurité et les limites du protocole qui pourrait être proposé.

1.3. LA MÉTHODE

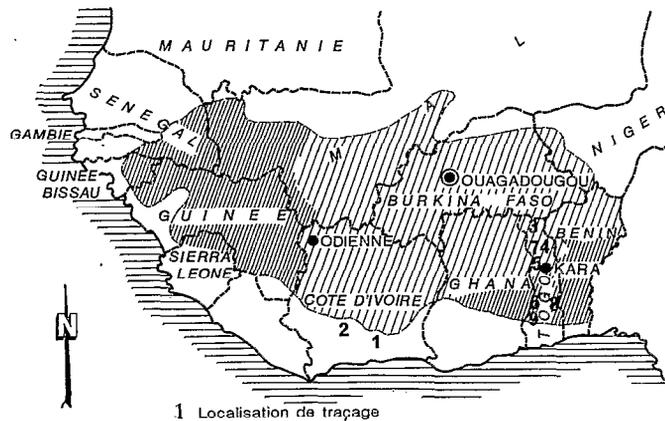
L'idéal aurait été de pouvoir suivre sur différents biefs représentatifs, la propagation de la vague d'insecticide par prélèvements successifs en différentes sections à l'aval du point d'injection. Une telle méthode n'a pas été retenue, le dosage des insecticides utilisés étant à la fois délicat et onéreux. On a donc, sur l'échantillon de biefs présenté dans le tableau I, suivi la propagation d'un traceur, la Rhodamine B, injecté de la même façon que les insecticides. A partir de ces traçages, il fallait donc essayer de trouver les moyens de déterminer les relations liant les paramètres du modèle choisi aux caractéristiques de l'écoulement et du produit utilisé.

TABLEAU I
Principales caractéristiques des biefs étudiés

Localisation	Date	Q (m ³ .s ⁻¹)	V (m.s ⁻¹)	La (m)	Lo (m)	Pente %	Nb
BANDAMA à BAFECAO-MBRIMBO	01-11-84	74	0,203	365	7520*	0,8	7
BANDAMA à BAFECAO-MBRIMBO	31-01-85	43	0,132	365	7520*	0,8	7
SASSANDRA à BUYO-SOUBRE	04-04-85	270	0,460	225	6850	0,03	3
OTI à SANSANNE-MANGO	04-10-85	277	0,700	90	3150	0,01	3
KERAN à TITIRA	07-10-85	46,3	0,470	49	5975	0,154	5
KAMA à BASSAR	18-10-85	0,6	0,094	9,63	2740	0,133	4
GBAN-HOU à BROUFFOU	25-10-85	1,23	0,170	12,9	2700	0,49	5
KPELOU à KPESSIDE	11-10-85	6	0,250	27,5	2146	0,8	3
MONO à N'GAMBOTO(1)	14-11-85	7,1	0,103	55	2950	0,026	4
MONO à N'GAMBOTO(2)	20-11-85	2,73	0,059	48	3250	0,026	2
WAWA à KESSIBO-WAWA	14-02-86	0,75	0,130	29	3180	0,38	3

* Valeur très approximative incluant la longueur d'une ramification

Q = débit
V = vitesse d'écoulement
La = largeur moyenne du bief étudié
Lo = longueur du bief étudié
Nb = nombre de sections de prélèvements.



1 Localisation de traçage

● Siège
● Base aérienne et station de réception
▨ Aire du programme 1974
▩ Extension du programme 1988

1. Bandama à Bafécao (2 traçages) ; 2. Sassandra à Soubré ; 3. Oti à Sansanné-Mango ; 4. Kéran à Tirira ; 5. Kama à Bassar ; 6. Gban-Hou à Brouffou ; 7. Kpélou à Kpéssidé ; 8. Mono à N'Gamboto (2 traçages) ; 9. Wawa à Kessibo-Wawa.

FIG. 1. — Carte de localisation. Traçage à la Rhodamine B.

2. LES TRAÇAGES

2.1. LES RÉSULTATS DES TRAÇAGES

Sur les différentes courbes concentration-temps observées, nous avons calé de façon satisfaisante l'équation de diffusion dans un modèle monodimensionnel,

$$C(x,t) = \frac{M}{Q} \frac{1}{\sqrt{4\pi \cdot D \cdot t}} \frac{x}{t} \exp\left(\frac{V \cdot x}{2D}\right) \exp\left(\frac{-x^2 - t^2 W^2}{4 D \cdot t}\right) \quad (1)$$

x = distance au point d'injection

t = temps écoulé depuis l'injection

V = vitesse de propagation

D = coefficient de diffusion

$W = \sqrt{V^2 + 4RD}$ = vitesse apparente de la propagation

R = coefficient de disparition de l'insecticide

M = masse injectée

Q = débit

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II. Dans tous les cas, au fur et à mesure que les prélèvements sont faits à une plus grande distance du point d'injection, il est constaté :

- une croissance du coefficient de diffusion (D) ;
- une décroissance du coefficient de disparition (R).

TABLEAU II
Résultats du calage du modèle monodimensionnel (Méthode MARQUARDT)

Localisation	x (m)	V (m s ⁻¹)	D (m ² s ⁻¹)	R (10 ⁻⁵ s ⁻¹)
MONO à N'GAMBOTO (2)	3250	0,056	7,3	1,8
MONO à N'GAMBOTO (1)	181	0,19	0,39	43,0
	2950	0,093	8,7	7,6
KERAN à TITIRA	1000	0,50	12,8	37,0
	1725	0,49	8,7	25,0
	3225	0,54	21,5	21,0
	3725	0,53	19,1	11,3
	5975	0,47	27,8	6,9
KPELOU à KPESSIDE	371	0,17	4,0	15,0
	746	0,24	6,66	6,2
	2146	0,25	7,85	6,0
WAWA à KESSIBO-WAWA	290	0,24	1,22	84
	3180*	(0,12)	(4,6)	(5,2)
GBAN-HOU à BROUFFOU	675	0,24	1,91	4,7
	1072	0,21	2,97	2,7
	1365	0,16	4,60	2,4
	1662	0,17	6,10	1,4
	2700	0,17	5,40	2,2
OTI à SANSANNE-MANGO	3150	0,65	37,3	27,0
	4750	0,67	52,2	18,0
KAMA à BASSAR	480	0,084	1,23	1,3
	1000	0,097	1,42	2,3
	2000	0,100	2,28	1,4
	2740	0,094	2,51	1,3

* relevés incomplets

x = distance à la section d'injection
 V = vitesse de propagation

D = coefficient de diffusion
 R = coefficient de disparition

2.2. L'INTERPRÉTATION DES TRAÇAGES

D'après FISCHER (1967), admettre un processus de diffusion pour décrire la dispersion revient à poser :

$$D = \overline{u''^2} \int_0^t \Psi(\tau) d(\tau) \tag{2}$$

$\Psi(\tau)$ = fonction d'autocorrélation des vitesses instantanées, quantifiant le brassage.

$$\Psi(\tau) = \frac{\overline{u''(t) u''(t+\tau)}}{\overline{u''(t)^2}}$$

u'' = vitesse relative instantanée d'une particule.

Les barres surmontant les diverses expressions indiquent des moyennes faites sur un grand nombre de particules.

Le processus de dispersion ne peut donc être décrit par l'équation de la diffusion que lorsque l'intégrale de l'équation (2) converge et pour des temps t tels que :

$$\int_0^t \Psi(\tau) d(\tau) \approx \int_0^\infty \Psi(\tau) dt$$

$\Psi(\tau)$ variant de 1 pour ($\tau = 0$) à 0 pour ($\tau = \infty$).

Dans ce cas, une échelle de temps pour la diffusion (TDIF) peut être définie :

$$TDIF = \int_0^\infty \Psi(\tau) d\tau$$

Une échelle de longueur pour la diffusion (LDIF) peut être également définie :

$$LDIF = V.TDIF$$

L'échelle de temps (TDIF) peut être évaluée, sur les rivières, par une expression de la forme :

$$TDIF = k \frac{La^2}{Rh.U^*} = k.T1$$

k = constante

La = largeur de la rivière

Rh = rayon hydraulique $\frac{1}{2}$

U^* = vitesse de frottement = $(g.Rh.l)^{\frac{1}{2}}$

g = accélération de la pesanteur : $9,81 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

l = pente d'énergie # pente du lit de la rivière.

Rh correspond approximativement au tirant d'eau. Il est donc possible de poser :

$$Rh = \frac{Q}{V.La}$$

soit :

$$TDIF = k.T1$$

avec :

$$T1 = \left(\frac{La^7.V^3}{9,81.Q^3.I} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$LDIF = k.L1 \text{ avec } L1 = \left(\frac{La^7.V^5}{9,81.Q^3.I} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

Les valeurs de la longueur de diffusion sont quelquefois plus grandes que la longueur des biefs à traiter. L'utilisation de l'équation de la diffusion ne sera donc dans ces cas qu'une approximation. Les valeurs des coefficients de diffusion (D) sont variables. Elles sont également croissantes dans le temps.

Le coefficient de disparition (R) est décroissant dans le temps. Cette décroissance est plus difficile à justifier que l'accroissement du coefficient de diffusion. L'hypothèse suivante peut être avancée :

Sur une partie du bief, l'écoulement serait très calme et donc toutes les particules du produit ne participeraient pas immédiatement au phénomène de diffusion. Ceci explique l'importance des « traînes » observées sur les courbes concentration-temps. Ces « traînes » sont d'autant plus importantes que les prélèvements sont effectués près des points d'injection. Ce phénomène a été longuement discuté et analysé notamment par VALENTINE et WOOD (1977) et SABOL et NORDIN (1978). L'ajustement d'une équation de diffusion exclut les traînes ce qui explique les valeurs fortes de R près des points d'injection (cf. fig. 2).

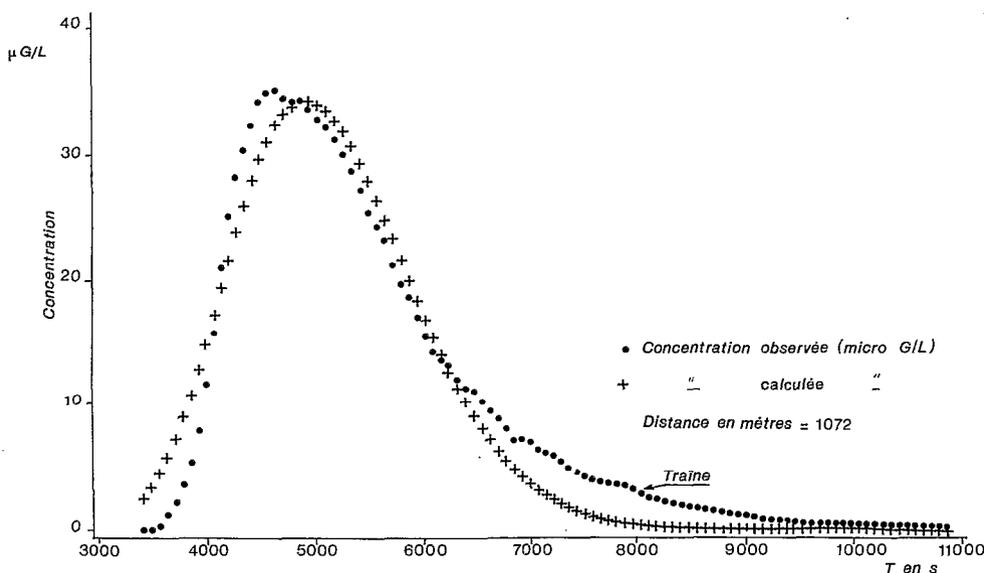


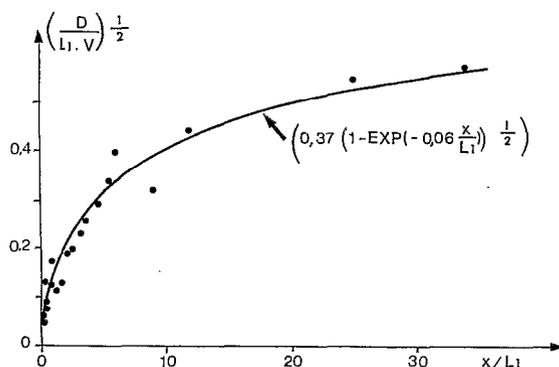
FIG. 2. — Gban-Hou à Brouffou — Traîne sur la courbe concentration/temps observé.

Relier les coefficients de diffusion et de disparition au rapport x/L_1 , c'est-à-dire la distance séparant la section de prélèvement au point d'injection normée par la longueur de diffusion, semble logique.

Pour le coefficient de diffusion, l'expression suivante a été ajustée de façon satisfaisante (fig. 3) :

$$D = b.L_1.V \left(1 - \exp \left(-d \frac{x}{L_1} \right) \right) \tag{4}$$

b et d, constantes positives (b = 0,37 et d = 0,06).



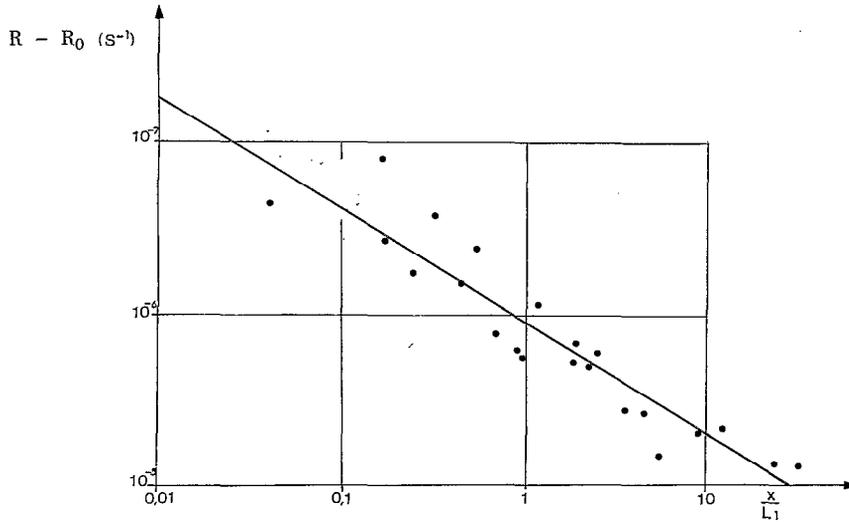
L_1 = longueur de diffusion ; x = distance au point d'injection ; D = coefficient de diffusion ; v = vitesse de propagation.

FIG. 3. — Estimation de D.

Pour le coefficient de disparition et pour $x > 0,01 L_1$, l'expression suivante a été ajustée (fig. 4) :

$$R = R_0 + a \left(\frac{x}{L_1} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad a \text{ étant une constante positive} \quad (5)$$

Dans l'équation (5), R_0 représente le coefficient de disparition de l'insecticide résultant en fait de différents phénomènes : biodégradation, absorption, hydrolyse, etc.



x = distance au point d'injection ; L_1 = longueur de diffusion.

FIG. 4. — Coefficient de disparition en fonction de x/L_1 .

En conclusion il peut être admis que :

— l'expression (4) n'est fonction que des caractéristiques de l'écoulement.

Les coefficients R_0 et a de l'expression (5) sont davantage des caractéristiques du produit. Ce sont donc ces paramètres qu'il faut pouvoir déterminer au cours d'essai *in situ* des insecticides.

Pour estimer la qualité des ajustements faits sur D et R , il est précisé les distributions des erreurs relatives commises sur les trois paramètres des courbes concentration-temps expliquant leur efficacité : la dose, le temps de passage et la concentration maximale (tab. III).

TABLEAU III
Distribution des erreurs relatives

	Effectifs des classes d'erreurs relatives en %							
	-70%	-50%	-30%	-10%	+10%	+30%	+50%	+70%
Doses	5	10	16	48	16	5	0	
Concentrations maximales	0	10	21	38	21	5	5	
Temps de Passage	10	10	21	33	16	10	0	

Les méthodes proposées permettent, dans 80 % des cas, une estimation à ± 30 % de la dose et de la concentration maximale. L'incertitude est plus forte pour les temps de passage ; la précision à ± 30 % n'est, en effet, atteinte que dans 70 % des cas.

3. UN PROTOCOLE STANDARD DE TRAITEMENT

3.1. LES PARAMÈTRES

3.1.1. Portée

L'intégration sur le temps de l'équation (1) nous permet de définir la dose, $Do(x)$, passant à une distance x du point d'injection.

$$Do(x) = Du \exp \left(- \frac{2x.R}{V + W} \right) \quad (6)$$

Le produit (4.R.D) étant toujours faible devant V^2 , on peut admettre que W est très peu différent de V , nous avons alors :

$$Do(x) = Du \exp \left(- \frac{x.R}{V} \right) \quad (7)$$

La portée $P(Du)$ liée à la dose unitaire est donc telle que :

$$Df = Du \exp \left(\frac{-P(Du).R}{V} \right)$$

Df : dose efficace caractéristique de l'insecticide.

Soit en remplaçant R par l'expression (5) :

$$Df = Du \exp \left(- \frac{P}{V} \left(R_0 + a \left(\frac{P}{L_1} \right)^{-\frac{2}{3}} \right) \right) \quad \text{soit} \quad \ln \frac{Du}{Df} = \frac{P}{V} R_0 + a \left(\frac{P}{L_1} \right)^{\frac{1}{3}}$$

qui peut s'écrire en posant :

$$P_1^* = \frac{1}{L_1} \cdot \frac{V}{R_0} \cdot \ln \frac{Du}{Df} \quad (8)$$

et

$$P_0^* = \frac{V}{R_0 \cdot L_1}; \quad P^* = \frac{P}{L_1}$$

$$P^* + P^{*1/3} \cdot \frac{a}{P_0^*} - P_1^* = 0$$

dont la solution est, si :

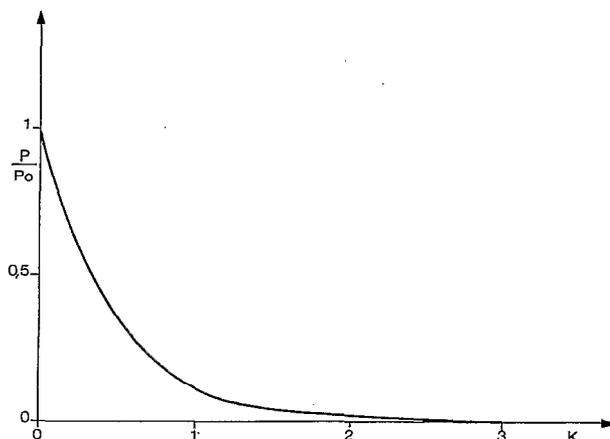
$$K = \left(\frac{a}{3P_0^*} \right) \cdot \left(\frac{2}{P_1^*} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$P^* = P_1^* (1 - f(K))$$

avec

$$f(K) = \frac{3}{2} K \left(\left(1 + \sqrt{1 + K^3} \right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 + K^3} \right)^{1/3} \right) \quad (9)$$

La fonction $(1 - f(K))$ est représentée sur la figure 5. Les expressions (9) permettent de définir la portée pour une longueur de diffusion et une dose unitaire données.



Avec P = portée ; $P_o = \frac{V}{R_o} \ln \frac{D_u}{D_f}$; D_u = dose unitaire ; D_f = dose efficace ; V = vitesse de propagation ;

$$R_o = \text{coefficient de biodégradation du produit} ; K = \left(\frac{a}{3R_o} \right) \left(\frac{2.L_1}{P_o} \right)^{\frac{2}{3}} ;$$

L = longueur de diffusion ; a = coefficient de décroissance de R en fonction de $\left(\frac{x}{L_1} \right)^{-\frac{2}{3}}$; $a = 9.10^{-5}$

FIG. 5. — Détermination de la portée en fonction de K .

3.1.2. Maximum de concentration

Le maximum de concentration, C_x , intervient au temps T_x .

$$T_x = \frac{3.D}{W^2} \left(\sqrt{1 + \frac{W^2 x^2}{9.D^2}} - 1 \right) \quad (10)$$

dès que : $\frac{W^2 . x^2}{9.D^2} \gg 1$ et en posant $V \approx W$

en appelant, coefficient d'étalement, le terme $Ke = \left(\frac{D}{V^3} \right)^{\frac{1}{2}}$

on a :
$$C_x = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} D_u \exp \left(\frac{-R.x}{V} \right) \frac{1}{Ke.\sqrt{x}} \quad (11)$$

3.1.3. Temps de passage

Nous avons pris, comme estimateur du temps de passage TT , la valeur de quatre fois l'écart type, ET , de la courbe concentration-temps avec :

$$ET = \left[\frac{1}{D_u} \int_0^{\infty} (t-\bar{t})^2 C(x,t) dt \right]^{1/2}$$

avec :

$$\bar{t} = \frac{1}{Du} \int_0^{\infty} t.C(x,t) dt$$

on a alors :

$$ET = \left[2x \frac{D}{V^3} \right]^{1/2}$$

soit :

$$TT = 4 (\sqrt{2x} \cdot Ke) \tag{12}$$

3.1.4. Portées et dosages optimaux

Les dosages unitaires optimaux sont ceux qui permettront pour traiter un bief d'utiliser le moins d'insecticide possible.

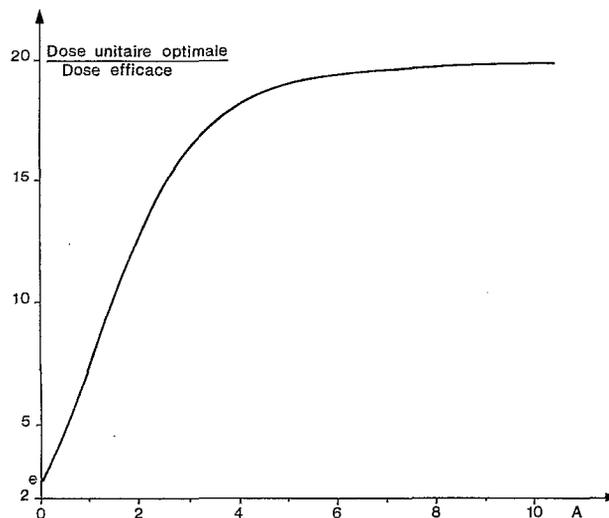
Il est supposé dans un premier temps que l'efficacité d'un épandage est indépendante de ceux faits précédemment en amont. Il faut pour déterminer la dose optimale, minimiser le rapport $Du/P(Du)$. A l'aide de l'expression (10), on peut exprimer la dérivée de ce rapport :

$$\left(\frac{Du}{P(Du)} \right)' = \left(1 - f(K) \left(\ln \frac{Du}{Df} - 1 \right) \right) - \frac{2}{3} f(K) + \frac{K^2}{2\sqrt{1+K^3}} \left((1 + \sqrt{1+K^3})^{2/3} - (1 - \sqrt{1+K^3}) \right)^{2/3} \tag{13}$$

La résolution de l'équation $\left(\frac{Du}{P(Du)} \right)' = 0$ a été faite numériquement pour différentes valeurs du paramètre suivant :

$$A = \left(\frac{a}{3R_0} \right) \left(\frac{V}{2R_0.L_1} \right)^{-\frac{2}{3}}$$

La courbe $Dx/Df = g(A)$ est représentée sur la figure 6, Dx étant la dose unitaire optimale et Df la dose efficace.



Avec R_0 = coefficient de biodégradation du produit ; V = vitesse de propagation . L_1 = longueur de diffusion :

FIG. 6. -- Détermination de la dose unitaire optimale en fonction de $A = \left(\frac{a}{3R_0} \right) \left(\frac{V}{2 R_0.L_1} \right)^{-\frac{2}{3}}$.

Pour $A = 0$, c'est-à-dire s'il n'y a pas lieu de tenir compte de la décroissance de R en fonction de x/L , on obtient :

$$D(x) (0) = e. Df \quad (e = 2,718)$$

et la portée optimale correspondante $P_x(0) : P_x(0) = \frac{V}{R_0}$.

Pour $A = \infty$, c'est-à-dire si R_0 est nul (produit sans biodégradation) :

$$D_x(\infty) = 20.Df$$

et la portée optimale correspondante :

$$P_x(\infty) = \left(3 \frac{V}{a} \cdot L^{-\frac{2}{3}} \right)^3$$

Pour un A donné, les rapports D_x/Df et $P_x(A) / P_x(0)$ sont fournis dans le tableau IV.

TABLEAU IV
Dosages et portées optimaux dans le cas d'une injection isolée

A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_x/Df	2,72	7,39	12,7	16,3	18,1	18,9	19,4	19,6	19,8	19,9	19,9
$P_x(A)/P_x(0)$	1,00	0,50	0,22	0,106	0,053	0,029	0,018	0,011	0,008	0,005	0,004

Il n'est cependant pas très réaliste de négliger les épandages faits en amont. Pour en tenir compte, nous avons admis que la portée tend vers une limite après un certain nombre d'injections. La somme des doses (D_n), faites en amont immédiat du même point d'injection, tend vers la valeur :

$$D_n = D_x \frac{1}{\exp\left(\frac{x.R}{V}\right) - 1}$$

La portée P_{xs} , en cas d'injections successives, est donc telle que :

$$\frac{R.P_{xs}}{V} = \ln \left(\frac{D_x}{D_n} + 1 \right)$$

Les valeurs du rapport $P_{xs}(A) / P_x(A)$ sont fournies dans le tableau V pour différentes valeurs de A (cf. fig. 7).

TABLEAU V
Portées optimales dans le cas d'injections successives

A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{xs}(A)/P_x(A)$	1,310	1,130	1,08	1,06	1,055	1,052	1,051	1,050	1,050	1,050	1,050

P_{xs} = portée optimale en cas d'injections successives
 P_x = portée optimale théorique

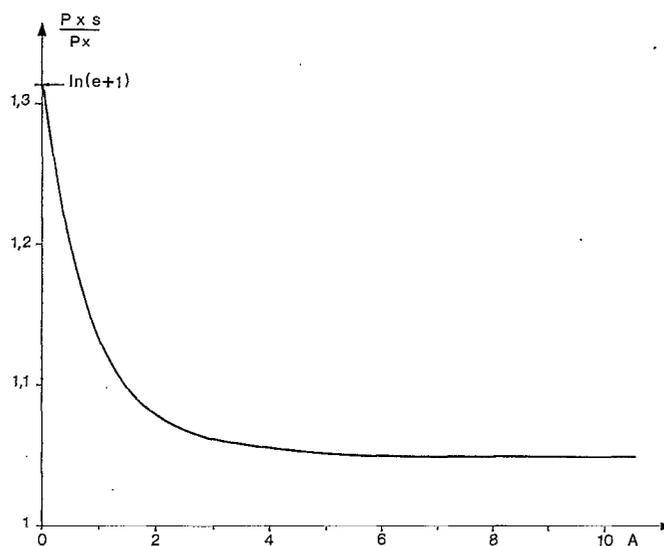
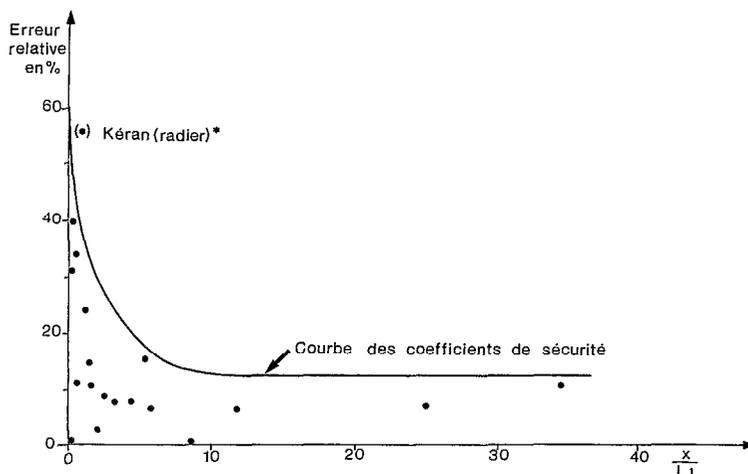


FIG. 7. — Rapport entre la portée optimale en cas d'injections successives et la portée optimale en cas d'injection isolée.

3.1.5. Coefficients de sécurité

Le problème de la détermination des coefficients de sécurité peut se poser dans les termes suivants : connaissant l'incertitude sur la dose pour différentes distances du point d'injection, par quelle valeur faut-il multiplier la dose unitaire pour être sûr de traiter correctement le bief ? On peut admettre que si pour la portée théorique la dose est suffisante elle l'est aussi pour les sections situées en amont. Le coefficient de sécurité à utiliser sera donc celui qui permettra de traiter à coup sûr la section correspondant à la portée. Il faut donc préciser la courbe enveloppe des erreurs relatives en fonction de la distance au point d'injection.

En prenant pour unité de portées la longueur de diffusion, les traçages effectués ont permis de dessiner la courbe enveloppe des erreurs relatives représentée sur la figure 8 et dont nous avons déduit les valeurs des coefficients de sécurité (voir tableau VI).



x = distance au lieu d'injection ; L = longueur de diffusion ; (*) = pour cette section les prélèvements n'ont pas été faits à toutes les buses du radier d'où une incertitude importante sur les valeurs moyennes des concentrations.

FIG. 8. — Erreurs relatives sur les doses en fonction de la distance au lieu d'injection.

TABLEAU VI

Portée (Unité longueur de diffusion)	Coefficient de sécurité à appliquer à la dose unitaire
$P < 0,1$	(1,60)
$0,1 < P < 0,5$	1,50
$0,5 < P < 1,4$	1,40
$1,4 < P < 3$	1,30
$3 < P < 6$	1,20
$P > 6$	1,15

Le protocole standard est très incertain quand les portées sont inférieures au dixième de la longueur de diffusion. Dans les autres cas, les résultats sont satisfaisants.

Les mêmes valeurs des coefficients de sécurité peuvent s'appliquer aux doses unitaires et aux portées.

3.1.6. Les distances de bon mélange

Il ne s'agit plus exactement d'estimer l'un des paramètres du modèle mais de répondre au problème suivant :

A quelle distance d'un gîte isolé faut-il injecter l'insecticide afin que celui-ci ait une action larvicide sur la totalité de la section ?

Pour les insecticides dont l'efficacité est directement liée à la dose, la distance de bon mélange sera celle au-delà de laquelle les intégrales des courbes concentration-temps, sur une section, seront identiques. Il a été défini pour chaque traçage une fourchette pour l'estimation de la distance de bon mélange. Elle est définie, en amont, par la distance de la dernière section où le bon mélange n'est pas atteint, et à l'aval, par celle où ce dernier est observé.

Les résultats sont présentés dans le tableau VII en prenant comme unité la longueur de diffusion.

TABLEAU VII

STATION	Distance de bon mélange (unité L1)	
	Limite inf.	Limite sup.
MANGO	0,25	-
TITIRA	0,25	0,57
KPELOU	-	0,45
BROUFFOU	-	0,90
BASSAR	-	10
N'GAMBOTO (1)	0,65	-
N'GAMBOTO (2)	-	1,10

Vu le nombre très limité de valeurs observées, il est difficile de fixer une valeur pour cette distance de bon mélange. Elle serait de l'ordre de la moitié de la longueur de diffusion.

Si cette distance de bon mélange est très inférieure à la portée, on pourra admettre que le traitement sera efficace et, par sécurité, on effectuera l'injection à cette distance du premier gîte à traiter.

Si, au contraire, elle est du même ordre de grandeur que la portée, la probabilité d'échec devient importante. Cela permet de préciser les limites du protocole standard de traitement qu'on pourrait définir. Les limites seraient atteintes à Mango où la distance de bon mélange serait de 10 km, et sur le Sassandra où elle serait de plus de 50 km.

3.2. LE PROTOCOLE

Le protocole standard de traitement se déduit de ce qui précède puisqu'on peut pour chaque bief contrôlé par une station hydrométrique, fournir aux responsables des traitements, outre une courbe d'étalonnage ;

- une courbe « distance de bon mélange »/débit ;
- une courbe reliant le débit à la dose unitaire optimale à utiliser ;

— une courbe reliant le débit à la portée correspondant au dosage optimal pour des injections isolées ou successives ;
 — un abaque permettant de définir pour chaque débit, la dose unitaire à utiliser en fonction de la longueur à traiter si celle-ci est inférieure à la portée optimale.

Toutes ces courbes peuvent être fournies en tenant compte des coefficients de sécurité.

Pour établir cet ensemble de courbes, il faut connaître :

- les caractéristiques de l'insecticide ;
- pour chaque bief, les relations largeur/débit et vitesse de propagation/débit ;
- la pente du lit de la rivière estimée à partir d'une carte topographique.

La détermination des caractéristiques des insecticides sera traitée ci-dessous.

Pour définir les relations largeur/débit, il suffit au cours des jaugeages qui sont indispensables pour établir la courbe d'étalonnage du bief, de mesurer les largeurs des différentes sections représentatives du bief.

Pour définir les relations vitesses de propagation/débit, il sera indispensable pour les basses eaux de faire des traçages sur quelques kilomètres. Pour les hautes eaux, on pourra admettre que les vitesses de propagation sont égales aux vitesses moyennes mesurées lors des jaugeages à une section représentative du bief.

La connaissance de ces relations permettra alors de définir celle liant la longueur de diffusion au débit, donc d'établir la série des courbes opérationnelles, en suivant les méthodes exposées plus haut. Ce travail extrêmement simple à réaliser sur micro-ordinateur, ne prendra guère plus de temps que l'établissement des courbes d'étalonnage. Un algorithme simplifié est représenté sur la figure 9.

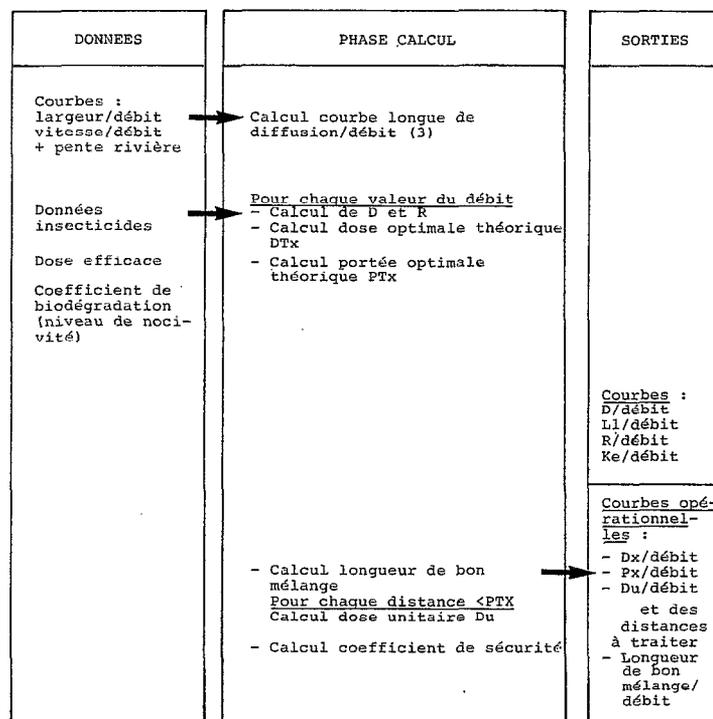


FIG. 9. — Etablissement des courbes opérationnelles (algorithme simplifié).

L'utilisation de ces courbes est très aisée. Supposons par exemple que l'on veuille traiter un bief d'une longueur L donnée, pour un débit Q, il faudra :

1. regarder sur la courbe de distance au bon mélange/débit, la distance, d, séparant le point d'injection du premier gîte à traiter. Appelons L' la valeur L + d. Si d est très grand, le traitement sera incertain ;
2. soit Px (Q) la portée optimale correspondant au débit Q. Si Px (Q) est inférieure à L', il faudra procéder à plusieurs injections de dosage unitaire optimal, séparées entre elles de la distance Px (Q) pour les trois premiers épanchages, de la distance P'x (Q) pour les autres, P'x(Q) étant la portée optimale en cas d'injections successives ;
3. si Px(Q) est supérieure à L', un seul lâcher suffira, la dose unitaire sera déterminée par lecture de l'abaque $Du = f(x, Q)$.

A titre d'exemple il est présenté sur les figures 10 et 11 les courbes opérationnelles obtenues sur deux des biefs étudiés pour les deux insecticides fictifs dont voici les caractéristiques.

$$\text{insecticide 1 : } a = 1,10^{-5} \text{ s}^{-1} \quad R_0 = 5,109^{-5} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{insecticide 2 : } a = 0 \quad R_0 = 1,10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

On peut faire sur ces courbes les commentaires suivants : si l'on peut négliger la décroissance de R dans le temps (insecticide n° 2), le protocole standard de traitement est extrêmement simple puisque :

1. la dose unitaire optimale théorique est identique pour toutes les rivières. Elle est égale à $e \cdot Df$ ($e = 2,718$). Seuls changent les coefficients de sécurité à utiliser et qui seront d'autant plus forts que les longueurs de diffusion seront élevées ;

2. les courbes des portées optimales sont déduites uniquement des valeurs du rapport V/R_0 ;

3. les courbes liant la dose unitaire (exprimée en pourcentage de la portée optimale) à la longueur du bief à traiter sont identiques pour toutes les rivières.

Si la décroissance de R dans le temps n'est plus négligeable (insecticide 1), le protocole de traitement va varier suivant le type des rivières :

1. pour celles où les valeurs des longueurs de diffusion sont toujours faibles comparées aux portées optimales, les doses unitaires théoriques à utiliser sont toujours très voisines de 3 fois la dose efficace avec des différences dans la valeur des coefficients de sécurité et des portées ;

2. pour les rivières qui ont des longueurs de diffusion élevées, les variations de dose unitaire en fonction du débit sont très importantes. Les valeurs du rapport dose unitaire sur la portée peuvent être telles qu'il n'est pas réaliste de retenir ces insecticides pour traiter ce type de rivière.

Lorsque la distance de bon mélange est supérieure à celle de la portée, on peut s'interroger sur l'efficacité des traitements. La limite de validité du protocole serait alors atteinte.

4. DÉTERMINATION DE CARACTÉRISTIQUES DES INSECTICIDES

Pour déterminer les caractéristiques des insecticides, deux types d'essais sont indispensables : des essais en laboratoire pour déterminer l'influence de la température, des essais *in situ* pour préciser les paramètres eux-mêmes à une température de référence.

4.1. ESSAIS EN LABORATOIRE

Ces essais seront comparables à ceux déjà réalisés et dont on a fait état au paragraphe 1.1. Ils auront surtout pour but de préciser la correction à apporter aux résultats des essais *in situ* pour rendre les données homogènes.

D'après la formule présente au paragraphe 1.1. et avec les mêmes notations on a la relation suivante entre D_0 et D_0' , doses ayant la même efficacité à des températures T et T'.

$$\frac{D_0}{D_0'} = \exp \left(- \frac{b}{a} (T - T') \right) \quad (14)$$

Il est donc clair que suivant la valeur du rapport b/a , un écart de quelques degrés sur la température d'eau peut entraîner de grosses différences sur la valeur de la dose efficace. Les essais *in situ* des insecticides ne peuvent donc pas se faire sans tenir compte de ce paramètre.

4.2. ESSAIS IN SITU

Ils ont pour but la détermination des 3 paramètres R_0 , a et Df.

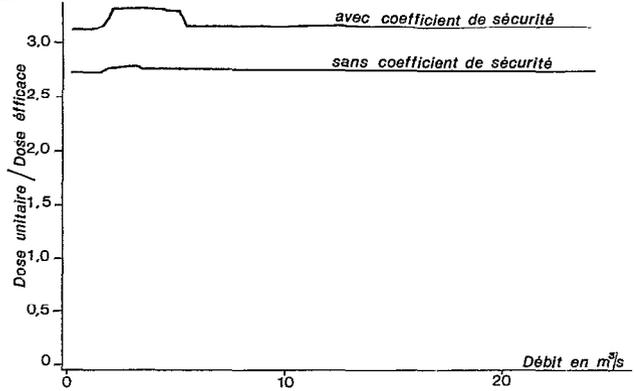
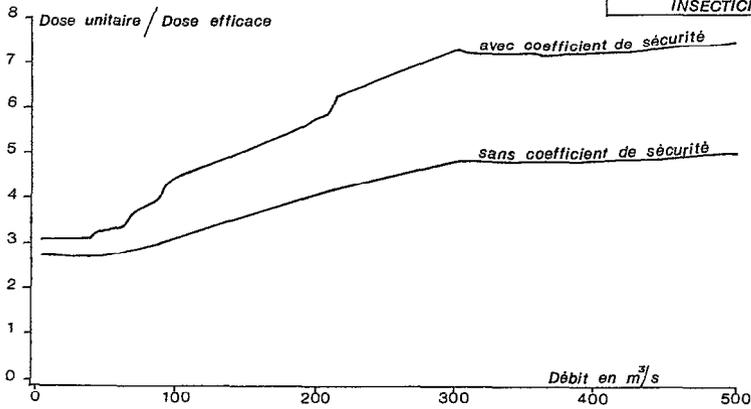
La dose d'insecticide passant à une distance x du point d'injection peut s'exprimer par la relation :

$$D_0(x) = D_u \exp \left(- \frac{x}{V} \left(R_0 + a \left(\frac{x}{L1} \right)^{-\frac{2}{3}} \right) \right)$$

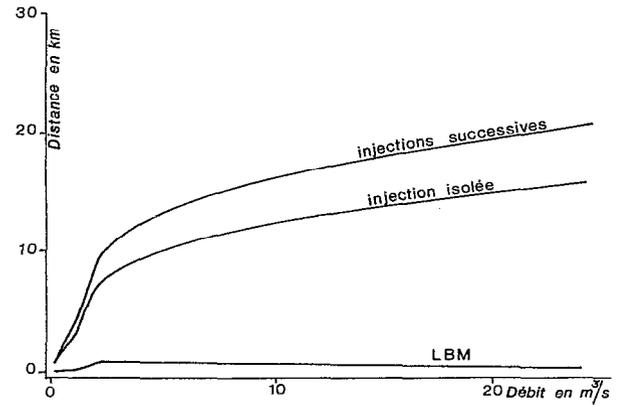
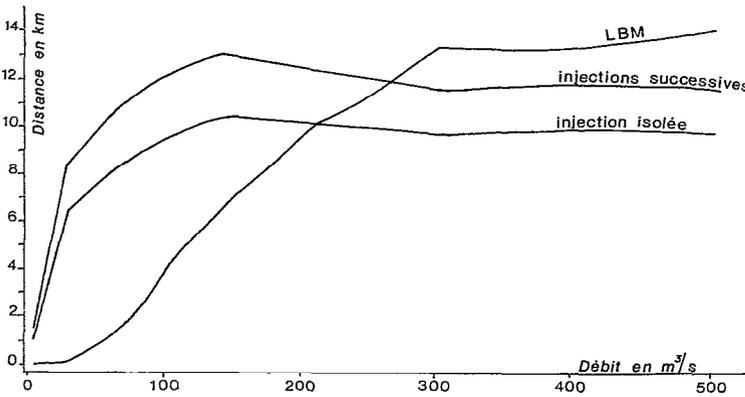
OTI à MANGO

GBAN-HOU à BROUFFOU

Doses optimales en fonction du débit
INSECTICIDE = 1



Portée optimale et longueur de bon mélange
INSECTICIDE = 1



Dose en fonction du débit et de la distance
INSECTICIDE = 1

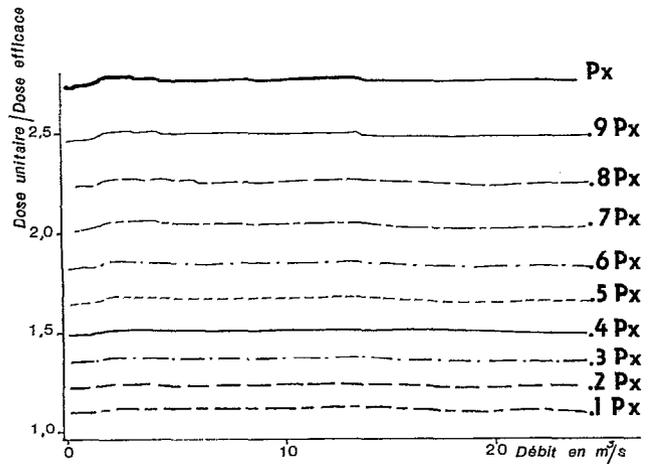
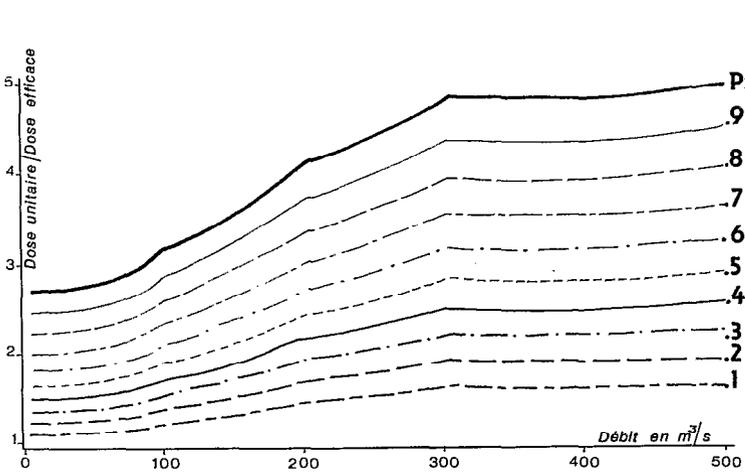
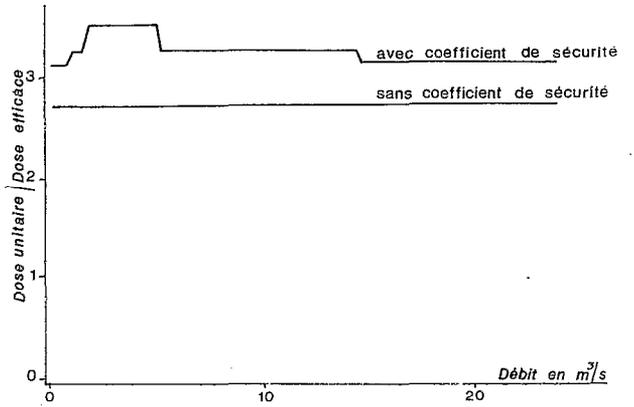
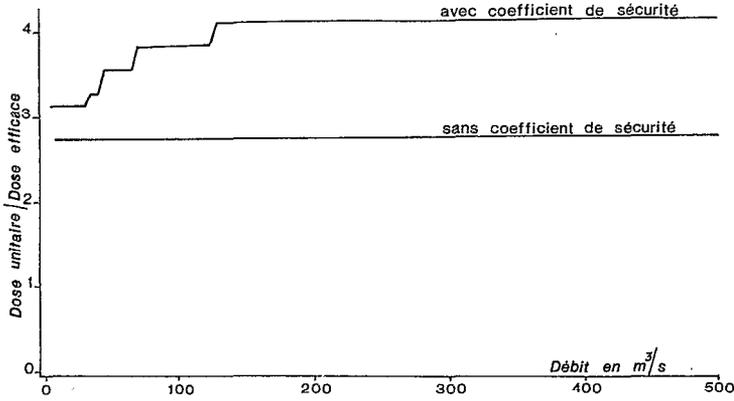


FIG. 10.

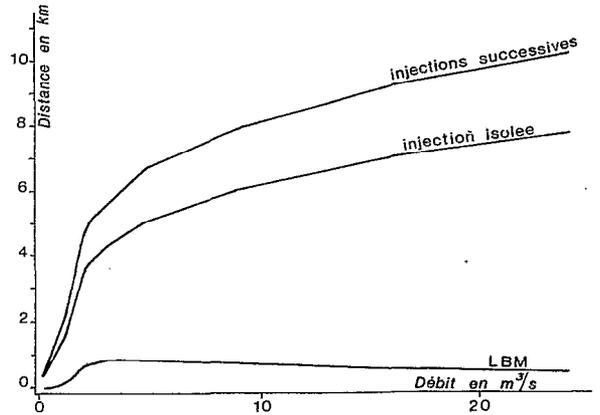
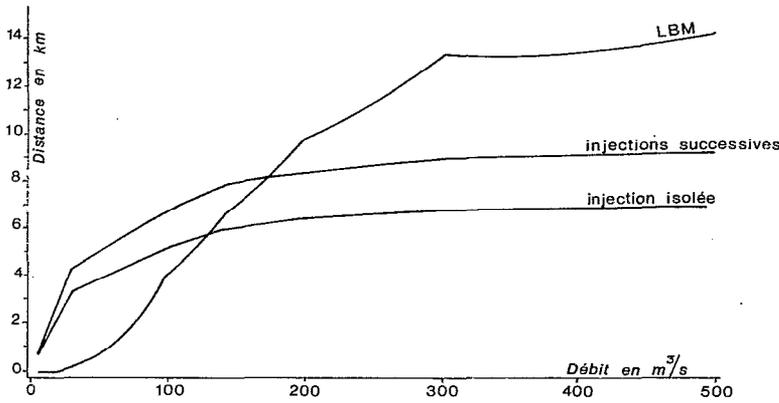
OTI à MANGO

GBAN-HOU à BROUFFOU

Dose optimale en fonction du débit
INSECTICIDE = 2



Portées optimales et longueur de bon mélange
INSECTICIDE = 2



Dose en fonction du débit et de la distance
INSECTICIDE = 2

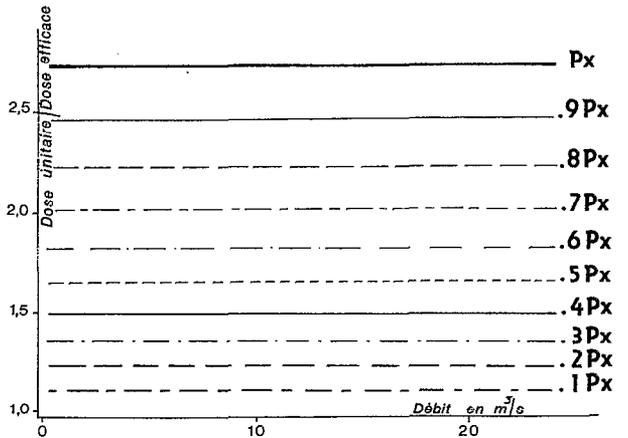
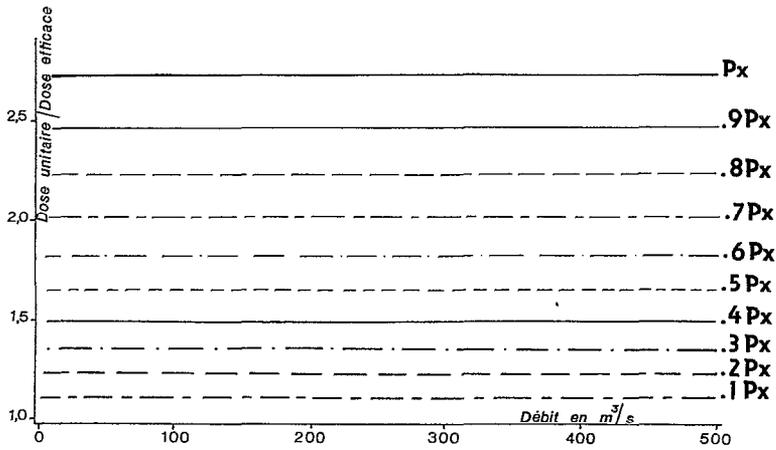


FIG. 11.

Pour un épandage dans une rivière où existent des larves de similies, on peut pour une dose unitaire donnée, déterminer la portée $P(Du)$.

A cette distance, $Do(x)$ est donc égale à la dose efficace pour la température, Te , de l'eau lors de l'essai.

On a donc :

$$Df(te) = Du \exp \left(- \frac{P(Du)}{V} \left(R_0 + a \frac{P(Du)}{L1} \right)^{-\frac{2}{3}} \right)$$

$Do(x)$ et Du étant proportionnelles, on peut utiliser la formule (14), pour calculer la dose unitaire, Du_R , qu'il aurait fallu injecter pour avoir la même portée à la température de référence. Si on note Df_R , la dose efficace correspondante, nous obtenons :

$$Df_R = Du_R \cdot \exp \left(\frac{P(Du_R)}{V} \left(R_0 + a \frac{P(Du_R)}{L1} \right)^{-\frac{2}{3}} \right) \quad (15)$$

Il suffit donc de réaliser un certain nombre d'essais à différents dosages et pour différentes conditions d'écoulement pour définir expérimentalement la courbe Du en fonction de P .

Si on note :

$$P^* = \frac{P}{L1}, \quad P_0^* = \frac{V}{R_0 \cdot L1}, \quad n = \frac{a}{R_0}$$

on a :

$$\ln \left(\frac{Du_R}{Df_R} \right) = (P^* + nP^{*1/3}) \cdot \frac{1}{P_0^*} \quad (16)$$

L'ajustement des paramètres de l'équation (16) pourra se faire mathématiquement ou graphiquement.

CONCLUSION

Pour les produits dont l'action insecticide est directement liée à la dose, les résultats les plus importants de cette étude sont les suivants :

1. la définition des paramètres caractérisant chaque insecticide ;
2. la mise au point d'un protocole d'essais des insecticides afin de préciser ces paramètres ;
3. la définition, pour une température de référence, à partir des paramètres de l'insecticide, d'un protocole standard de traitement simple avec seulement quatre paramètres de l'écoulement ;
 - débit,
 - vitesse,
 - largeur,
 - pente,
4. le moyen de tenir compte de la température de l'eau, si celle-ci est connue (en utilisant la télétransmission, par exemple), pour déduire du protocole standard les doses unitaires à utiliser ;
5. la définition, pour chaque produit, du domaine de validité du protocole standard et des coefficients de sécurité à utiliser.

Pour les insecticides ayant un mode d'action différent, à condition de le connaître, il sera possible, en suivant une démarche comparable à celle présentée, d'établir un protocole.

En revanche pour les rivières ayant des longueurs de diffusion très fortes, c'est-à-dire en général les rivières larges, le protocole standard ne sera pas applicable. Il sera indispensable pour pouvoir traiter convenablement ces rivières d'utiliser une approche bidimensionnelle du problème et il est à craindre que chaque bief à traiter ne soit alors un cas particulier.

REMERCIEMENTS : Les auteurs remercient le Directeur de l'OCP pour son autorisation de diffusion des données et de leur interprétation. Ils remercient également le Chef de la Lutte Antivectorielle de l'OCP pour ses conseils et ses encouragements présents tout au long de l'étude sur le devenir des insecticides.

La technique des traçages n'aurait pas pu être mise en place sans l'accord des Autorités de la République Togolaise et de la République de Côte d'Ivoire.

Le travail n'aurait pas été possible sans le soutien logistique de la Direction Centrale de l'Hydraulique (DH) de la République de Côte d'Ivoire et de la Direction de l'Hydraulique (DH) de la République Togolaise. L'Energie Electrique de Côte d'Ivoire (EECI) a bien voulu communiquer aux auteurs les lâchures des barrages situés en amont des biefs étudiés.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 17 avril 1989

BIBLIOGRAPHIE

- FISCHER (B.), 1967. — The mechanics of dispersion in natural streams. *J. Hydraul. Div.*, ASCE, 93, HY6 : 187-216.
 LE BARBE (L.), GIODA (A.), DELFIEU (G.), WOME (K.), 1987. — Etude expérimentale de la propagation des insecticides dans les rivières. Rapport final. ORSTOM-OCP/OMS, Montpellier, 59 p., *Multigr.*
 SABOL (G.V.), NORDIN (C.F.), 1978. — Dispersion in rivers as related to storage zones. *J. Hydraul. Div.*, ASCE, 104, HY5 : 695-708.
 Université du Québec, 1985. — Programme de recherche sur le Bti. Rapport d'étape, présenté à l'OMS. Programme de lutte contre l'onchocercose. Université du Québec à Trois-Rivières, mai, 5 p. + annexes.
 VALENTINE (E.M.), WOOD (I.R.), 1977. — Longitudinal dispersion with dead zones. *J. Hydraul. Div.*, ASCE, 103, HY9 : 975-990.

ANNEXE

Liste des principaux symboles utilisés (Unités utilisées)

- a [s⁻¹] : paramètre caractéristique de l'insecticide quantifiant la décroissance de R en fonction de la distance.
- A : $A = \left(\frac{a}{3R_0} \right) \left(\frac{V}{2.R_0.L1} \right)^{-\frac{2}{3}}$
- Cx [g.l⁻¹] : concentration maximale.
- C(x,t) [g.l⁻¹] : concentration au temps t après le lâcher, à la distance x du point d'injection.
- D [m².s⁻¹] : coefficient de diffusion longitudinal : $D = 0,37 \cdot L1 \cdot V \left(1 - \exp \left(-0,06 \frac{x}{L1} \right) \right)^{\frac{1}{2}}$
- Df [g.l⁻¹.s] : dose efficace.
- Df_R [g.l⁻¹.s] : dose efficace à la température de référence.
- Do [g.l⁻¹.s] : dose d'insecticide au niveau d'un gîte : $Do = \int_0^{\infty} C(x,t) dt.$
- Du [g.l⁻¹.s] : dose unitaire Du = M/Q.
- Dx [g.l⁻¹.s] : dose unitaire optimale.
- ET [s] : Ecart type de la courbe concentration-temps : $ET = \left[\frac{1}{Du} \int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 C(x,t) dt \right]^{\frac{1}{2}}$
- I : pente de la rivière.
- Ke $\left[s.m^{\frac{1}{2}} \right]$: coefficient d'étalement $Ke = (D/V^3)^{\frac{1}{2}}$
- La [m] : largeur de la rivière.

- L1 [m] : longueur de diffusion : $L1 = \left(\frac{La^7 \cdot V^5}{9,81 \cdot Q^3 \cdot I} \right)^{\frac{1}{2}}$
- M [kg] : masse d'insecticide injecté.
- P* : $P^* = P/L1$.
- P(Du) [m] : Portée correspondant à la dose unitaire (Du).
- P₀* : $P_0^* = V / (R_0 \cdot L1)$.
- Px [m] : portée correspondant à une dose optimale pour une injection isolée.
- Pxs [m] : portée correspondant à une dose optimale pour une série d'injections le long d'une rivière.
- Q [m³.s⁻¹] : débit.
- R [s⁻¹] : coefficient de disparition de l'insecticide : $R = R_0 + a \left(\frac{x}{L1} \right)^{\frac{2}{3}}$
- R₀ [s⁻¹] : coefficient de biodégradation de l'insecticide.
- TT [s] : durée du nuage.
- TTx [s] : durée du nuage correspondant à la dose optimale.
- Tx [s] : date d'apparition du maximum.
- V [m.s⁻¹] : vitesse de propagation.
- W [m.s⁻¹] : vitesse apparente de diffusion.
- x [m] : distance à la section d'injection.