

Frédéric Darriet

# La lutte contre les moustiques nuisants et vecteurs de maladies



KARTHALA-ORSTOM

**LA LUTTE CONTRE LES MOUSTIQUES  
NUISANTS ET VECTEURS DE MALADIES**

Couverture : Représentation d'un moustique. Peinture ornant un des murs en terre du Centre de Santé communautaire du village de Zaïpobly en bordure de la forêt de Taï dans l'ouest de la Côte-d'Ivoire. Photo : Frédéric Darriet.

© Éditions KARTHALA, 1998  
ISBN (Karthala) : 2-86537-864-0  
ISBN (Orstom) : 2-7099-1367-4

**Frédéric DARRIET**

# **La lutte contre les moustiques nuisants et vecteurs de maladies**

**L'évaluation de nouveaux insecticides  
utilisables contre les moustiques en Afrique tropicale**

**Éditions KARTHALA  
22-24, boulevard Arago  
75013 Paris**

**Éditions de l'ORSTOM  
213, rue La Fayette  
75010 Paris**



## Remerciements

Je tiens à remercier :

M. Pierre Carnevale et Jean-Marc Hougard qui m'ont toujours soutenu dans mes recherches et en qui j'ai toujours trouvé la confiance et les meilleurs conseils,

M. Pierre Guillet qui a bien voulu me consacrer une partie de son temps pour me faire bénéficier de sa grande compétence et de sa longue expérience,

M. François Rivière à qui je dois mon plus profond respect pour ses inestimables qualités scientifiques et humaines,

à tous mes collègues et amis de Bobo-Dioulasso au Burkina-Faso, de Yaoundé et de Maroua au Cameroun et de Bouaké en Côte-d'Ivoire.

Je dédie ce livre à mon épouse et mes trois enfants.

# Introduction

Pour préserver sa santé, l'homme s'est toujours éloigné ou défendu des agressions qui nuisent à son confort et à son économie. Dès l'Antiquité, les sages recommandaient que la construction des villes et des villages se fasse loin des marécages. Puis la découverte des premières substances insecticides d'origines minérale et végétale permit aux hommes de mieux se protéger contre les insectes piqueurs, alors seulement considérés comme nuisance et non comme vecteurs de maladies. Il fallut attendre le XIX<sup>e</sup> siècle pour que les insectes soient enfin identifiés comme propagateurs de germes infectieux et la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle pour que les premiers insecticides de synthèse apparaissent sur le marché. Les organochlorés ainsi qu'une gamme étendue d'organophosphorés furent alors utilisés dans tous les domaines, que ce soit en agriculture ou en santé publique. Ce fut d'ailleurs peu de temps après la mise en service de ces insecticides que l'histoire rendait compte des premières souches d'insectes résistants ainsi qu'une accumulation anormale de résidus chlorés dans le sol et les multiples paliers de la chaîne alimentaire. La communauté scientifique se mit à dresser le bilan des erreurs passées, se rendant compte que l'usage abusif et pas toujours contrôlé des pesticides avait contaminé et parfois même détruit de vastes niches écologiques. Il ne fut plus alors question d'éluder les problèmes que posaient les nouveaux insecticides. Il fallait établir par le biais d'évaluations rigoureuses les doses optimales qui devaient permettre le contrôle des insectes nuisants ou vecteurs de maladies, sans occasionner par ailleurs d'effets néfastes sur l'environnement. Il est du devoir de l'expérimentateur de comprendre la dynamique d'action, les principes d'accumulation ou au contraire de dégradation de ces produits dans la nature. De nos jours, il est absolument nécessaire que les utilisateurs prennent conscience qu'avec la naissance des insecticides de synthèse la prudence doit intimement se lier à la rigueur des dispositifs de lutte mis en place.

Cet ouvrage se consacre d'abord à l'histoire des moustiques, des hommes et des insecticides, une histoire qui retrace l'évolution mouvementée des uns dans leur rapport aux autres, des premiers âges de l'histoire à l'époque moderne. Le chapitre portant sur la recherche expérimentale expose et commente les résultats des différentes évaluations

consacrées au contrôle des moustiques, tout particulièrement en Afrique tropicale. Ces études se sont déroulées au Burkina Faso en Afrique Occidentale puis au Cameroun en Afrique Centrale. Que ce soit dans l'un ou l'autre de ces deux pays, les grandes facilités de travail combinées à une présence culidienne variée ont permis de mener à bien des évaluations « pilotes » qui bien souvent ont été reprises comme modèle expérimental pour d'autres études, dans d'autres régions du monde. La compréhension des mécanismes d'action des insecticides ainsi que l'acquisition de nouvelles techniques demeurent les pivots des actions de demain, mais encore faudrait-il les inclure dans un contexte de lutte intégrée qui, même de nos jours, pose toujours quelques épineux problèmes de concrétisation.

# 1

## Des moustiques et des hommes

Une histoire qui a débuté il y a quelque 500 millions d'années et dont les racines se perdent dans les brumes d'un passé pas toujours facile à cerner par les scientifiques. Les paléontologistes ont donc retracé l'histoire des insectes à partir d'une myriade de fossiles récoltés un peu partout dans le monde, fouillant tourbières, tufs calcaires, phosphorites et houille pour exhumer aussi soigneusement que possible les inappréciables empreintes minéralogiques. Comme pour nous montrer la nature ubiquiste de ces êtres, l'ambre de la Baltique et le copal des tropiques n'ont-ils pas eux aussi inclus des centaines d'espèces primitives ? Puis l'homme est venu, ce bipède qui bouleversa les règnes et conquiert le monde avec la seule force de son intelligence. L'insecte qui ne devait sa survie qu'à son extraordinaire capacité d'adaptation et de reproduction trouva en l'homme un ennemi redoutable qui lui, se mit à obéir à des motivations bien plus pressantes que le seul instinct de conservation.

### 1.1. Insectes, diptères et moustiques

Le Tertiaire (Cénozoïque) et le Quaternaire (Paléolithique), 60 millions d'années au total au cours desquelles naquirent puis s'épanouirent jusqu'à l'homme moderne les mammifères. Au début du Tertiaire, lorsque les mammifères se mirent à coloniser la Terre entière, les insectes existaient déjà tels qu'ils se présentent aujourd'hui. Au Secondaire (Mésozoïque : -240 à -65 M.a.), s'instaura une ère de gigantisme où les dinosaures et les amphibiens occupaient la totalité des écosystèmes terrestres et aquatiques. A cette époque lointaine, la plupart des insectes étaient voisins de ceux qui vivent encore de nos jours.

Il faut donc remonter jusqu'au Carbonifère (-360 M.a.) de l'ère Primaire (Paléozoïque) pour découvrir des fossiles dont les ordres ont aujourd'hui

d'hui disparu. Les paléontologistes estiment que l'évolution des ptérygotes les plus primitifs a débuté il y a quelques 500 millions d'années (Jeannel, 1949).

Mais revenons à la fin de l'ère Primaire (Permien : -289 M.a.). C'est en effet à cette période qu'apparut l'ancêtre des diptères, encore appelé protodiptère ou tétraptère car il possédait deux paires d'ailes semblables. La dégénérescence des ailes postérieures en balanciers équilibrants s'est opérée au début du Secondaire (Trias : -247 M.a.). Des fossiles de diptères véritables ont été retrouvés dans une strate géologique datant du Trias supérieur dans les environs du Mont Crosby dans le Queensland australien. De par l'observation de ces fossiles, les entomologistes ont pu affirmer que ces diptères au corps grêle et pourvus de longues antennes étaient des nématocères – sous-ordre auquel appartiennent les moustiques – et que ces nématocères étaient nés sur l'immense territoire de la Gondwanie qui regroupait en ces temps reculés l'Afrique, l'Amérique du Sud, l'Australie, l'Inde ainsi que l'actuel Antarctique (Jeannel, 1949). Il faut préciser qu'au Paléozoïque le domaine terrestre était fractionné en trois grands asiles continentaux séparés par les mers mésogéennes : la Gondwanie située dans l'hémisphère sud, la Laurentie (les actuels Europe, Amérique du Nord et Groënland) et l'Angarie (Eurasie) dans l'hémisphère nord.

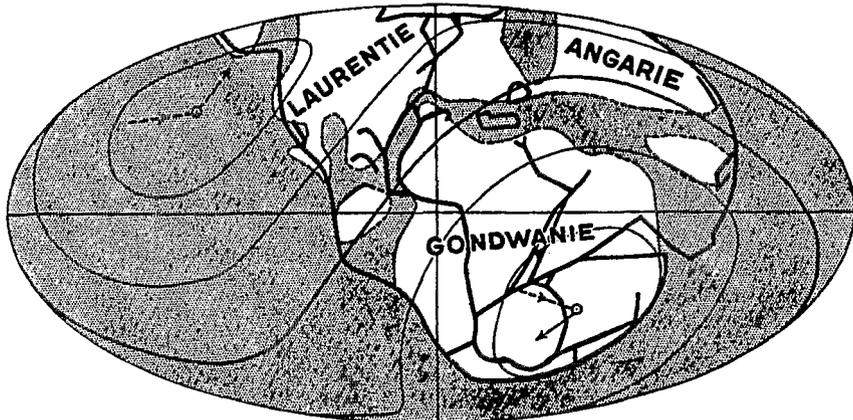


Figure 1

**Les trois grands asiles du carbonifère supérieur  
(d'après Köppen et Wegener, 1924)**

Au Dévonien (- 400 M.a.), le pôle nord se situant en plein cœur de l'océan Pacifique, la Gondwanie primitive passait par des périodes hivernales et estivales. La Laurentie au climat chaud et humide était recouverte d'une abondante forêt équatoriale alors que l'Angarie au climat toujours tempéré servait d'asile de conservation pour de nombreuses espèces ani-

males. Cette alternance saisonnière qui a longtemps caractérisé la Gondwanie a engendré des ordres d'insectes qui devaient se protéger du froid hivernal par une diapause nymphale. Chaque printemps, lorsque le climat se faisait de nouveau plus clément, la nymphose s'achevait sur l'émergence d'un imago. Les diptères appartiennent à ces insectes à métamorphose complète ou holométaboles qui passent par les stades successifs de l'œuf, de la larve, de la nymphe et de l'adulte.

A partir du Secondaire, le fractionnement des asiles en plusieurs continents fit progressivement basculer le pôle nord vers la Laurentie qui, d'équatoriale se refroidit doucement pour devenir plus aride. Les principaux ordres d'insectes habitués à la chaleur humide des forêts marécageuses s'éteignirent rapidement. Par contre en Gondwanie, le climat devint plus chaud et par là même équivalent à celui de la Laurentie. Il s'ensuivit que la plupart des grandes lignées gondwaniennes envahirent la Laurentie et l'Angarie et que les diptères nématocères se dispersèrent sur toute la surface de la planète. Les moustiques sont assurément apparus bien avant les mammifères. Ces insectes étaient-ils déjà hémato-phages avant la venue des animaux à sang chaud ? La réponse est très certainement oui. Le comportement des *Culicidae* actuels qui, par simple déviation zoophile piquent les reptiles et les batraciens, laisse supposer que les tendances hémato-phages de ces diptères remontent au Crétacé ou au Jurassique (-204 à -130 M.a.) (Séguy, 1951).

## 1.2. L'avènement humain

Il est stupéfiant de constater que lorsque les premiers hominidés apparurent sur la Terre, les moustiques avait déjà conquis le monde depuis plus de 200 millions d'années. Au cours de ces derniers millions d'années, les hominiens ont occupé des faciès écologiques aussi multiples que variés. Lorsque les plus vieilles lignées humaines ont quitté la forêt pour s'aventurer dans les immenses savanes du continent africain, les hominiens ont alors pu se regrouper en sociétés plus importantes qui leur ont permis d'exploiter des systèmes lacustres tels que les lacs, les marais, les fleuves et les lagunes. Ces plans d'eaux ont fourni aux hommes l'eau de boisson et de la toilette mais aussi une abondante nourriture carnée constituée de poissons et d'autres animaux. L'eau a toujours attiré l'homme car, sans eau, il ne peut y avoir de vie organisée. Les terres riches en alluvions caractérisant les abords fluviaux lui permirent aussi de passer du simple stade de la cueillette à une agriculture vivrière qui retrécit progressivement les dures périodes de disette. Mais en s'installant près des rives et des rivages, les sociétés humaines se sont par la même occasion rappro-

chées de nombreux insectes piqueurs dont les stades larvaires se déroulent en milieu aquatique. Les moustiques trouvèrent en l'homme une nouvelle source de nourriture et parasites et virus y trouvèrent de concert un nouvel hôte. Les moustiques ont été dans l'histoire des maladies les acteurs de nombreux transferts parasitaires. Les parasites des hommes modernes sont en effet les lointains descendants de souches qu'abritaient à l'origine les primates mais aussi les rongeurs, les carnivores et les ongulés (Combes, 1990).

La proximité des habitats aux abords des marais et autres environnements lacustres entraîna chez les hommes une méfiance de plus en plus aiguë à l'encontre des moustiques. La nuisance occasionnée par leurs piqûres, associée à la transmission de maladies que la médecine et l'entomologie ont pu mettre en évidence, ont fait du moustique un insecte maudit que les hommes pourchassent depuis sans répit. Il est intéressant de constater qu'à travers la logique ou l'imaginaire de beaucoup de civilisations antiques et même contemporaines, le moustique reste le symbole de l'agressivité. Il est également la représentation de l'obstination malfaisante qui cherche à violer l'intimité de sa victime pour se repaître de son sang (Chevalier et Gheerbrant, 1969). D'autre part les lieux où prolifèrent les moustiques ont toujours été perçus comme des endroits malsains car peuplés d'eaux mortes qui fermentent et contribuent à la multiplication des insectes et des maladies. La médecine alla même jusqu'à imaginer que les fièvres liées aux marécages étaient dues à des miasmes de types fongique, *Alga miasmatica* ou bactérien, *Bacillus malariae*. Le mot *malaria* qui en italien s'écrit *mala aria* ne se traduit-il pas par *mauvais air* ? Le *paludisme* synonyme de *malaria* est composé de la racine latine *paludis* qui veut dire marais. Que ce soient les termes de *malaria* ou de *paludisme*, il en ressort qu'à travers les âges et dans l'esprit des hommes les fièvres sont générées puis véhiculées par cet air malsain venant des marécages. Ce fut aux environs de 450 avant Jésus-Christ que le médecin Grec Hippocrate recommanda aux urbanistes de construire les villes loin des marais. A cette époque où la science n'avait encore pas découvert le lien qui existe entre le moustique et la maladie, Hippocrate avait émis une réflexion générée par sa seule faculté d'observation, démarche intellectuelle d'autant plus précieuse qu'en ces temps éloignés il n'existait aucun remède véritable aux problèmes de santé publique. Ce fut bien plus tard que les premières actions de lutte contre les vecteurs et les nuisances furent relatées, tant à travers les époques que les espaces géographiques de notre planète. Nous reviendrons d'ailleurs plus longuement sur la découverte des premières substances naturelles à action insecticide qui, le temps passant, furent améliorées pour donner les plus grandes générations des insecticides de synthèse.

Mais donnons d'abord un visage à ces moustiques ! Qui sont-ils ? Où vivent-ils ? Que transmettent-ils ? Une infinité de questions que l'homme

se pose depuis des milliers d'années. En 1602, le savant Italien Aldrovando Ulisse écrivait une œuvre intitulée « De Animalibus Insectis libri septem » dans laquelle il représenta dans un chapitre dénommé « de Culicibus » une esquisse fidèle d'un moustique en vol qu'il baptisa *Culex communis*. Ce livre de littérature médiévale dont une copie est conservée à la bibliothèque universitaire de Cambridge est considéré comme le travail le plus ancien sur les moustiques (Christophers, 1960). Parmi les grandes œuvres modernes, citons le livre sur les culicidés du nord et du centre de l'Amérique écrit par Howard, Dyard et Knabs en 1912. En 1941 et 1952, les entomologistes anglais Edwards et Hopkins publiaient leurs livres « Mosquitoes of the Ethiopian Region » et en 1968, Gillies et de Meillon « The Anophelinae of Africa south of the Sahara ». Beaucoup d'autres livres au contenu tout aussi prestigieux ont été rédigés sur le thème des moustiques, leur biologie, leur systématique, leur écologie mais peu d'entre eux relatent les aspects historiques et corrélatifs qui existent entre le moustique et l'homme et plus récemment encore entre le moustique, l'homme et les insecticides. Le moustique n'a jamais été le grand ami des hommes. Alors ces hommes, pour mieux les étudier et mieux les combattre aussi, ont sillonné les cinq continents de notre vaste monde, prospectant savane, forêt, montagne, mangrove et marais afin de percer le secret de leur biologie et de leur écologie.

### 1.3. La bioécologie des moustiques

Le développement des moustiques (famille des *Culicidae*) se caractérise par deux phases distinctes.

– Un cycle préimaginal qui se déroule en milieu aquatique et regroupe l'œuf, les quatre stades larvaires et la nymphe.

– La phase aérienne qui concerne l'adulte ailé ou imago.

Les moustiques comprennent plus de 2 000 espèces disséminées sur toute la surface du globe. Les espèces sont cependant plus nombreuses dans les zones tropicales et équatoriales que dans les régions tempérées car ces insectes supportent mal les écarts thermiques.

Les mâles comme les femelles se nourrissent de jus sucré, nectars et autres sécrétions végétales, mais seules les femelles ont en plus un régime hématophage. Ce sont donc les femelles qui jouent un rôle actif dans la dissémination des maladies.

Les sujets des deux sexes s'accouplent d'abord en vol puis sur le sol. La femelle détient la particularité de maintenir en vie jusqu'à sa mort les gamètes mâles dans une ampoule globulaire appelée spermathèque. Grâce à cette caractéristique, les femelles ne s'accouplent qu'une fois et ce sont

les repas de sang qui apportent les substances nutritives indispensables à chaque maturation ovarienne (Detinova, 1963).

Les œufs fécondés sont pondus à la surface de collections d'eau où ils poursuivent leur embryogénèse. De ces œufs, à maturité, éclosent des larves de stade 1 qui jusqu'au stade 4 se nourrissent de matières organiques, de microorganismes et même de proies vivantes pour les espèces carnassières. Malgré leur évolution aquatique, les larves de moustiques ont une respiration aérienne qui se fait à l'aide d'un siphon ou de stigmates respiratoires. La larve de stade 4 se transforme ensuite en une nymphe qui ne s'alimente plus, pour donner dans un laps de temps variable selon les espèces et l'environnement climatique un adulte ailé qui prend rapidement son envol.

### 1.3.1. La sous-famille des Anophelinae

Riche de 400 espèces réparties dans le monde entier, le genre *Anopheles* vecteur du paludisme humain peut aussi transmettre la filariose de Bancroft ainsi que diverses arboviroses.

Au cours d'une ponte, la femelle dépose en moyenne 150 œufs. Les œufs ovalaires, presque elliptiques, à coque gaufrée et pourvue de deux flotteurs latéraux, sont déposés séparément à la surface des eaux non polluées qui parsèment les villes, les savanes et les forêts. A une température de 25°C, la croissance de la larve dure de 10 à 20 jours selon l'espèce. La longévité de l'adulte (photo n° 1) est d'environ 20 jours, très rarement plus d'un mois. Les anophèles piquent toute la nuit avec cependant un pic d'agressivité qui se manifeste plus particulièrement entre minuit et quatre heures du matin.

En Afrique, au sud du Sahara, une dizaine d'espèces d'anophèles sont directement impliquées dans la transmission des paludismes mais seuls deux grands complexes d'espèces assurent la presque totalité de cette transmission : *A. gambiae* Giles, 1902 et *A. funestus* Giles, 1900.

Le long des grands fleuves, des petites rivières de forêt et des marigots aux eaux profondes, sévit aussi une autre espèce, *A. nili* qui, dans ces biotopes particuliers demeure un important vecteur des paludismes.

#### 1.3.1.1. Le complexe *A. gambiae* ou *A. gambiae sensu lato*

Les six espèces jumelles du complexe *A. gambiae* (*A. gambiae sensu stricto* ; *A. arabiensis* ; *A. melas* ; *A. merus* ; *A. bwambae* et *A. quadrianulatus*) sévissent dans la plupart des zones de forêt, de savane et du littoral africain en ne dépassant généralement pas les 1 500 mètres d'altitude. Pour *A. gambiae* s.s. et *A. arabiensis*, les gîtes de prédilection sont des collections d'eau calmes, non polluées, peu profondes et bien enso-

leillées telles que les mares, les rizières, les flaques, les empreintes d'hommes et d'animaux. Les larves d'*A. melas* et d'*A. merus* vivent dans les eaux saumâtres du littoral Atlantique et de l'océan Indien de l'Afrique. Les larves d'*A. espèce D* nouvellement baptisée *A. bwambae* (White, 1980), ont été trouvées dans les marécages aux eaux minéralisées d'origine géothermale de la forêt de Semliki à la frontière de l'Ouganda et du Zaïre.

Les densités anophéliennes varient essentiellement en fonction des pluies. Ainsi en savane les populations sont maximales à la première moitié de la saison pluvieuse, alors qu'en forêt, elles demeurent toujours relativement faibles sous le couvert des arbres. Les femelles piquent de préférence les hommes (anthropophilie) mais elles peuvent aussi se montrer zoophile lorsque du bétail se trouve à proximité des zones habitées. *A. quadriannulatus* est le seul représentant du complexe à avoir un régime strictement zoophage.

*A. gambiae sensu lato* s'avère dans l'ensemble naturellement endophage et endophile c'est-à-dire que les femelles piquent à l'intérieur des cases d'habitation et y restent pour digérer leur repas de sang mais les proportions d'endophagie-exophagie et d'endophilie-exophilie varient selon les saisons, la température et l'écologie des espèces étudiées.

#### 1.3.1.2. Le complexe *A. funestus* ou *A. funestus sensu lato*

Trois espèces appartiennent à ce complexe, *A. lesoni* et *A. rivolorum* strictement zoophages donc sans incidence épidémiologique et *A. funestus sensu stricto* qui, lui, pique l'homme et transmet des maladies. *A. funestus* est répandu dans toute l'Afrique subsaharienne mais il est plus abondant en savane qu'en forêt ; contrairement à *A. gambiae*, il se rencontre à des altitudes comprises entre 1 500 et 2 000 mètres.

Leurs gîtes sont des collections d'eau profondes, claires, permanentes ou semi-permanentes dont le couvert végétal assure des zones d'ombre nombreuses et importantes. Ce type de gîtes est essentiellement représenté par les grandes mares, les marécages, les bas-fonds inondés, les abords des cours d'eau et des lacs.

En savane, les densités sont maximales lorsque les gîtes profonds sont naturellement mis en eau par les pluies, ce qui correspond à la deuxième moitié de la saison pluvieuse et au début de la saison sèche. En forêt, les populations se montrent plus stables mais également en beaucoup plus faibles densités.

Les proportions d'endophagie-exophagie, d'anthropophilie-zoophilie et d'endophilie-exophilie d'*A. funestus sensu stricto* ne sont guère différentes de celles observées pour le complexe *A. gambiae*. La dynamique de leurs populations obéit sensiblement aux mêmes critères biotiques et abiotiques que sont la proximité des animaux, la température, les saisons et l'environnement.

### 1.3.2. La sous-famille des Aedinae

Le genre *Aedes* se compose d'une multitude d'espèces qui se caractérisent par leur capacité à transmettre des maladies à virus appelées arboviroses (de arthropod born viruses) et dont les plus redoutables sont la fièvre jaune et la dengue. Dans certaines parties du monde, en Polynésie en particulier, les *Aedes* sont également les vecteurs de la filariose de Bancroft.

Les œufs ovalaires sont marqués d'une dense formation réticulée. Ils sont pondus le plus souvent à la limite de l'eau, dans des gîtes de petites dimensions dont la caractéristique commune est une eau calme sans remous important. Ces œufs possèdent la particularité de résister à de longues périodes de dessiccation. Cette période de dormance proche de la diapause peut durer un an et elle est en général rompue par une immersion unique ou répétée qui se produit en début de la saison des pluies. La larve dont le siphon respiratoire est fortement développé se tient presque perpendiculaire à la surface des eaux. La durée du cycle larvaire est d'une semaine environ ; à son terme émerge un adulte ailé qui vit de 4 à 5 semaines selon la saison. La femelle (photo n° 2) anthropophile et primatophile est endophage ou exophage et prend son repas de sang de préférence au crépuscule, entre 16 et 19 heures. Comme pour les anophèles, la densité des *Aedes* est étroitement liée à la pluviométrie. Dans les régions tropicales leurs populations sont maximales pendant toute la durée de la saison des pluies alors qu'en zone équatoriale elles demeurent beaucoup plus stables.

En Afrique subsaharienne, les *Aedinae* se partagent des aires de distribution dont les caractéristiques sont très diverses. Les entomologistes distinguent au sein de cette grande sous-famille les espèces selvatiques et les espèces péri-domestiques et domestiques.

#### 1.3.2.1. Les *Aedes* selvatiques

Les principales espèces d'*Aedes* selvatiques vectrices de fièvre jaune et autres arboviroses sont *A. (Diceromyia) furcifer*, *A. (D) taylori*, *A. (Stegomyia) mettalicus*, *A. (S) luteocephalus*, *A. (S) unilineatus*, *A. (S) opok* et *A. (S) africanus*. Tous ces moustiques vivent dans les galeries forestières le long des cours d'eau mais aussi dans les zones de forêt-relique disséminées un peu partout en savane. En zone de forêt humide équatoriale, *A. (S) africanus* et *A. (S) simpsoni* sont les plus représentés.

Les gîtes sont constitués de trous d'arbres mis naturellement en eau par les pluies, de noix de coco cassées, de cabosses de cacao évidées, d'entrelacs de racines, de bambous cassés, de feuilles engainantes (bananier, aloès, taro...), de coquilles d'escargots, d'anfractuosités dans les rochers et de toute une myriade d'autres gîtes tous aussi disparates. Ces plans d'eau de petites dimensions ne sont généralement pas pollués mais

souvent encombrés de matières végétales en décomposition. Les femelles sont anthropophiles mais aussi et surtout primatophiles car elles se nourrissent du sang des singes qui évoluent dans les forêts, les galeries forestières et leurs abords immédiats.

### 1.3.2.2. Les *Aedes* péri-domestiques et domestiques

Les *Aedes* qui répondent à ces deux appellations sont des moustiques qui évoluent dans les agglomérations urbaines où ils se comportent comme des vecteurs domestiques. Deux espèces sont essentiellement représentées : *A. (Aedimorphus) vittatus* ainsi que l'espèce la plus commune du genre, *A. (Stegomyia) aegypti* Linné, 1762.

*A. vittatus* vit plus spécifiquement dans les trous de rochers qui avoisinent les quartiers d'habitations. Les larves d'*A. aegypti* se développent le plus souvent dans des gîtes fabriqués de main d'homme à l'intérieur ou à l'extérieur des maisons.

Sont considérés comme péri-domestiques, les plans d'eau de type abreuvoirs, pierres creuses, morceaux de bois évidés, vieux pneus et boîtes de conserve abandonnées. Ces gîtes qui se caractérisent par des eaux souvent riches en matières organiques sont pour la plupart des résidus de l'activité humaine. Parmi les gîtes domestiques se classent les poteries contenant les eaux de boissons et les pots à médicaments dans lesquels les villageois procèdent à leurs décoctions et macérations.

En fait, *A. aegypti* s'adapte à toutes les petites collections d'eaux calmes et pas trop souillées. Ce moustique qui de nos jours montre une activité essentiellement urbaine a aussi été décrit dans des environnements sauvages différents de par la nature même du biotope et de ses gîtes. *A. aegypti* a été retrouvée dans la forêt de Kaimosi au Kenya à une altitude de 1980 mètres (Garnham *et al.*, 1946) ainsi qu'au sommet du Mont Bizen en Erythrée à quelque 2370 mètres (Mara, 1946). Ces deux relevés concernent l'espèce sauvage zoophage mais de telles altitudes ont également été relevées en Inde pour la forme anthropophile (Barraud, 1928).

### 1.3.3. La sous-famille des Culicinae

Deux genres majeurs se partagent cette sous-famille, le genre *Mansonia* et le genre *Culex*.

#### 1.3.3.1. Le genre *Mansonia*

Les *Mansonia* ne sont vecteurs de maladies pour l'homme que dans certaines régions du globe. En Malaisie et dans la plupart des contrées du sud-est asiatique, ces moustiques véhiculent la filariose de Bancroft ainsi que quelques autres filarioses lymphatiques.

Les œufs pondus sont soit déposés isolément sur les plantes aquatiques, soit par petits paquets à la surface des eaux. Ce sont des moustiques qui fréquentent des gîtes relativement étendus et profonds aux rivages envahis par des plantes herbacées. Ces plans d'eau extrêmement variés sont représentés par les mares, les marais, les bas-fonds inondés, les rizières mais surtout les lacs naturels et les retenues d'eau engendrées par la création de barrages à usages hydroélectrique et agricole.

Dès leur éclosion, les larves se fixent à l'aide de crochets sur les racines adventives et les tiges immergées des végétaux où grâce à un siphon perforant, leurs stigmates respiratoires entrent en contact avec les canaux aérifères des plantes (Séguy, 1951). Elles peuvent aussi comme les larves des autres moustiques remonter à la surface des gîtes et respirer par l'intermédiaire de leur court siphon conique.

En Afrique au sud du Sahara, le genre *Mansonia*, auxquelles appartiennent les espèces *uniformis* et *africana*, est très agressif pour l'homme, sans toutefois transmettre de filariose. Ces moustiques nuisent principalement au confort des villageois qui près des lacs exercent des activités agricoles et piscicoles importantes. De plus, en raison de la nature pérenne des gîtes dans lesquels ces moustiques se développent, les femelles qui piquent du crépuscule jusqu'à l'aube sévissent toute l'année, même en pleine saison sèche.

### 1.3.3.2. Le genre *Culex*

Le genre *Culex* regroupe de très nombreux représentants, cependant nous nous limiterons à l'étude d'une seule espèce : *C. quinquefasciatus* Say, 1823 (= *C. pipiens fatigans* Wiedeman, 1828), vecteur urbain de la filariose de Bancroft en Asie, en Afrique orientale, à Madagascar et dans la plupart des îles du sud-ouest de l'océan Indien (Seychelles, Comores, Maurice, Réunion...) (Subra, 1974).

La bioécologie de ce moustique est de nos jours indissociablement liée à l'activité des hommes et à l'évolution de leurs villes.

Depuis une trentaine d'années, le phénomène de l'urbanisation revêt une importance croissante en Afrique. L'expansion des villes se fait souvent autour d'une agglomération centrale qui très vite se trouve flanquée de banlieues anarchiques aux structures sanitaires rudimentaires, voire inexistantes. Les résidents alors confrontés au problème de l'élimination de leurs eaux usées construisent des puisards aux abords immédiats des rues et des ruelles. Ces habitants aussi, par pur souci d'hygiène domestique recouvrent leurs fosses de tôles, de planches et de vieux pneus (photo n° 3). Ces protections rudimentaires n'empêchent pas les femelles gravides de venir pondre leurs œufs regroupés en nacelle dans ces eaux tranquilles, souvent fortement polluées. De même, les latrines, les zones d'affaissement des caniveaux ainsi qu'une multitude d'autres collections d'eau souillée constituent autant de lieux propices à l'évolution des larves

de ce moustique (photo n° 4), qui à une température de 30°C bouclent leur cycle préimaginal sur une durée de 5 à 7 jours. En ce qui concerne la femelle, elle pique toute la nuit et peut vivre plus d'un mois si les conditions d'humidité et de température lui sont favorables.

Il n'est pas rare de dénombrer dans la plupart des villes africaines des populations préimaginale qui se chiffrent en milliers de larves par gîte. Plus une zone urbaine est dense, plus elle totalise sur son aire un nombre important de collections d'eau polluée, donc de gîtes à *Culex* potentiels ou productifs. On peut considérer de ce fait *C. quinquefasciatus* comme un marqueur écologique capable de quantifier le degré d'urbanisation d'une localité (Darriet *et al.*, 1986 a). Ce n'est pas un mince indice quand on sait que dans moins de vingt ans, les villes d'Abidjan, de Lagos ou de Kinshasa dépasseront les dix millions d'habitants. Les démographes estiment que d'ici l'an 2000, la moitié de la population du continent africain sera urbaine (Canel *et al.*, 1990). Les hommes s'implantent sur des espaces de plus en plus restreints. *C. quinquefasciatus* serait-il en passe de devenir un insecte social spécialement adapté à la condition humaine ? Une question à la fois grave et inquiétante lorsqu'on sait que, outre sa fonction de nuisance, ce moustique se fait le vecteur d'une filariose qui, potentiellement peut affecter toujours plus de personnes dans le monde.

#### 1.4. Les moustiques et les maladies

Quand la science s'attaque au problème des moustiques, nous avons vu que les entomologistes se doivent d'abord d'étudier leur taxonomie et leur bioécologie. Lorsque les moustiques transmettent à l'homme des maladies dangereuses pour sa santé, l'entomologiste ne peut plus mener ses recherches seul. Il doit s'associer à des médecins, des parasitologistes, des virologistes, des épidémiologistes, des généticiens, des biochimistes, des physiologistes, des experts en insecticides de synthèse et d'origine biologique, des sociologues... les disciplines se font de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que le problème se creuse :

- Le moustique est de prime abord un insecte dont la bioécologie se révèle radicalement différente d'un genre à un autre et même d'une espèce à l'autre.

- Contrairement aux insectes ravageurs des cultures dont les populations doivent être importantes pour occasionner des dégâts atteignant un seuil économique, les insectes vecteurs de maladies peuvent être extrêmement virulents à de faibles densités.

- Enfin, chaque maladie possède un cycle bien particulier à la fois chez le vecteur et chez l'homme.

Nous voilà donc en présence du trio moustique/maladie/homme qui occasionne bien du souci à l'humanité. Un moustique sain se gorge du sang d'un homme malade. Le parasite ingéré par le moustique se transforme dans son estomac puis gagne sous une forme différente le thorax de l'insecte. Ces parasites, qu'ils soient hématozoaires, virus ou filaires sont ensuite réinoculés par le moustique à un homme sain. La boucle est bouclée et le cycle se perpétue naturellement.

Les maladies ont toujours eu un impact négatif sur les activités économiques d'une région. Un homme malade ne peut plus cultiver son champ ou tout simplement se rendre à son lieu de travail. Il s'installe une souffrance humaine qui se répercute sur le revenu familial qui lui-même, conditionne la ration alimentaire, l'hygiène et le confort de tous les jours. Cette situation, lorsqu'elle se prolonge entraîne un affaiblissement de la cellule familiale ou de la communauté villageoise toute entière. C'est pourquoi, sans remède, les communautés affectées s'affaiblissent en devenant toujours plus sensibles au fléau qui les agresse.

Pour lutter contre ces maladies, des hommes ont commencé par disséquer des moustiques et identifier les agents pathogènes. Il leur a ensuite fallu élucider le cycle de ces parasites chez le vecteur et chez l'homme. Recherches aussi longues que difficiles, auxquelles la science moderne n'a pas encore réussi, loin s'en faut, à mettre un terme.

#### 1.4.1. *Les paludismes*

Dans la Haute Antiquité déjà, les Égyptiens avaient remarqué la relation étroite qui existait entre les épidémies de fièvres et la saison pluvieuse propice à la prolifération des insectes. Ce n'est que bien plus tard, en novembre 1880 que le médecin français Alphonse Laveran découvrait, à Constantine en Algérie, le parasite responsable du paludisme. Cette découverte lui valut le prix Nobel de médecine en 1907.

En août 1897, le médecin anglais Ronald Ross découvrait à son tour dans des estomacs d'anophèles récoltés en Inde des corps ronds chargés de pigments. L'année suivante à Calcutta, il trouvait au cours de nouvelles dissections d'anophèles des bâtonnets incurvés logés dans les glandes salivaires. C'est ainsi que Ross révélait, avec l'aide du médecin et microbiologiste allemand Robert Koch, que le genre *Anopheles* était le vecteur du paludisme chez l'homme.

Les *Plasmodiums* responsables sont des protozoaires de type sporozoaires appartenant à l'ordre des *Haemosporididae*. Trois espèces spécifiquement humaines sévissent en Afrique, *P. falciparum* étant la forme pernicieuse puis *P. vivax* (les mélando-africains ne sont pas sensibles à cette espèce) et *P. ovale* étant des formes plus bénignes. Une quatrième espèce,

*P. malariae* est à la fois commune à l'homme et aux grands singes africains (Mazier, 1991).

Au cours de la prise d'un repas de sang chez un homme malade, les femelles d'anophèles ingèrent des globules rouges parasités qui renferment les stades sexués du parasite. Ces stades se présentent sous les formes de gamétocytes femelles (macrogamétocytes) et de gamétocytes mâles (microgamétocytes) qui dans l'estomac du moustique fusionnent en un œuf mobile (ookinète) qui migre vers les cellules épithéliales de l'estomac. Cet ookinète entame alors un rapide processus de division cellulaire qui aboutit à la formation d'un oocyste contenant les sporozoïtes. Ce stade ultime de la transformation du parasite chez le vecteur se présente sous la forme de virgules effilées de 10 à 15 microns de long qui, après avoir quitté par effraction l'oocyste et traversé la cavité cœlomique du moustique, gagnent les glandes salivaires et colonisent les acini et leurs canaux (Carnevale *et al.*, 1984).

Le développement du parasite chez le moustique est appelé cycle sporogonique. Il dure une dizaine de jours environ selon l'espèce plasmodiale et la température.

Présents dans les glandes salivaires du vecteur, les sporozoïtes sont inoculés à l'homme lors d'une nouvelle piqûre. Ils circulent dans le sang des hommes pendant un peu moins d'une heure pour gagner finalement les hépatocytes du foie où, de nouveau le parasite commence un cycle complexe chez l'hôte vertébré.

#### 1.4.2. Les arboviroses

Dans l'île de Gorée s'élève une stèle centenaire en hommage à toutes les personnes mortes de fièvre jaune. L'histoire des grandes épidémies de fièvre jaune commença en effet au Sénégal en 1778. Des troupes anglaises et françaises s'y livraient bataille pour acquérir cette île précieuse au large de Dakar. Mais le virus amaril se révéla bien plus ravageur que la guerre elle-même, décimant les deux armées et mettant du même coup radicalement fin aux combats. En 1881, le médecin cubain Juan Carlos Finlay étudiait puis démontrait le mode de transmission de la fièvre jaune par les *Aedes*. Une nouvelle épidémie ravagea de nouveau la capitale sénégalaise en 1927 et ce n'est qu'en 1940 qu'apparut le premier vaccin anti-amaril produit par l'Institut Pasteur de Dakar.

En Afrique, les moustiques qui véhiculent le plus d'arboviroses appartiennent au genre *Aedes* mais beaucoup d'autres virus sont également transmis par les *Anopheles* et les *Culex*.

Le moustique absorbe le sang d'un homme malade. Quelle que soit l'arbovirose concernée, le virus se duplique dans le corps du vecteur jus-

qu'aux glandes salivaires et c'est au moment de son nouveau repas de sang que l'insecte réinjecte le virus.

Prenons de nouveau le cas du virus amaril et de son vecteur. C'est dans les forêts du Comté de Bwanba en Ouganda, que le cycle naturel de la fièvre jaune en Afrique a pour la première fois été décrit. Dans un contexte selvatique, l'*Aedes* se contamine sur un singe et réinjecte généralement le virus à un autre singe. Cependant les singes africains n'accusent qu'une virémie très courte et le virus disparaît rapidement des communautés simiennes désormais immunes. L'inoculation du virus à un homme est un phénomène accidentel, qui peut néanmoins dans certaines conditions tourner à l'épidémie lorsque le malade habite un village ou une ville dans lequel *A. aegypti* se développe. Les épidémies les plus graves ont toujours eu lieu en milieu urbain car les vecteurs sont nombreux et le virus circule cette fois, directement du moustique à l'homme. Des études récentes ont montré que le moustique ne jouait pas seulement le rôle de vecteur mais aussi de réservoir de la maladie. Le virus ayant la particularité de se conserver dans les œufs, il poursuit alors son cycle tout au long de la phase aquatique du moustique pour finalement se retrouver chez l'imago (Germain *et al.*, 1981).

### 1.4.3. Les filarioses

Les vecteurs des filaires lymphatiques sont nombreux puisque, nous l'avons vu, ils regroupent, chez les moustiques, les genres *Anopheles*, *Culex*, *Aedes* et *Mansonia*.

Les filaires sont des vers parasites nématodes dont le corps non segmenté et rond est entièrement recouvert de cuticule. Les plus importantes filaires parasites de l'homme appartiennent à deux genres : *Wuchereria* et *Brugia*. Les espèces sont nombreuses mais deux seulement sont particulièrement pathogènes pour l'homme, *W. bancrofti* ou filariose de Bancroft à la répartition épidémiologique cosmotropicale et *B. malayi* qui ne sévit qu'en Asie. Comme *W. bancrofti* est la seule filaire qui sévit en Afrique et dans ses îles voisines, nous ne nous intéresserons qu'à l'histoire et à la biologie de celle-ci.

*W. bancrofti* sous sa forme microfilaire fut découverte à Paris en 1863 par le Français Demarquay dans le liquide d'une hydrocèle. La filaire adulte (macrofilaire) femelle fut à son tour découverte à Brisbane en Australie par Bancroft en 1876 puis décrite et baptisée *Filaria bancrofti* par Cobbold en 1877. La filaire mâle fut ensuite découverte par Browne en 1888 sur du matériel biologique originaire de l'Inde.

C'est en 1878 que Manson annonçait que les moustiques étaient les hôtes intermédiaires de la filaire de Bancroft. Ce fut d'ailleurs la première observation de l'évolution d'un parasite humain chez un arthropode. Le

rôle de la piqûre comme moyen de transmission ne fut par contre prouvé qu'en 1900, lorsque Low, Grassi, Noe et James trouvèrent des microfilaires dans la gouttière labiale de moustiques.

Le moustique absorbe les microfilaires contenues dans le sang des hommes. La plupart de ces microfilaires sont digérées mais quelques-unes traversent la paroi de l'estomac du vecteur pour gagner les muscles alaires thoraciques où elles passent alors par trois stades successifs, dont le dernier est le stade infectant pour l'homme. Les formes infectantes mobiles se localisent en dernier lieu dans la tête du moustique et notamment dans la gouttière labiale qui contient les stylets vulnérants (labium), pièces buccales nécessaires à la perforation de l'épiderme pour la prise des repas de sang. Les larves infectantes massées dans le labium pénètrent alors dans l'organisme humain par le point de piqûre. Contrairement aux moustiques vecteurs de paludismes et d'arboviroses chez lesquels le corps de l'insecte joue un rôle d'amplification de l'agent pathogène, on observe chez les vecteurs de filarioses une forte réduction parasitaire ; le nombre de filaires transmis étant toujours très largement inférieur au nombre de filaires ingéré (Bregues *et al.*, 1979).

Dans le corps des hommes, les microfilaires muent deux fois avant de donner des filaires adultes mâles et femelles. Après accouplement et fécondation, les vers femelles pondent des œufs qui donnent naissance à des microfilaires qui de nouveau pourront être ingérées par les moustiques et réinoculées après transformation chez le vecteur à un homme sain ou déjà parasité.

Les filaires adultes présentes dans le corps humain peuvent procréer pendant 10 à 15 ans. L'*éléphantiasis*, le stade ultime de la maladie ne peut être traité que par d'importantes et coûteuses interventions chirurgicales.



## 2

# Des moustiques, des hommes et des insecticides

La découverte de composés possédant une action insecticide remonte à l'antiquité mais ne concernait à l'origine que des substances naturelles d'origine minérale et végétale.

Pline l'Ancien (23-79 apr. J.-C.) recommandait l'utilisation de l'arsenic comme substance insecticide. Sur le pourtour du bassin méditerranéen, des observateurs de la haute Antiquité découvraient les propriétés insecticides des capitules de la fleur de pyrèthre (*chrysanthemum cinerariaefolium*) et son utilité dans l'hygiène domestique. De nos jours encore, au Kenya et en Tanzanie, de vastes champs de ces fleurs sont cultivés afin d'en extraire l'insecticide naturel. La roténone extraite des racines de deux légumineuses (des genres *Derris* et *Lonchocarpus*) d'Asie tropicale était connue depuis longtemps aux Indes. Un agronome français du nom de Jean de la Quintinie constatait en 1690 les qualités insecticides de la nicotine et s'en servit pour protéger ses cultures fruitières et horticoles des ravageurs. Nous pourrions poursuivre longuement cette liste des substances naturelles que l'homme a de tous temps utilisées pour se protéger des insectes. Mais ce n'est qu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, grâce aux progrès de la chimie organique, qu'il a été possible de synthétiser des insecticides. Plus efficaces et plus rémanents que les substances naturelles, ils vont également se révéler plus toxiques pour l'homme et son environnement.

### 2.1. L'histoire des quatre plus grandes familles d'insecticides

Les insecticides sont parmi les molécules de synthèse les plus utilisées par les hommes. Leur homologation dépend de l'efficacité et du maintien de ces molécules dans les milieux naturels mais aussi de leur avenir sur le marché mondial des pesticides.

### 2.1.1. Les organochlorés

Le Dichloro-Diphényl-Trichloréthane plus connu sous le sigle DDT fut pour la première fois synthétisé en 1873 par Othmar Zeidler. En 1939, soit 65 ans après la synthèse de cette molécule, le chimiste Suisse Paul Hermann Müller découvrait les puissantes propriétés insecticides de ce produit qui, dès 1942 entra en phase de production industrielle. D'après une évaluation récente, les experts estiment à 3 millions de tonnes la quantité totale de DDT synthétisé depuis sa découverte à 1985 (Ramade et Thybaud, 1985).

Les cinq atomes de chlore qui caractérisent sa structure moléculaire le font appartenir à la grande famille chimique des organochlorés.

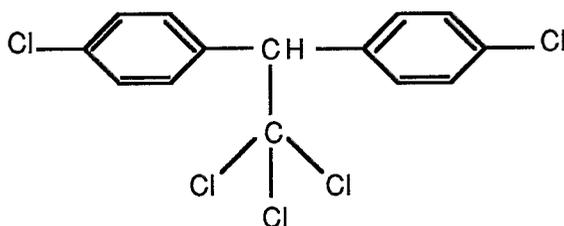


Figure 2

**DDT (C<sub>14</sub>H<sub>9</sub>Cl<sub>5</sub>)**

Le DDT fut en quelque sorte le précurseur de cette famille avec à sa suite l'apparition de l'aldrine, de la dieldrine, de l'heptachlore et du lindane (Isomère gamma de l'HCH = hexachlorocyclohexane).

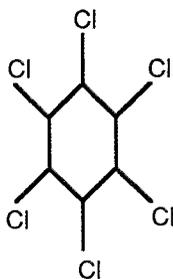


Figure 3

**HCH (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>Cl<sub>6</sub>)**

De nos jours, la disparition quasi générale de cette classe d'insecticides résulte paradoxalement de leur trop grande persistance dans les milieux. Aux tous premiers âges de la chimie des insecticides, la stabilité d'une molécule était considérée comme l'une de ses qualités premières et constituait le critère principal à sa sélection. Pour donner un ordre de

grandeur de ces rémanences, les toxicologues ont donné l'estimation du temps au terme duquel la persistance d'un toxique n'atteint plus que la moitié de sa valeur initiale. Ainsi la demi-vie (T/2) du DDT est de 10 à 20 ans, celle de l'aldrine de 8 à 10 ans, de l'heptachlore de 2 à 4 ans et celle du lindane de 2 ans (Leufevre, 1985). Avec de telles persistances, il n'est pas difficile de comprendre pourquoi la plupart de ces insecticides ont été retirés du marché mondial. Aujourd'hui et contrairement au passé, le caractère dégradé d'une substance doit être sa propriété essentielle. On évite ainsi une trop grande accumulation dans les diverses biocénoses qui entraîne à la longue la contamination des systèmes terrestres et aquatiques.

### 2.1.2. Les organophosphorés

En 1942, le chimiste allemand Gérard Schrader invente avec la synthèse du tétraéthylpyrophosphate ou TEPP une nouvelle famille d'insecticides : les organophosphorés.

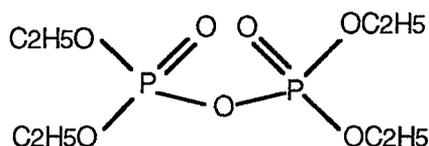


Figure 4

**TEPP (C<sub>8</sub>H<sub>20</sub>O<sub>7</sub>P<sub>2</sub>)**

Tout comme le DDT fut l'ancêtre des organochlorés, le TEPP fut très rapidement suivi et dès 1944 à 1950 par le parathion, le malathion, le diazinon, le diméthoate et le déméton. Le déméton, principalement utilisé dans la lutte contre les ravageurs des cultures s'est avéré le tout premier insecticide systémique, c'est-à-dire capable de pénétrer dans une plante pour y être véhiculé par sa sève. Autre caractère déterminant, du fait de leur dégradation totale quelques mois après leur application, les organophosphorés ne posaient plus le problème délicat de l'accumulation dans les milieux. Cette famille d'insecticides devint rapidement la clef de voûte des grandes sociétés de la chimie organique qui, très vite, se mirent à en fabriquer des quantités phénoménales. Au cours de ces dix dernières années, le quart des insecticides homologués en France appartient aux organophosphorés (Champ, 1985). Une ombre pourtant au tableau, cette famille particulièrement prolifique génère des molécules toxiques sur l'entomofaune pollinisatrice et prédatrice ainsi que sur les poissons, les oiseaux et les mammifères. Le parathion par exemple classé comme extrêmement dangereux possède une DL50 pour le rat par ingestion de 3,6 à 13 mg/kg.

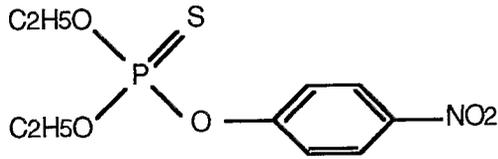


Figure 5

**Parathion éthyl ( $C_{10}H_{14}NO_5PS$ )**

Le malathion classé comme peu dangereux avec une DL50 pour le rat par ingestion de 2800 mg/kg se montre tout de même toxique pour la plupart des arthropodes auxiliaires, notamment les abeilles (Robbe, 1988). Il est incontestable que ces insecticides qui ont protégé les hommes des insectes pendant presque une cinquantaine d'années n'en demeurent pas moins des substances actives dont l'utilisation doit être contrôlée afin de ne pas mettre en péril les organismes non cible. De toute façon des insecticides qui se montrent toxiques sur les animaux domestiques et sauvages ne peuvent être complètement inoffensifs pour l'homme.

*2.1.3. Les carbamates*

Apparurent au cours des années 1960, des insecticides dérivés de l'acide carbamique de formule  $NH_2-COOH$ . Tous les sels de cet acide sont regroupés dans la famille chimique des carbamates. Ce groupe important comprend un grand nombre de molécules parmi lesquelles les plus connues et les plus utilisées en santé publique sont le propoxur, le carbaryl, le bendiocarb et tout dernièrement le carbosulfan.

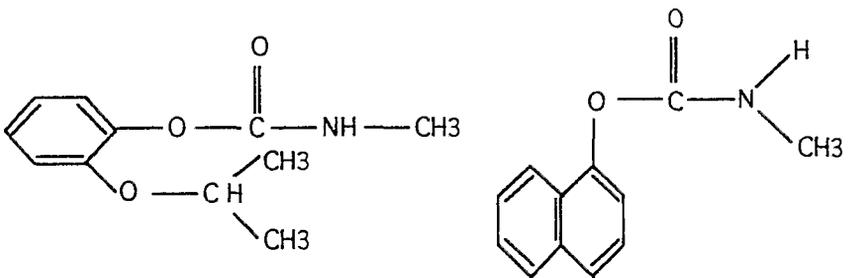


Figure 6

**Propoxur ( $C_{11}H_{15}NO_3$ )****Carbaryl ( $C_{12}H_{11}NO_2$ )**

Les recherches sur les propriétés insecticides de ces dérivés se sont fortement intensifiées ces dernières années car la plupart de ces produits ont en effet montré des activités très spécifiques ainsi qu'une biodégradabilité rapide avec la formation de métabolites inactifs.

### 2.1.4. Les pyrétrinoïdes de synthèse

Derniers nés de la chimie organique et pourtant conçus à partir des « ancestrales » pyréthrinés naturelles, les pyrétrinoïdes de synthèse prennent depuis une vingtaine d'années une place de plus en plus importante sur le marché des insecticides. Les pyréthrinés naturels et les premiers pyrétrinoïdes n'étaient pas stables à la lumière, ce qui limitait leur emploi à l'hygiène domestique. Or, avec l'avènement des molécules photostables, cette famille regroupe maintenant des insecticides très actifs qui ne présentent aucun effet cumulatif sur l'environnement et pratiquement aucune action toxique sur les vertébrés supérieurs. La plupart de ces molécules montrent toutefois une toxicité assez élevée pour les animaux à sang froid, notamment les poissons et les batraciens. Énumérons parmi les plus connus et les plus puissants de ces composés, la perméthrine, la cyperméthrine, l'alphaméthrine, la lambda-cyhalothrine et la deltaméthrine.

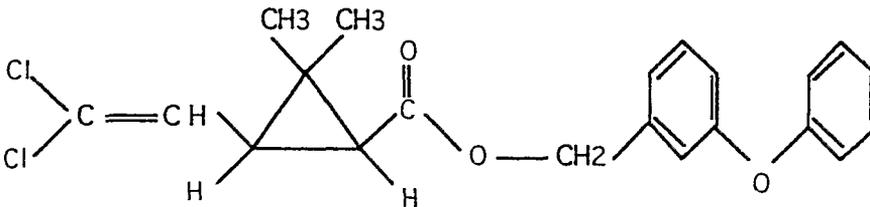


Figure 7

**Perméthrine (C<sub>21</sub>H<sub>20</sub>Cl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

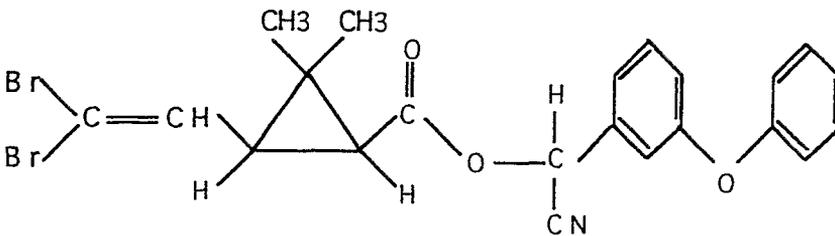


Figure 8

**Deltaméthrine (C<sub>22</sub>H<sub>19</sub>Br<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>)**

### 2.1.5. Quelques autres insecticides de synthèse

Il existe d'autres classes d'insecticides de synthèse, comme par exemple les carbinols relativement proches du DDT puisque les membres

de cette famille sont des dérivés chlorés ou bromés. La famille des benzoylphénylurées regroupe des larvicides aux propriétés nouvelles dont les effets seront exposés plus longuement dans les pages qui suivent.

## **2.2. Des modes d'action focalisés sur une cible : le système nerveux**

Vu leur impact économique dans le secteur de la chimie de synthèse, ce sont les organochlorés, les organophosphorés, les carbamates et les pyréthrinoides de synthèse qui ont été les plus étudiés par les biochimistes, les biologistes et les physiologistes. Les spécialistes de la question ne pouvaient pas vanter sciemment, ni vendre les mérites de tel ou tel insecticide sans connaître leur mode d'action sur les insectes, d'autant que la plupart de ces molécules peuvent aussi engendrer, de par leur toxicité aiguë et chronique, des troubles plus ou moins graves chez les utilisateurs. Plus de 95 % des insecticides fabriqués de nos jours sont neurotoxiques. Ces molécules agissent sur le déroulement normal des mécanismes permettant la propagation de l'influx nerveux dans les neurones et, pour 80 % d'entre eux, au sein même de la fente synaptique (Callec, 1985). A l'inverse des vertébrés où la masse cérébrale se compte par milliards de neurones, le système nerveux des insectes ne totalise qu'une centaine de milliers d'unités fonctionnelles. Leurs activités comportementales n'étant contrôlées que par un nombre si faible, des lésions cérébrales même minimales entraînent rapidement des désordres qui passent par une phase d'hyperactivité, des troubles locomoteurs et alimentaires puis des tremblements et des convulsions qui aboutissent à la mort de l'insecte.

Les multiples expérimentations, qu'il serait intéressant mais malheureusement impossible de toutes citer, permettent de classer les organophosphorés et les carbamates comme étant des inhibiteurs de l'acétylcholinestérase. Les organochlorés et les pyréthrinoides de synthèse interagissent avec les processus biologiques vitaux qui se déroulent à la fois dans la membrane cellulaire des neurones et dans la trame synaptique.

### *2.2.1. Le groupe des organophosphorés et des carbamates*

Pour saisir le mode d'action des inhibiteurs de l'enzyme acétylcholinestérase (Achase), il faut d'abord savoir que l'activité électrochimique du système nerveux de tous les êtres vivants est contrôlée par une multitude de neuromédiateurs dont l'un des plus importants est l'acétylcholine (Ach).

Dans les conditions normales, l'Ach se fixe sur l'Achase en établissant un complexe enzyme-substrat qui presque instantanément subit une réaction d'hydrolyse qui scinde l'Ach en choline et en acide acétique. La durée du cycle, c'est-à-dire le temps de vie du neuromédiateur ne dure que quelques millisecondes. Cette rapidité d'action induit environ 300 000 cycles catalytiques par minute à une température de 37°C (Champ, 1985).

Prenons maintenant un insecte soumis à l'action toxique d'un organophosphoré ou d'un carbamate, il se retrouve en possession d'un système nerveux complètement bloqué et pour cause. La molécule de l'insecticide prend la place de l'Ach et se fixe sur son site d'interaction avec l'Achase. Il en résulte un blocage des sites acétylcholinestérasiques car la composition moléculaire de l'insecticide ne permet pas l'hydrolyse qui normalement libérerait le site enzymatique et l'amorce d'une nouvelle réaction. La demi-vie du complexe inhibiteur-enzyme peut rester stable pendant 10 minutes à 30 jours. Il s'ensuit un accroissement de l'Ach qui peut saturer jusqu'à 260 % de la normale. L'insecte meurt d'hyperactivité et de convulsions (Champ, 1985).

### *2.2.2. Le groupe des organochlorés et des pyréthrinoides de synthèse*

Le mode d'action des organochlorés et des pyréthrinoides de synthèse s'avère beaucoup plus complexe car ils agissent sur le neurone lui-même, sa membrane cellulaire et la fente synaptique (Carles, 1985).

Au niveau des axones, l'effet se manifeste par une puissante perturbation des courants sodium/potassium ( $\text{Na}^+/\text{K}^+$ ) et calcium/magnésium ( $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ ) qui normalement circulent au travers des membranes cellulaires. Il en découle des séquences de polarisation-dépolarisation des membranes axonales, une inhibition des activités ATPasique et de ce fait, un blocage de tous les processus électrochimiques.

Au niveau synaptique, ces mêmes toxiques entraînent une inhibition du neuromédiateur GABA (Gamma Aminobutyric Acid) qui contrôle la totalité des activités neuro-musculaires.

Dans la dynamique cellulaire, l'ion  $\text{Ca}^{++}$  participe à la libération des neurosécrétions dans les terminaisons axonales. Les flux de ce cation gravement perturbé au travers des membranes cellulaires combinés aux effets relevés dans les autres zones du système nerveux, entraînent une libération massive et anarchique de neurohormones naturelles qui déséquilibrent l'organisme tout entier. L'insecte physiologiquement désorienté passe par des phases d'incoordination, de convulsion et de tétanisation. La mort survient plus ou moins rapidement suivant la dose et la puissance de l'insecticide.

### **2.3. Un exemple de lutte concertée à l'échelon mondial : l'éradication du paludisme**

Dose faible, forte puissance insecticide pour un coût de synthèse moindre. Telles sont les caractéristiques que les industries chimiques et les services sanitaires demandent à une molécule pour être rentable dans un contexte de lutte à grande échelle. En 1942 le DDT répondait avec succès à tous ces paramètres et ce fut d'ailleurs pourquoi il a été utilisé en de telles quantités dans la lutte contre les insectes et notamment les moustiques nuisants et vecteurs de maladies.

Entre les années 1926 à 1934, la chimie organique élaborait les premiers antipaludiques de synthèse comme la primaquine, la mépacrine et la chloroquine.

Un insecticide puissant appuyé d'antipaludiques efficaces, deux nouvelles armes qui furent à l'origine du programme mondial d'éradication du paludisme opté par l'Organisation Mondiale de la Santé lors de sa première session en 1948.

En 1955, les experts proposaient un programme à trois phases :

1 - Traitement de masse au DDT pendant trois années pour interrompre la transmission.

2 - Une phase de surveillance qui consistait à soigner les malades et traiter les derniers foyers résiduels des vecteurs.

3 - Une phase de maintenance afin de prévenir les réintroductions des vecteurs et des parasites.

Cette logistique stricte, respectée tant au niveau entomologique que parasitologique permit d'annoncer à la fin des années 1950 que le paludisme était éradiqué de l'Australie, de certaines îles d'Amérique centrale, du sud de l'Amérique du Sud, du Japon, de la Corée, de Taïwan, de l'est de l'URSS et des pays économiquement développés de l'Europe et de l'Amérique du Nord.

Forts de ces résultats encourageants, certains paludologues pensèrent qu'il était alors possible d'éradiquer cette maladie de la planète tout entière, exception faite toutefois des pays au sud du Sahara où les programmes d'éradication ne se firent, par mesure de prudence, que dans des zones pilotes rigoureusement délimitées situées au Liberia, en Haute-Volta, au Sud du Cameroun et à Madagascar.

Le programme mondial d'éradication du paludisme aurait protégé selon l'OMS, 1 milliard 329 millions de personnes. Dans la seule île de Ceylan, à la suite d'une campagne de traitement au DDT, le nombre de cas de paludisme passa de 2 800 000 en 1946 à 110 en 1961. L'arrêt des traitements intervenu en 1968 aurait fait remonter le nombre de malades à un million par an (Lefevre, 1985). Sur l'ensemble du territoire africain, les études réalisées dans les zones pilotes montrèrent qu'il était éven-

tuellement possible de contrôler les vecteurs et la maladie en zone de forêt mais qu'il était difficile de les contenir en zone de savane (Robert, 1989).

Il y eut donc des succès flamboyants, remplis de promesses, mais des échecs aussi, qui de nos jours encore enseignent les erreurs à ne plus commettre. Le programme d'éradication du paludisme avait malheureusement négligé deux aspects essentiels à sa bonne marche : d'abord et surtout la connaissance à travers le monde des particularités épidémiologiques des paludismes mais aussi un manque d'étude certain sur la faisabilité et l'applicabilité des actions de lutte antivectorielle, qui doit nécessairement tenir compte des conditions socio-économiques des populations mises à contribution.

## 2.4. Une réaction imprévue : les résistances

Parallèlement à la multiplication et à l'extension de l'usage des insecticides sont apparus chez les moustiques les premiers phénomènes de résistance.

En 1957, l'OMS donnait une signification concrète à la résistance.

« La résistance d'une souche (ou race) d'un insecte vis-à-vis d'un insecticide correspond au développement d'une capacité de tolérer des doses de toxiques qui seraient létales pour la majorité des individus d'une population normale de la même espèce » (OMS, 1957).

Définition à laquelle des études récentes ont apporté des réponses plus précises sur la nature et la localisation des gènes impliqués ainsi que sur les réactions biochimiques responsables des processus de détoxification des insecticides.

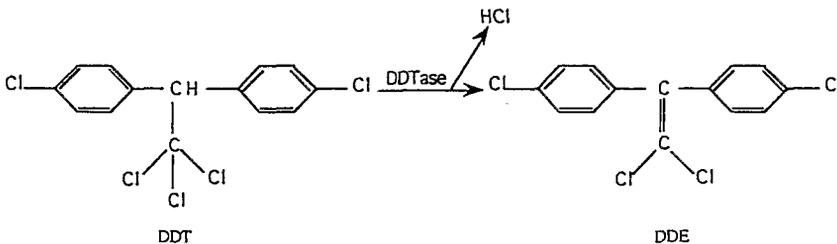


Figure 9

Action de l'enzyme DDT-déhydrochlorase

Le premier cas de résistance de type métabolique fut décrit en 1950 avec la découverte du DDE, composé résiduel inoffensif fabriqué à partir de la métabolisation du DDT (Perry et Hoskins, 1950). L'enzyme responsable de cette biotransformation est connue sous le nom de DDT-déhydrochlorinase ou DDT-ase.

Cette résistance est souvent accompagnée par un autre mécanisme génétique qui retarde ou réduit la pénétration de l'insecticide par la voie cuticulaire (Sawicki et Farnham, 1968). L'examen de la cuticule des insectes résistants présente une plus grande quantité de lipides et de protéines que les espèces sensibles, ce qui entraîne une plus forte sclérisation de la chitine et de ce fait, une bien moindre perméabilité aux molécules toxiques.

Les autres résistances de type métabolique sont essentiellement générées par deux enzymes : les hydrolases et les monooxygénases (Delorme, 1985).

• Les hydrolases ou estérases dégradent les groupements esters en alcools et en acides. Trois grands groupes insecticides (organophosphorés, carbamates et pyréthrinoides de synthèse) étant des esters, les hydrolases jouent un rôle prédominant dans leur métabolisation.

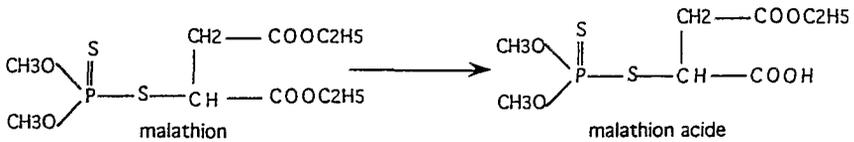


Figure 10

### Dégradation du malathion en malathion acide par une hydrolase de type carboxylestérase

• Les monooxygénases induisent des réactions d'oxydation qui conduisent à la détoxification des insecticides. Pratiquement toutes les grandes familles chimiques auxquelles appartiennent les insecticides sont partiellement ou totalement dégradées par ces enzymes.

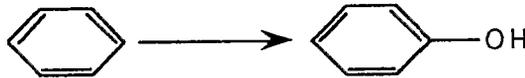


Figure 11

### Oxydation des cycles aromatiques

En réalité, les mécanismes de résistance chez les insectes mettent en jeu de très nombreuses et complexes réactions enzymatiques qui, au travers des différents stades d'un empoisonnement, détruisent l'insecticide par toute une série de déstructurations moléculaires. Les dérivés inactifs

sont habituellement des molécules plus facilement excrétables par le métabolisme de l'insecte.

Aussi, pendant que les biochimistes et les généticiens essayaient de comprendre les mécanismes de résistance, les entomologistes multipliaient sur le terrain séances de tests de sensibilité pour dresser la liste des espèces culicidiennes devenues résistantes et leur localisation géographique.

En 1963, le treizième rapport du comité OMS d'experts sur la résistance aux insecticides annonçait que la famille des *Anophelinae* regroupait à elle seule, 32 espèces résistantes au DDT et à la dieldrine. Le plus grave est que parmi ce groupe d'espèces résistantes se trouve le complexe *A. gambiae*, regroupant les principaux vecteurs du paludisme en Afrique (Coz et Hamon, 1963). Il faut préciser que dans les années 1950 à 1960, les campagnes de lutte contre les vecteurs du paludisme en Afrique ont employé du DDT mais cet organochloré fut rapidement remplacé par un cyclodiène moins répulsif : la dieldrine. En 1960, quand les traitements intradomiciliaires au DDT furent stoppés dans la zone pilote de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), il n'existait encore pas de résistance d'*A. gambiae* à cet insecticide mais les résistances à la dieldrine commençaient à être notées. Dans le courant des années 1965 à 1970, la culture du coton prit un essor considérable en Afrique de l'Ouest en s'étendant à de vastes régions soudano-guinéennes. Ces cultures ont nécessité l'emploi de grandes quantités de DDT et les traitements insecticides, plus ou moins intensifs selon la densité des ravageurs, ont entraîné l'apparition de populations d'*A. gambiae* résistantes, dont les larves et les adultes proliféraient au sein même et à la proximité de ces zones cotonnières. Ce fut ensuite dans les années 1980 que les organochlorés furent remplacés par les pyréthrinoides de synthèse plus efficaces mais aussi plus sélectifs à l'égard de la faune non cible. De nouveau les grandes quantités de pyréthrinoides déversées sur le coton ont favorisé l'apparition de souches d'*A. gambiae* résistantes à la perméthrine (Elissa *et al.*, 1993 ; Darriet *et al.*, 1997).

Chez les *Culicinae*, la résistance à l'HCH, au DDT et à la dieldrine est apparue chez 17 espèces (OMS, 1963). *C. quinquefasciatus* par exemple est devenu résistant à ces trois insecticides à la suite des traitements anti-anophéliens et à leur utilisation comme larvicides. A Douala au Cameroun, (Afrique centrale), on observe depuis le début des années 1960 une résistance croisée de ce moustique aux organochlorés et aux organophosphorés. En 1986, une collecte de larves de *C. quinquefasciatus* effectuée dans la ville de Bouaké en Côte-d'Ivoire (Afrique occidentale) a permis de mettre en évidence leur résistance à quatre grandes classes d'insecticides : les organochlorés, les organophosphorés, les carbamates et les pyréthrinoides de synthèse (Magnin *et al.*, 1988).

Les *Aedinae* n'ont pas échappé aux mutations. Des souches d'*A. aegypti* résistantes au DDT furent recensées dans 11 régions des Caraïbes, dans le sud du Viêt-nam et en Floride. En Amérique du Sud, on constatait chez ce moustique une résistance au DDT et à la dieldrine

ainsi qu'une grande tolérance à l'encontre des organophosphorés (OMS, 1963).

Il est certain que la quasi-généralisation des phénomènes de résistance affectant la faune culicidienne demande une gestion plus rigoureuse des nouveaux insecticides. Par le passé, dans les régions du monde où les moustiques avaient développé une résistance aux organochlorés, la substitution de ces derniers par des organophosphorés plus chers et moins rémanents a multiplié le coût des opérations de traitement par aspersion intradomiciliaires de 4 à 20 fois (Lefeuvre, 1985). Les résistances entraînent de surcroît des applications plus fréquentes, donc des coûts de traitements plus élevés mais aussi une accumulation de substances toxiques dans l'environnement. C'est à la suite des phénomènes d'accumulation engendrés par les organochlorés et plus particulièrement le DDT, qu'une science nommée écotoxicologie permet de mieux cerner l'action des insecticides avant leur homologation.

## 2.5. Une science née de l'erreur des hommes : l'écotoxicologie

Les organochlorés ont été largement utilisés dans tous les secteurs de l'agriculture et de la lutte contre les insectes nuisants et vecteurs de maladies. Or, ces produits manifestent, outre des propriétés insecticides intrinsèques, une activité biocide relativement étendue. L'extrême sensibilité des insectes entomophages et pollinisateurs à ces produits a provoqué d'importants déséquilibres biologiques. En plus de leur redoutable non-sélectivité, ces substances toxiques s'accumulent dans la nature. Leur accroissement dans la biomasse des régions subpolaires est d'ailleurs plus importante que dans celles des régions chaudes. Les faibles températures combinées à une photolyse moindre et une activité plus faible des microorganismes ralentissent en effet les processus de dégradation de ces composés (Ramade, 1985).

De plus, les chaînes trophiques toujours plus longues dans les biocénoses aquatiques entraînent des phénomènes de persistance et d'accumulation beaucoup plus importants qu'en milieu terrestre. En 1960, il fut réalisé des épandages de dichloro-diphényl-dichloréthane (DDD) à Clear Lake en Californie pour protéger la population riveraine de *Chaoborus astictipus*. Les concentrations de l'agent polluant mesurées sur différents maillons de la chaîne alimentaire furent les suivantes (Ramade, 1977).

Eau	plancton	poissons microphages	poissons prédateurs	oiseaux piscivores
0,014mg/l	5mg/kg	7 à 9 mg/kg	22 à 221 mg/kg	2 500 mg/kg
x 357	x 500 à 643	x 1571 à 15785		x 178571

De 0,014 mg/l contenu dans l'eau, la concentration en DDD atteignait les 2 500 mg/kg en bout de chaîne alimentaire, soit 178 571 fois la dose initiale. Ce bel exemple d'accumulation a eu pour effet principal de décimer des populations entières de grèbes alors très abondantes dans cette région. Les rares survivantes étaient, de toute façon condamnées elles aussi car l'accumulation de cet insecticide dans leur graisse les avaient rendues définitivement stériles. Il n'y a pas eu de dosage de DDD fait au niveau des oiseaux et des mammifères prédateurs des grèbes mais il est probable qu'à ce niveau également le phénomène d'accumulation ait atteint un degré supplémentaire.

Autre cas au Bostwana où le DDT utilisé à la dose de 9,5 g/ha dans le cadre d'un vaste programme de lutte contre les glossines a provoqué la mort de nombreux poissons lacustres contaminés par les eaux de ruissellement (Fox et Matthiesen, 1982).

Au début des années 1950, le programme mondial d'éradication du paludisme avait en Italie, en Espagne, en Grèce, dans les îles de Chypre, de Crète et de Sardaigne, orienté sa campagne de lutte antivectorielle sur le traitement au DDT de tous les gîtes larvaires des anophèles (Kouznetsov, 1989). Plus tard, quand il fut prouvé que cette méthode n'apportait aucune amélioration perceptible, les paludologues en arrivèrent à la conclusion qu'il fallait utiliser les insecticides rémanents en applications intradomiciliaires. Il aurait été quand même intéressant de savoir quels effets ces traitements de masse avaient causé sur les écosystèmes dulçaquicoles que représentent les mares, les étangs, les lacs, les marais et les tourbières de ces régions méditerranéennes. Ces biocénoses reconnues de tous les écologistes comme étant des milieux sensibles, font partie également de ces équilibres faciles à détruire. Des prélèvements de la nature de ceux qui ont été réalisés à Clear Lake, nous auraient instruits sur les teneurs résiduelles en DDT chez les animaux et donc de sa persistance dans les milieux.

Non-sélectivité, accumulation, déséquilibres biologiques : ironique aboutissement d'une action qui ne visait pourtant que le bien-être de l'humanité. De plus, il existe aussi des facteurs abiotiques qui surmultiplient les effets toxiques de certains organochlorés. Ainsi sous l'effet de la lumière, l'aldrine, la dieldrine et l'heptachlore subissent une photodégradation qui transforme ces molécules en photoaldrine, photodieldrine et photoheptachlore beaucoup plus toxiques pour la faune que les produits d'origine (Lefeuve, 1985).

## 2.6. Une cible imprévue : l'homme

Les insecticides ne se révèlent pas seulement toxiques sur l'environnement et la faune sauvage mais aussi sur celui qui les fabrique et les utilise : l'homme.

Comme nous l'avons déjà vu dans le mode d'action des quatre principaux ordres chimiques, les insecticides agissent sur le système nerveux central des êtres vivants. Fondamentalement, mis à part le nombre incroyablement élevé et la complexité des connexions synaptiques qui caractérise le cerveau des hommes, ses mécanismes neurophysiologiques ne diffèrent guère de ceux des autres animaux. Le complexe acétylcholine/acétylcholinestérase humain agit selon les mêmes principes que celui des insectes ; une perturbation de la pompe  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  au niveau des membranes axonales entraîne les mêmes déséquilibres biologiques. C'est seulement la dose qui fait le poison.

L'intoxication est dite aiguë lorsque la prise d'insecticide est unique et élevée. Les conséquences sont souvent graves et entraînent, à moins de prendre le contrepoison approprié, la mort du sujet. Comme antidote des organophosphorés et des carbamates, on emploie généralement un alcaloïde extrait de la belladone, l'atropine, qui possède la particularité d'inhiber les phénomènes de surexcitation et les spasmes. Un autre composé, l'oxime, est spécifiquement utilisé pour les intoxications liées à l'absorption d'organophosphorés. Ce dernier contrepoison détient en effet la particularité d'hydrolyser les liaisons organophosphate/acétylcholinestérase.

L'intoxication chronique est plus insidieuse car elle agit par une accumulation progressive de produits toxiques dans l'organisme. Ce type d'empoisonnement entraîne l'apparition de symptômes variés (Efthymiou, 1985) et ces intoxications sont dues à une utilisation régulière des insecticides par certains corps de métiers mais surtout, à l'ignorance des utilisateurs face aux véritables toxicités des formulations vendues.

## 2.7. Les dernières générations des insecticides de synthèse

Les insecticides neuroactifs révèlent pour la plupart des effets nuisibles qui ne sont plus acceptables à notre époque. Les organochlorés ont été réglementés depuis plus de vingt ans. Les organophosphorés sont à utiliser avec beaucoup de rigueur et dans des concepts de lutte bien particuliers qui ne mettent pas en péril la vie des hommes et de la faune sauvage. Quant aux pyréthrinoides de synthèse, ils ont montré à de faibles doses, une sélectivité intéressante qui étend chaque jour un peu plus leur spectre d'utilisation.

La recherche moderne s'oriente vers l'élaboration d'insecticides toujours plus sélectifs qui n'atteindraient que les fonctions vitales spécifiques des insectes. Depuis toujours les chimistes s'intéressent aux substances naturelles, surtout à celles qui expriment un pouvoir insecticide. La chimie de synthèse manipule ensuite ces molécules pour les rendre plus stables et plus efficaces que les produits d'origine. L'histoire a d'ailleurs montré au travers des pyréthrinoides de synthèse dérivés des pyréthrines naturelles le bien-fondé de cette démarche.

Autre exemple. En 1966, le Tchèque K. Slama et l'Américain C. Williams extrayaient du sapin baumier (*Abies balsamena*) une substance qui interférait avec les mécanismes du développement préimaginal des insectes. En fait les larves traitées conservaient leur caractère juvénile et la substance nommée par la suite juvabione fut reconnue comme l'ancêtre de tous les larvicides inhibiteurs de développement de type juvénile (Mauchamp, 1985). Parallèlement à cette découverte, des biochimistes élucidaient chez les insectes l'activité cyclique ainsi que la structure chimique des hormones juvéniles synthétisées par les *corpora allata* (Bowers *et al.*, 1965). Ces molécules extrêmement complexes ont défié pendant un temps la chimie organique et ce fut finalement en 1969 que le biochimiste américain W.S. Bowers a synthétisé pour la première fois des dérivés plus efficaces que les substances naturelles. Le mode d'action de ces médiateurs est complexe car ils agissent aussi bien sur la détermination des caractères larvaires au moment des mues que sur la physiologie et les processus biochimiques qui se déroulent entre le dernier stade pré-imaginal et la nymphose. Parmi les juvénoides de synthèse, le plus connu est le méthoprène. Le fenoxycarb par contre, bien qu'agissant comme une hormone juvénile, appartient à la famille des carbamates.

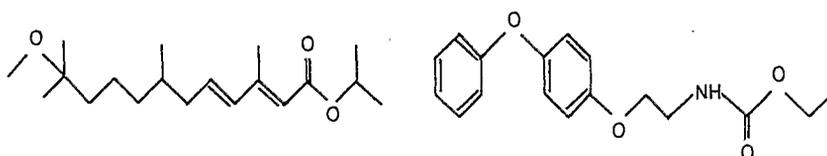


Figure 12

Méthoprène

Fenoxycarb

En 1972, le chimiste hollandais Philips Duphar découvrait une nouvelle famille d'inhibiteurs de développement : les benzoylphénylurées qui ont un effet ecdysoïde. Parmi ces composés, le diflubenzuron, le téflubenzuron et le triflumuron perturbent l'étape capitale de la polymérisation de la chitine. Cette seule action induit une mise en place déficiente de tous les tissus endocuticulaires et la larve meurt, le tégument ne pouvant résister à la tension musculaire et à la turgescence des organes au moment de la mue suivante.

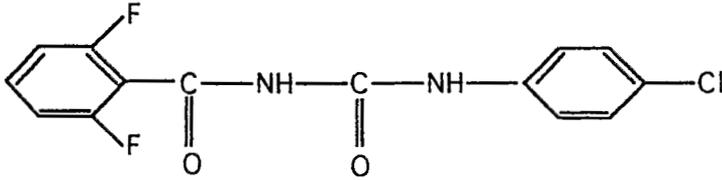


Figure 13

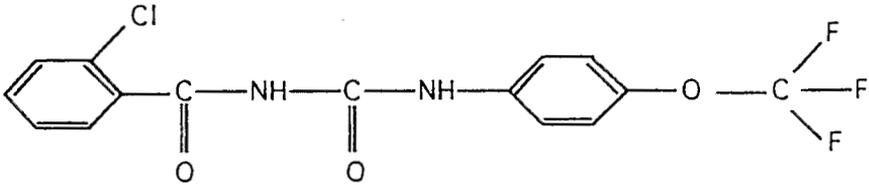
**Diflubenzuron (C<sub>14</sub>H<sub>9</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>F<sub>2</sub>Cl)**

Figure 14

**Triflumuron (C<sub>15</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>F<sub>3</sub>Cl)**

Les inhibiteurs de développement ne présentent pas de toxicité aiguë ou chronique pour les animaux vertébrés homéothermes et poïkilothermes ainsi que pour un bon nombre d'insectes pollinisateurs et entomophages. Actifs au moment des mues larvaires ou de la nymphose, ces larvicides agissent donc par contact et ingestion. Les cibles de prédilection demeurent les insectes phytophages (lépidoptère et coléoptère ravageurs des cultures) mais aussi les larves de diptères. Ces produits constituent donc *a priori* une gamme intéressante de produits utilisables dans des campagnes de lutte contre les moustiques.

## Une approche écologique : la lutte biologique

Un autre secteur de recherches en plein développement concerne l'évaluation des nouveaux agents de lutte biologique. Nous désignerons sous le terme d'agents de lutte biologique les ennemis naturels des insectes qui regroupent dans l'état actuel de nos connaissances, les organismes prédateurs ainsi que l'ensemble des parasites ou pathogènes des insectes.

L'intérêt porté à la lutte biologique depuis les années 1960, découle en fait des incidents écologiques et des résistances acquises par les insectes lors des précédents traitements de masse avec les insecticides chimiques.

Pour situer dans l'histoire les principales découvertes de ce moyen de lutte, il est avant tout nécessaire de dresser la liste des agents connus, pour n'en retenir ensuite, en toute connaissance de cause, que les plus prometteurs.

### 3.1. Les prédateurs

Le concept de prédateurs introduit les notions encore floues du respect et de la protection de l'environnement. Un prédateur est un animal qui se nourrit de proies vivantes. La faune prédatrice des larves de moustiques qui présente un réel intérêt en matière de lutte biologique se compose principalement de poissons et d'insectes aquatiques entomophages.

#### 3.1.1. Les poissons larvivores

Le poisson larvivoire *Gambusia affinis* originaire d'Amérique du Nord est utilisé depuis le début du siècle dans la plupart des systèmes écolo-

giques propices à son développement. Ces poissons étant très dépendants des milieux dans lesquels ils vivent, ils ne peuvent avoir de rôle de prédation intéressant que dans les plans d'eau permanents non souillés tels que les mares, les étangs, les lacs, les canaux de drainage et d'irrigation. Aux États-Unis, la lutte contre les moustiques par l'entremise des poissons larvivores fait désormais partie intégrante des programmes nationaux de lutte (Meisch, 1985). Bien que les gambusies préfèrent les eaux chaudes des régions tropicales, des souches plus robustes ont été acclimatées au climat subpolaire du Canada et de la Russie.

Il existe de par le monde 300 autres espèces recensées de poissons larvivores (Gerberich et Laird, 1968). Parmi les plus agressifs se distingue le guppy, *Poecilia reticulata* originaire de l'Amérique du Sud. *P. reticulata* est utilisé depuis plusieurs années dans les programmes de démoustication qui sont menés dans les îles de la Réunion et de Mayotte (Julvez *et al.*, 1987). Ce poisson a également fait l'objet d'une étude dans l'île de la Grande Comore où il a démontré ses exceptionnelles capacités prédatrices à l'égard des larves d'anophèles (Sabatinelli *et al.*, 1990).

### 3.1.2. Les Insectes prédateurs

Le groupe des insectes aquatiques prédateurs de larves de moustique se compose entre autres de toxorynchites (diptère), de dytiques (coléoptère), de larves de libellules (odonate), de nêpes, de notonectes et de ranatres (hétéroptère) (photo n° 5). Les populations d'insectes entomophages sont naturellement régulées par les pressions biotiques et abiotiques qui caractérisent chaque biocénose. Cela a pour principal effet d'établir une balance écologique entre les différents niveaux de la chaîne alimentaire (Collins et Washino, 1985). Devant cette constatation, il n'est pas difficile de comprendre qu'en épargnant l'environnement, l'homme participe à la sauvegarde de ces prédateurs et qu'il en découle une élimination naturelle des populations préimaginales des moustiques.

C'est de toute évidence dans les écosystèmes établis de longue date, comme les forêts tropicales et équatoriales que l'entomofaune est la plus riche et la plus stable. Il existe dans ces milieux une telle profusion de proies et de prédateurs qu'une myriade d'insectes, aussi nuisibles soient-ils, se trouvent bien souvent jugulés avant d'occasionner le moindre tort. Cependant, l'installation des hommes dans les forêts, liée à des programmes intensifs de déboisement et d'agriculture, participent à l'élimination de nombreuses niches écologiques dont les prédateurs sont encore une fois les plus atteints (Kumar, 1991).

Au Kenya, il a été rapporté un accroissement des densités larvaires d'*A. arabiensis* après le traitement insecticide d'une rizière. Avant le traitement, les échantillonnages révélaient 5,1 larves par coup de louche.

Deux semaines après le traitement les prélèvements indiquaient 7,9 larves par coup de louche. De plus, la mortalité naturelle qui limite efficacement les populations anophéliennes entre l'œuf et l'adulte avait été estimée à 93,4 % avant le traitement. Après le traitement, cette mortalité n'était plus que de 83,5 %. Cet accroissement du nombre de larves d'anophèles couplé à la diminution des taux de mortalité naturelle se révélèrent corrélatives à une disparition importante de prédateurs (Service, 1977). Cela nous instruit sur l'extrême fragilité des insectes entomophages face aux insecticides mais surtout des effets que peut entraîner un simple traitement à usage agricole sur la prolifération des anophèles. Il existe au sein des populations naturelles d'insectes aquatiques, quantité d'entomophages aux capacités prédatrices intéressantes. Il a été décrit qu'une larve de libellule dévorait 29 larves de *Culex* en 5 jours (Twinn, 1931). Dans l'ordre des coléoptères, un seul dytique (*Dytiscus*) peut ingérer 434 larves de moustiques en deux jours (Chidester, 1917) et deux gyrins (*Dineutes*) peuvent tuer et absorber 35 larves d'anophèles en 36 heures (Derivaux, 1916). Une étude réalisée en laboratoire a montré qu'au cours des 13,5 jours que durait le développement préimaginal de *Toxorynchites brevialpis*, une larve consommait en moyenne 122,5 larves d'*A. aegypti* (Robert *et al.*, 1983). Une autre étude en laboratoire a révélé que pendant le mois que duraient les cinq stades du cycle préimaginal de l'hétéroptère aquatique *Ranatra parvipes vicina*, un mâle de cette espèce consommait plus de 1 310 larves d'*A. aegypti* et une femelle pas loin de 1 575 larves. Le suivi des dix premiers jours de vie imaginale de cet insecte a ensuite montré que les mâles ingéraient une moyenne de 90 larves par jour et les femelles 95 (Darriet et Hougard, 1993). Les insectes prédateurs présentent aussi la particularité, lorsque les gîtes s'assèchent, de quitter leur milieu d'origine et de coloniser les plans d'eau voisins et même éloignés (Poisson, 1951). Cette caractéristique d'autonomisation commune à la plupart des insectes entomophages les rendent à long terme moins dépendants du biotope que les carnassiers à caractère strictement aquatique.

### 3.1.3. Les autres prédateurs

Les batraciens nous fournissent un autre exemple tout aussi révélateur. En Inde, le gouvernement a décidé le 5 mars 1987 d'arrêter l'exportation de ses grenouilles dont les pertes se chiffraient approximativement à 50 millions par an. Les habitants avaient en effet constaté dans les zones irriguées une flambée des moustiques et de divers autres insectes nuisibles, due notamment à la raréfaction des grenouilles (Frémy et Frémy, 1988). Une sage résolution qui pourrait servir d'exemple à de nombreux autres pays du monde.

Peu connues, les hydres, ces petits cnidaires solitaires et nus des eaux douces, peuplent la plupart des fossés et plans d'eaux calmes et stagnants. Les hydres sont connues comme prédateurs de larves de moustiques depuis qu'un naturaliste a assisté en 1924 en Italie, à l'ingestion d'une larve de *Culiseta* par une *Hydra spp.* (Hargreaves, 1924). Les hydres fixées à leur support par un pied, attrapent les proies avec leurs tentacules puis les paralysent en leur injectant un poison neurotoxique. Seules les parties molles sont ingérées, la cuticule étant rejetée dans le milieu (Legner, 1985).

En raison de l'incroyable diversité des milieux aquatiques, il existe une foule d'autres prédateurs que nous ne pourrions, même si nous le souhaitions, tous énumérer. Nous citerons tout de même le protozoaire cilié du genre *Vorticella* qui s'est révélé au sud des États-Unis prédateur de larves d'*Aedes* et de *Culex* (Legner, 1985). L'anémone de mer *Aiptasia pallida* quant à elle exerce dans les mangroves et les marécages salés de Floride une activité prédatrice à l'encontre des moustiques halophiles (Levy et Miller, 1979). Au Soudan, les petites tortues d'eau *Pelomedusa galeata* se réfugient dans les canaris qui contiennent l'eau de boisson des villageois. Pour subvenir à leurs besoins alimentaires, ces tortues dévorent les larves d'*A. aegypti* qui, très communément, colonisent ce type de gîte (Christophers, 1960).

Les prédateurs ne se distinguent pas seulement au sein du règne animal. Dans les marais et les tourbières croissent des plantes dont les feuilles sont capables d'attirer, de capturer et de digérer des insectes. Dans les Everglades en Floride poussent les dionées, dans l'ouest américain les sarracénies et les lys cobra, à Madagascar et en Asie tropicale les népenthés, en Europe les droséras (photo n° 6) et les pingüiculas. Parmi les formes prédatrices aquatiques se distingue la plante carnivore du genre *Utricularia*. Ce végétal vivace se caractérise par des utricules qui ressemblent à des pièges et dans lesquels les jeunes larves de moustiques peuvent entrer mais non en sortir (Christophers, 1960). Toutes ces plantes d'un genre prédateur un peu particulier abondent dans les endroits où les moustiques pullulent. Nul doute qu'elles jouent un rôle, aussi faible soit-il, dans la limitation des populations culicidiennes.

A travers l'énumération de ces quelques entomophages, l'on s'aperçoit que ce n'est pas l'activité de tel ou tel prédateur qui apporterait la solution au contrôle des moustiques. C'est assurément l'étroite imbrication et la complémentarité des espèces animales et végétales entre elles qui assurent l'équilibre de tout un système. Même si l'action des prédateurs n'est que minime dans la régulation naturelle des moustiques, elle est véritablement très importante et que l'homme rompe un seul maillon de cette chaîne et les nuisances seront toujours de celles à profiter du déséquilibre.

### 3.2. Les parasites ou agents entomopathogènes

Il est désigné sous ces termes l'ensemble des organismes unicellulaires et pluricellulaires qui puisent leurs substances nutritives au détriment d'un hôte. Tout comme chez les hommes, les parasites provoquent des maladies graves chez les insectes. Il existe de nombreux entomopathogènes qui évoluent naturellement et librement dans les diverses biocénoses. Certains n'induisent que des épidémies bénignes et vite circonscrites tandis que d'autres font montre d'activités parasitaires foudroyantes.

Depuis une quinzaine d'années, l'homme recherche dans la nature les nématodes, les microsporidies, les champignons, les virus et les bactéries pathogènes des insectes pour les isoler, les identifier, les sélectionner puis les produire en masse. C'est d'ailleurs grâce à la persévérance des nombreux chercheurs disséminés un peu partout dans le monde que la gamme des insecticides d'origine biologique s'est considérablement enrichi ces dernières années. Si la plupart de ces agents biologiques demeurent encore au stade des évaluations expérimentales, certains sont aujourd'hui commercialisés et utilisés dans de vastes programmes de lutte contre les insectes nuisants et vecteurs de maladies.

#### 3.2.1. Les nématodes parasites

Les nématodes parasites des insectes appartiennent à la famille des *Mermithidae*, famille au sein de laquelle il a été recensé vingt espèces aquatiques impliquées dans des fonctions de parasitisme. Quinze espèces seulement ont été décrites à partir des formes adultes et seul *Romanomermis culicivorax* (Syn. *Reesimermis nielsenii*) s'est montré un parasite efficace des larves de moustiques.

*R. culicivorax* a été isolé à partir de larves de moustiques récoltées aux alentours du lac Charles en Louisiane et de la ville de Gainesville en Floride. Depuis dix ans que ce mermis est étudié en laboratoire, il s'est révélé un agent pathogène particulièrement virulent pour seize espèces de moustiques réparties dans six genres. C'est le seul nématode parasite des insectes qui, au vu de ses grandes facilités de production, pourrait devenir un agent de lutte biologique potentiellement commercialisable (Petersen, 1985). Il existe d'ailleurs une société américaine, la « Fairfaix Biological Laboratories Inc » qui, pour des essais à échelles réduites et sous le couvert « d'évaluations expérimentales », en fournit de petites quantités sur commande (Alexeev, 1983).

Ce sont les stades « préparasites » du nématode qui pénètrent dans les larves pour s'y nourrir et croître. Ensuite les « postparasites » s'extirpent de leur hôte en provoquant des lésions graves qui entraînent sa mort. Le

temps de maturation sexuelle des « postparasites » dure une semaine. Après l'accouplement les femelles déposent leurs œufs dans le sol des gîtes où ils mûrissent et donnent à l'éclosion une nouvelle génération de « préparasites » (Platzer, 1981).

### 3.2.2. *Les microsporidies*

La famille des *Nosematidae* possède un sujet particulièrement actif (*Nosema algerae*) dans ses fonctions de parasitisme chez les larves et les adultes de moustiques. Quatre souches de *Nosema algerae* ont été isolées ; deux en Afrique sur *A. gambiae* ; une autre en Amérique Centrale sur *A. albimanus* et enfin une quatrième en Asie sur *A. stephensi*. Les anophèles semblent donc l'hôte de prédilection des *Nosema* (Hougaard, 1981).

Dans la famille des *Pleistophoridae*, *Vavraia culicis* présente un pouvoir pathogène à peu près comparable aux *Nosema* avec cependant une nette préférence pour les moustiques du genre *Culex* (Hazard, 1985).

Ces protozoaires se présentent pendant leur phase de dissémination sous la forme de spores binuclées infestantes qui circulent dans le milieu ambiant. Avalées par les larves de moustiques, ces spores se fixent sur la paroi intestinale puis germent chacune en un sporoplasme qui part infecter une cellule saine. Ce sporoplasme donne à son tour un trophozoïte qui après plusieurs autres phases parasitaires aboutit à la formation de spores qui réinfestent le milieu. L'hôte se trouve vite terrassé par l'intense activité parasitaire qui se déroule dans son corps.

Objectivement les microsporidies ne présentent pas un réel intérêt dans des actions de lutte larvicide. En effet, les quantités à employer (10<sup>6</sup> spores/ml pour obtenir 90 % de mortalité larvaire) seraient si importantes qu'elles dépasseraient les concentrations raisonnablement applicables sur le terrain. Par contre l'infection des imagos s'avère beaucoup plus avantageuse car ces parasites réduisent les capacités de reproduction et la longévité des adultes ainsi que le nombre et la fertilité des œufs (Hougaard, 1981).

### 3.2.3. *Les champignons*

Les champignons exercent dans la plupart des milieux aquatiques un rôle de régulation naturelle des larves de moustiques. Parmi ceux qui manifestent une activité parasitaire intéressante, citons *Lagenidium giganteum*, *Culicinomyces clavosporus*, *Tolypocladium cylindrosporum* et plusieurs espèces de *Coelomomyces*. Mais à l'heure actuelle seul *Lagenidium giganteum* (Oomycètes-Lagenidiales) est considéré comme un candidat potentiellement utilisable dans des campagnes de lutte contre les moustiques (Brey et Papierock, 1987).

C'est en mai 1969 que ce champignon a été isolé à partir d'une larve de *Culex* fortement infectée récoltée en Caroline du Nord aux États-Unis. Les découvreurs crurent un moment qu'ils étaient en présence d'une nouvelle espèce et la baptisèrent *Lagenidium culicidum* (Umphlett et Huang, 1970). Ce n'est qu'en 1972 que des études taxonomiques plus précises révélèrent que cette supposée nouvelle espèce était en fait le *L. giganteum* découvert par J.N. Couch une trentaine d'années auparavant (Umphlett, 1973).

Les hyphes de ce parasite végétal se développent sur une grande variété de plantes aquatiques et d'animaux invertébrés. La multiplication sexuée qui ne se déroule que dans des cas bien précis d'appauvrissement des milieux – absence de larves de moustiques par exemple – aboutit à la formation d'oospores qui peuvent se conserver très longtemps dans les substrats et constituent en quelque sorte le stade de survivance du champignon. Que ce soit à partir des oospores de la phase sexuée ou bien des sporanges de la phase asexuée, la forme infestante se trouve être des zoospores biflagellées particulièrement motiles qui pénètrent par la bouche et la cuticule des larves. La croissance des hyphes se fait d'abord dans la tête et le pharynx à la suite de quoi, par le biais du système digestif, elles gagnent les parties anales (Cray, 1985). La larve meurt rapidement, l'organisme tout entier envahi par la trame mycélienne.

#### 3.2.4. *Les virus*

Le concept de contrôle des moustiques par l'utilisation d'agents viraux est très récent. Il existe 5 grands groupes de virus entomopathogènes : iridovirus, baculovirus, poxvirus, parvovirus et reovirus (Sokolova, 1983). Les symptômes sont variables suivant le groupe viral mais dans leur ensemble ils affectent pratiquement tous les tissus et les organes de la larve, que ce soit au niveau des corps gras et de la cuticule qu'au niveau de l'estomac, du caecum, du cardia et du système nerveux (Federici, 1985).

Les virus sont des parasites obligatoires intracellulaires constitués de protéines et d'un seul type d'acide nucléique ARN ou ADN. Les virus envahissent les cellules de l'hôte où ils reprennent à leur compte son activité métabolique tout en produisant une multitude de virions. Lorsque la source d'infection est faible, l'activité virale n'occasionne que des troubles localisés qui ne se traduisent que par la dégénérescence des tissus attaqués. Si par contre l'infection est massive, il s'ensuit de tels déséquilibres au niveau des fonctions vitales de l'hôte qu'il ne peut plus lui-même assurer son fonctionnement et meurt.

Malgré la découverte du premier virus entomopathogène il y a de cela 15 ans, peu d'essais ont été réalisés sur le terrain. Les deux principales raisons en sont d'abord, le peu d'infectivité de ces virus vis-à-vis de l'hôte

mais aussi l'absence totale de méthode qui permette une production de masse de ces agents pathogènes (Federici, 1985). Devant ces faits, il reste peu probable que la lutte biologique utilise dans un avenir proche les agents viraux comme un moyen de lutte contre les populations culiciennes.

### 3.2.5. Les bactéries

Les bactéries sont de loin les agents biologiques les plus utilisés en agriculture et en santé publique. Au cours de ces vingt dernières années, jamais groupe d'entomopathogènes n'a engendré autant de prospections, d'études et d'expérimentations diverses. La spectaculaire percée des bactéries dans le domaine des bio-insecticides réside principalement dans le fait que bon nombre d'entre-elles ont un pouvoir pathogène supérieur à la plupart des autres groupes biologiques mais que surtout, elle peuvent être produites industriellement et concourir de façon efficace à de vastes programmes de lutte.

#### 3.2.5.1. Les *Bacillus* sporulés

Le genre *Bacillus* appartient à la famille des *Bacillaceae* qui renferme la totalité des bactéries sporulées aérobies strictes ou anaérobies facultatives. Les bacilles se développent principalement dans les sols et l'air, de même que chez les hommes et les animaux où, mis à part *B. anthracis*, l'agent responsable du charbon, ils demeurent totalement inoffensifs pour les vertébrés supérieurs (activités commensales et saprophytes). Ces bactéries possèdent la particularité de se conserver sous la forme de spores quand le milieu qui les abritent n'est plus favorable à leur multiplication végétative.

En fait, le rôle pathogène des bacilles n'intervient pratiquement que sur les insectes. *B. larvae* occasionne une maladie chez les abeilles appelée la loque américaine, *B. lentimorbus* provoque la maladie laiteuse des hannetons (Pilet *et al.*, 1983) de même que *B. laterosporus* s'est révélé pathogène sur les larves de moustiques et de simulies (Weiser, 1991). Des souches de *B. alvei* et de *B. brevis* isolées à partir de larves de moustiques mortes récoltées dans une rizière à Pondicherry en Inde se sont révélées toxiques pour les larves d'*Anopheles*, de *Culex* et d'*Aedes* (Balaraman *et al.*, 1979). De même, un isolat de *B. circulans* pathogène sur les larves de moustiques a été extrait d'une larve de *C. quinquefasciatus* récoltée dans un caniveau de la ville de Ngaoundéré au Cameroun (Hougard *et al.*, 1992 a).

Mais il faut rester réaliste, pathogène ne signifie pas toujours insecticide. La gravité d'une maladie résulte du degré de virulence de l'agent

responsable et les bacilles cités ci-dessus ne sont pas suffisamment agressifs pour entraîner des niveaux de mortalité assez importants au sein des populations d'insectes.

Il existe toutefois des bacilles qui possèdent un pouvoir entomopathogène si élevé que dans ces cas, pathogénéicité est synonyme de pouvoir insecticide. Par exemple, *B. popilliae* est utilisé en agriculture contre les larves terricoles du scarabée japonais (*Popillia japonica*) qui dévorent le système racinaire de nombreuses plantes cultivées. Deux autres espèces, *B. thuringiensis* et *B. sphaericus* sont utilisées opérationnellement depuis plusieurs années dans la lutte contre les simulies et les moustiques (Hougard et Back, 1992 b).

### *Bacillus thuringiensis*

C'est en 1950 que la première formulation de *B. thuringiensis* Berliner, 1915 fut commercialisée en Amérique du Nord pour le contrôle des lépidoptères ravageurs des cultures et des forêts (Lacey, 1985). Devant l'inocuité totale de cette bactérie vis-à-vis des insectes entomophages et pollinisateurs, *B. thuringiensis* gagna l'ensemble du marché mondial et devint rapidement la clé de voute des insecticides biologiques.

En 1976, un nouveau sérotype de ce bacille est découvert par Golberg et Margalit dans des larves mortes de *Culex pipiens*, de l'eau et des sédiments de gîtes à moustiques situés dans le désert du Négev en Israël. Ce sérotype désigné *B. thuringiensis* var. *israelensis* sérotype H14 (photo n° 7) (de Barjac, 1978) se révéla très actif sur de nombreuses espèces de moustiques (de Barjac et Coz, 1979). Ce même sérotype testé sur les larves de *Simulium damnosum*, dont les adultes femelles sont vectrices de l'onchocercose ou cécité des rivières en Afrique, donna d'excellents résultats qui très vite attirèrent l'attention des entomologistes travaillant sur le programme de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest.

L'agent toxique du *B.t.i.* est un système de deux inclusions cristallines de nature protéique (delta-endotoxine) étroitement associé au corps parasporal élaboré au moment de la sporulation du bacille. Ces delta-endotoxines, après avoir été ingérées par les larves de moustiques ou de simulies se scindent en milieu alcalin et sous l'action d'enzymes protéolytiques appropriées, en sous-unités protéiques qui attaquent et détruisent l'intestin moyen. Il s'ensuit une grave dégénérescence puis une cytolysse des cellules épithéliales qui entraînent la mort de la larve (Charles et de Barjac, 1981).

### *Bacillus sphaericus*

*B. sphaericus* Neide, 1905 se compose contrairement à *B. thuringiensis* d'une majorité de souches non pathogènes pour les larves de moustiques. La première souche entomopathogène isolée, *B. sphaericus* var. *fusiformis* a été découverte en 1965 à partir de larves moribondes de *Culi-*

*seta incidens* récoltées en Californie (Kellen *et al.*, 1965). Il fallut par la suite attendre les années 1970 à 1980 pour que d'autres souches particulièrement virulentes soient à leur tour isolées ; une souche 1593 en Indonésie sur des larves moribondes de moustiques (Singer, 1973), une souche 1691 au Salvador (Singer, 1977), une souche 2297 à Sri Lanka dans un gîte larvaire à moustiques (Wickremesinghe et Mendis, 1980) et une au Nigéria (souche 2365) sur des adultes de simulies (Weiser, 1984).

La virulence de ce bacille à l'égard des larves de moustiques et plus particulièrement sur celles de *C. quinquefasciatus* est induite par la présence d'une inclusion parasporale de nature protéique mais aussi, et contrairement à *B. thuringiensis*, par un effet toxique qui s'exprime dans la spore elle-même et sa paroi (photo n° 8). Après ingestion des spores par la larve, la lyse de l'inclusion entraîne la libération de différentes toxines dont l'une d'elles, une alpha-endotoxine s'avère identique pour tous les sérotypes. Cette alpha-endotoxine présente une structure moléculaire très proche des delta-endotoxines élaborées par *B. thuringiensis* et, pareillement à ces dernières, attaquent les cellules épithéliales de l'intestin moyen et provoquent la mort de la larve.

### 3.2.5.2. Les *Clostridium* sporulés

Il s'agit de bactéries anaérobies strictes qui, comme sa définition l'indique ne peuvent se développer que dans des milieux totalement dépourvus en oxygène. Certaines espèces sont saprophytes et vivent dans les sols où elles participent activement à la dégradation des matières organiques animale et végétale. Les autres espèces commensales se rencontrent principalement dans le tube digestif des hommes et des animaux.

Le genre *Clostridium* a de tous temps inspiré beaucoup de crainte car il regroupe des sujets particulièrement pathogènes pour l'homme, tels que *C. botulinum* responsable du botulisme, *C. tétani* auteur du tétanos et autres espèces coupables des dangereuses et bien souvent fatales gangrènes gazeuses. Comme pour les bacilles, les clostridies sporulent lorsque le milieu qui les abrite ne peut plus subvenir aux besoins énergétiques des formes végétatives.

#### *Clostridium bifermentans*

Ce *Clostridium* est connu depuis longtemps des bactériologistes comme étant peu pathogène pour les animaux car n'élaborant que peu ou pas de toxine (Pilet *et al.*, 1983). En 1989 a été isolé d'un prélèvement de boue provenant de Malaisie un *Clostridium bifermentans* var. *malaysia*, dont la toxine se révèle très active sur les larves de moustiques et de simulies (de Barjac *et al.*, 1990). Cette bactérie, encore au stade des évaluations expérimentales en laboratoire et sur le terrain, est la première du genre *Clostridium* à manifester une activité entomopathogène. Cette

découverte souligne tout l'intérêt des recherches menées dans le domaine des toxines en particulier et des bio-insecticides au sens large.

### 3.3. La lutte génétique

Mis à part l'utilisation des prédateurs et des pathogènes d'insecte, la lutte biologique emprunte parfois des moyens qui affectent les insectes nuisibles au sein même de leur patrimoine génétique. Cette méthode de lutte a pour but d'introduire au milieu de populations naturelles, un nombre important d'individus génétiquement diminués.

Il existe de nombreux procédés comme par exemple celui élaboré par l'américain E.F. Knippling en 1937 qui consiste à utiliser des mâles stérilisés au moyen d'irradiations ou de substances chimiques. Après s'être accouplée à un mâle stérile, une femelle sauvage pond des œufs non viables qui n'engendrent aucune descendance. Cette technique qui a donné de bons résultats aux États-Unis et dans l'île de Curaçao sur la mouche parasite du bétail *Cochlyomyia hominivorax* n'eut par contre aucun succès avec les moustiques, car ces derniers sont spatialement trop disséminés mais surtout, les mâles rendus stériles ne sont pas sexuellement compétitifs avec les mâles sauvages (Mouchet et Carnevale, 1991).

Certains cytotypes appartenant à un complexe d'espèces engendrent lorsqu'on les croisent entre eux des individus mâles stériles et des femelles fécondes. Le lâcher de ces mâles hybrides au sein d'une population vernaculaire engendre la ponte d'œufs stériles. Le complexe *A. gambiae* regroupe, comme nous l'avons déjà vu, six espèces jumelles. Le croisement pratiqué entre deux de ces espèces jumelles, des mâles d'*A. arabiensis* et des femelles d'*A. melas* produit une descendance F1 constituée à 93 % de mâles stériles (Davidson, 1969). La conclusion de cette manipulation laisse entrevoir de nombreuses possibilités mais n'en demeure pas moins des résultats expérimentaux car *A. arabiensis* et *A. melas* sont deux espèces qui ne cohabitent pratiquement jamais dans les milieux naturels.

Parmi les autres méthodes, il a été utilisé l'incompatibilité cytoplasmique qui consiste à sélectionner dans des élevages, des mâles hybrides nés cette fois, de la multiplication de souches dont les origines sont géographiquement éloignées. Le lâcher de ces mâles hybrides dans des populations indigènes aboutit, comme pour le cas précédent, à des croisements qui engendrent des œufs stériles. En 1967, une expérience de ce genre a donné de bons résultats dans un village de Birmanie où de par le lâcher de mâles à incompatibilité cytoplasmique (*C. pipiens* souche Paris x *C. pipiens* souche Fresno-Californie), il a été possible d'exterminer la population autochtone de *Culex pipiens fatigans* (Zakharova, 1983).

La translocation des chromosomes aussi, qui par des moyens chimiques ou d'irradiation aux rayons X permet d'introduire de graves aberrations chromosomiques au niveau des adultes. Ces translocations encore étudiées de façon tout à fait expérimentales sont transmissibles héréditairement et devraient, si elles sont soutenues sur de petites échelles, provoquer la disparition des populations naturelles dans les régions où ont eu lieu les lâchers (Zakharova, 1983). Les effets des translocations sont multiples mais les principaux se manifestent par une baisse de la fertilité et de la longévité des moustiques, une production élevée de mâles et une baisse notable de leur capacité vectrice (Davidson, 1974).

Un dernier exemple. Chez *A. gambiae*, des chercheurs ont pu sélectionner des souches qui sont génétiquement réfractaires au cycle de *Plasmodium falciparum* dans leur organisme (Mouchet et Carnevale, 1991). Des sujets précieux qui du statut de vecteur de paludisme le plus actif en Afrique subsaharienne rétrograderaient à celui de simple nuisance. A partir de ces observations, les chercheurs tentent aujourd'hui d'identifier dans le génome des moustiques les responsables de ces anomalies et de les cloner. Là encore, l'étude sur les moustiques transgéniques n'en est qu'à ses premiers balbutiements et pourrait, dans un avenir plus ou moins lointain être appliquée aux anophèles et autres insectes vecteurs, de manière à diminuer leurs populations mais aussi réduire leur capacité à transmettre des maladies.

Bien que la lutte génétique ait montré qu'il soit possible sur des aires restreintes de limiter les populations de moustiques, elle n'en demeure pas moins une méthode de lutte onéreuse qui demande du personnel qualifié et du matériel particulièrement délicat à manipuler. Cette méthode de lutte encore à l'étude doit également s'appuyer sur une connaissance parfaite de l'écologie environnementale mais aussi de la dynamique et de la génétique des populations de moustiques à combattre.

## La recherche expérimentale

De la découverte d'une molécule nouvelle à sa fabrication industrielle, un insecticide comme d'ailleurs la totalité des pesticides doit passer par toute une série d'évaluations expérimentales. Les premières études (phase 1) détermineront en laboratoire sur quels insectes le composé s'avère le plus actif, les différents niveaux de sensibilité, les doses létales et sublétales. Viennent ensuite les évaluations sur le terrain (phase 2) qui rendent compte de leur véritable efficacité sur les vecteurs dans les conditions de terrain. Des études complémentaires mais néanmoins indispensables ont pour but de mieux connaître les effets toxiques sur l'homme et les animaux, leur accumulation ou au contraire leur dégradation en métabolites actifs ou inactifs dans l'environnement ainsi que l'efficacité et la stabilité de différentes formulations dont les caractéristiques physico-chimiques conditionnent en partie la rémanence des matières actives.

Les insecticides évalués en santé publique sont pour la plupart des produits déjà commercialisés dans le secteur agricole. Les études toxicologiques et analytiques (dosage des résidus) demeurent donc à ce niveau solidement assises mais les expérimentateurs se doivent, pour le bienfait de tous, de choisir judicieusement parmi la gamme des adulticides et des larvicides les plus actifs à petites doses. Commence alors le véritable travail du chercheur, à savoir la mise au point des techniques qui rendront ces insecticides plus efficaces.

Comme nous l'avons déjà vu, le cycle biologique des moustiques comprend une phase préimaginaire aquatique et une phase imaginaire terrestre. Les insecticides peuvent être utilisés à ces deux niveaux mais les méthodes à mettre en place selon que l'on se place sur le plan d'une lutte larvicide ou adulticide diffèrent radicalement l'une de l'autre et doivent prendre en compte la bioécologie parfois fort différente des moustiques à combattre.

#### 4.1. Les adulticides et leur évaluation

Les nombreux échecs enregistrés au cours des campagnes de lutte contre les moustiques et en particulier contre les anophèles vecteurs de paludisme ont été en grande partie liés à un mauvais emploi des insecticides. Le concept même de l'éradication tant vanté par le passé a été abandonné et définitivement exclu des stratégies actuelles de lutte antivectorielle. Or pour tester de nouveaux insecticides, il fallait disposer d'un outil d'évaluation fiable capable de recréer d'une année sur l'autre des conditions expérimentales à peu près identiques. De 1962 à 1968, la mise au point puis l'utilisation de *maisons-pièges* dans les villages de Koumbia et de Pala situés au nord de Bobo-Dioulasso en Haute-Volta, (désormais Burkina Faso) permirent de mieux connaître le comportement des moustiques endophages et leurs modifications comportementales en présence de l'insecticide (Coz *et al.*, 1965). Compte tenu de l'efficacité et de la fiabilité de la méthode utilisée au Burkina Faso, l'Organisation Mondiale de la Santé a décidé d'ouvrir des centres identiques en Tanzanie et au Nigeria.

##### 4.1.1. La station expérimentale de Soumouso

Créée en 1968 en remplacement des stations de Koumbia et de Pala puis abandonnée en 1993, la station expérimentale de Soumouso au Burkina Faso (photo n° 9) se situait à 40 km au sud-est de la ville de Bobo-Dioulasso, dans une zone phytogéographique considérée comme la marge septentrionale des savanes soudano-guinéennes (photo n° 10).

De nombreux insecticides y ont été testés selon des modalités expérimentales strictes (Coz, 1971). L'ensemble de ces évaluations a permis d'obtenir des informations précises sur le mode d'action des différentes classes d'insecticides, tant sur le plan de leur efficacité adulticide que sur le plan de leurs effets secondaires, telles la répulsivité et l'irritabilité. Au fil des études, ces deux dernières caractéristiques se sont même révélées des facteurs de toute première importance dans l'effet global des aspersions intradomiciliaires.

L'ensemble de la station comprenait 20 cases réparties en 10 cases de type Bobo et 10 cases de type Mossi construites dans le style traditionnel local et constituée, chacune, d'une seule pièce d'habitation.

Les cases de type Bobo de forme parallélépipédique se trouvaient accolées deux à deux. Leurs murs étaient construits avec des briques en terre recouvertes de boue séchée (banco) que couvrait un toit plat constitué de troncs d'arbre et de petits morceaux de bois colmatés par un mélange de torchis (banco + paille) et de gravillons. Le toit était ensuite enduit d'une fine couche de ciment pour l'étanchéité.

Les cases de type Mossi, de forme circulaire, étaient édifiées en briques de terre ou de latérite recouvertes de banco. Toute la structure était ensuite coiffée d'un toit conique de paille étayé de feuilles de palmier-raphia.

Les maisons étaient toutes équipées d'ouvertures contrôlées (chicanes en bois pour les cases Bobo et interstice entre mur et plafond muni d'une bande de toile plastifiée pour les cases Mossi) et d'une véranda-piège. Ces deux dispositifs de capture qui faisaient de ces habitations des maisons-pièges permettaient d'étudier la rentrée et la sortie des moustiques après les applications insecticides. A la fin de chaque évaluation et afin qu'il n'y ait pas d'interférences inopinées d'une année sur l'autre, les substrats traités étaient détruits puis remplacés par des matériaux neufs.

Les insecticides étaient appliqués en début de saison des pluies en aspersion intradomiciliaire totale (traitement des murs *et* des plafonds) ou sélective (traitement des plafonds seuls) des cases au moyen de pulvérisateurs à pression préalable (photo n° 11). En 1984 s'est déroulée dans cette station une étude originale portant sur l'évaluation de moustiquaires imprégnées d'insecticide (Darriet *et al.*, 1984).

Pendant toute la durée des études, trois villageois dormaient dans chacune des cases témoins ou traitées. Le matin, à 5 heures, 8 h et 10 h, les moustiques étaient récoltés à la main avec des tubes.

Les moustiques récoltés étaient identifiés, triés en différents lots (morts/vivants ; à jeun/gorgés) et étiquetés en fonction de l'heure et du lieu de la capture : case (murs et toit) - véranda-piège.

Les femelles récoltées mortes (mortalité immédiate) étaient comptées juste après chaque séance de capture. Les femelles prises vivantes étaient mises en observation pendant 24 heures dans des gobelets en plastique munis d'un tampon de coton imbibé d'eau glucosée. Les moustiques morts après observation (mortalité différée) étaient à leur tour dénombrés. La mortalité globale était obtenue par le cumul des mortalités immédiate et différée.

D'une part, la comparaison entre le nombre de moustiques capturés dans les cases témoins et traitées permettait d'évaluer l'action répulsive des insecticides ; d'autre part, la comparaison entre le nombre de femelles récoltées dans les cases et le nombre de celles récoltées dans les vérandas-pièges permettait de chiffrer l'exophilie naturelle (cases témoins) et l'exophilie induite par l'insecticide (cases traitées). Enfin, la comparaison entre le nombre de femelles gorgées et le total de femelles capturées permet d'évaluer les taux de gorgement des moustiques dans les cases témoins et traitées.

Une fois par semaine, des tests complémentaires permettaient d'évaluer dans le temps, l'évolution de l'activité adulticide des produits testés. Ils consistaient en l'observation de la mortalité de lots de 15 femelles d'*A. aegypti* gorgées qui étaient mis en contact forcé pendant une heure

avec les différents substrats traités (banco, bois et paille). Lors des épreuves, il était utilisé des cônes en matière plastique spécialement conçus à cet effet. Pour chiffrer la mortalité consécutive à cette heure de contact, les moustiques étaient retirés de leur cône puis conservés dans des gobelets en plastique pendant 24 heures supplémentaires pour observation.

#### 4.1.2. Pluviométrie et dynamique culicidienne en zone rurale de savane arborée

Le climat en savane soudano-guinéenne, encore appelée savane arborée, se caractérise par une saison sèche qui va de novembre à avril suivie d'une saison des pluies de mai à octobre. A titre d'exemple, les données pluviométriques observées pour les années 1983, 1984, 1985 et 1986 montrent que les premières pluies tombent à partir de février pour se finir en novembre mais que le pic annuel se situe entre juillet et septembre.

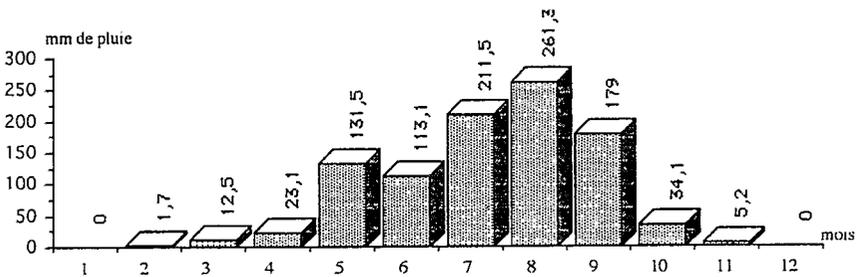


Figure 15

#### Moyenne pluviométrique enregistrée par la station expérimentale de Soumouso pour les années 1983, 1984, 1985 et 1986

La fréquence et l'abondance des pluies conditionnent la mise en eau plus ou moins rapide des multiples et diverses collections d'eau qui parsèment la savane.

Pendant la première moitié de la saison des pluies (de mai à juillet), les précipitations violentes mais encore disséminées dans le temps mettent en eau des petits gîtes ensoleillés, stagnants et favorables à la biologie d'*A. gambiae*. Ces gîtes disparates spatialement éparpillés sont représentés par les trous divers, les petites mares mais aussi par les empreintes d'hommes et d'animaux fort nombreuses aux abords des plans d'eau et des enclos.

A partir de la deuxième moitié de la saison pluvieuse (de août à octobre), les mares, les étangs et les bas-fonds inondables sont à leur niveau le plus haut. Ce sont des plans d'eau généralement vastes et pro-

fonds dont les berges se dissimulent sous un important couvert végétal. Bien que les gîtes soient encore à cette époque de l'année très productifs en *A. gambiae*, ils deviennent également de plus en plus favorables à l'évolution d'*A. funestus* et aussi, bien qu'en quantités moindres en *A. nili*, *M. africana* et *M. uniformis*.

A titre indicatif, quatre autres espèces d'anophèles ont été récoltées, *A. rufipes* et *A. pharoensis* en début de la saison des pluies et *A. flavicosta* et *A. coustani* en fin de la saison des pluies.

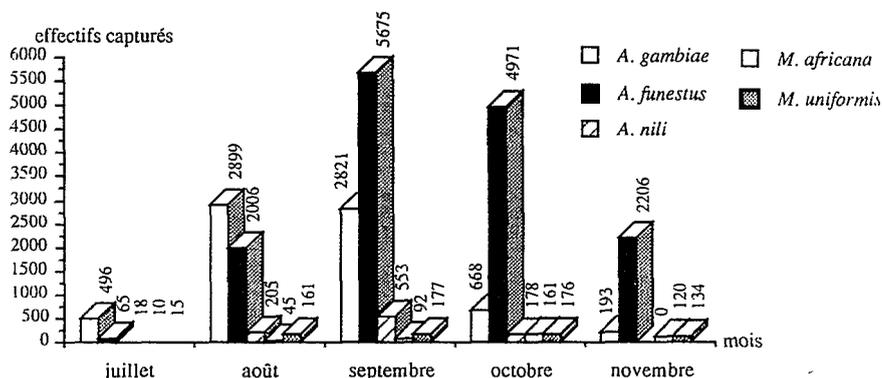


Figure 16

#### Dynamique et effectifs de la faune culicidienne capturée dans les cases-pièges témoins et traitées de la station expérimentale de Soumouso au cours des années 1983, 1984, 1985 et 1986

*A. gambiae* est donc plus abondant qu'*A. funestus* au début de la saison des pluies, la différence étant particulièrement importante durant les mois de juillet et août. Par contre à partir de septembre jusqu'en novembre, *A. funestus* demeure l'espèce anophélienne la plus représentée.

Les moustiques sont capturés le matin dans les cases-pièges témoins mais aussi dans celles traitées par aspersion intradomiciliaire.

#### 4.1.3. Comportement naturel des anophèles à l'intérieur des cases

Pour l'étude du comportement de la faune anophélienne à l'intérieur des cases (endophilie, exophilie et taux de gorgement), les captures ne peuvent être faites que dans des cases non traitées. Ce sont d'ailleurs grâce à ces données-témoins que l'on pourra par la suite analyser les actions des adulticides évalués.

Dans cette zone où les vecteurs des paludismes sont majoritairement *A. gambiae* et *A. funestus*, nous nous sommes limités à l'étude du comportement de ces deux espèces.

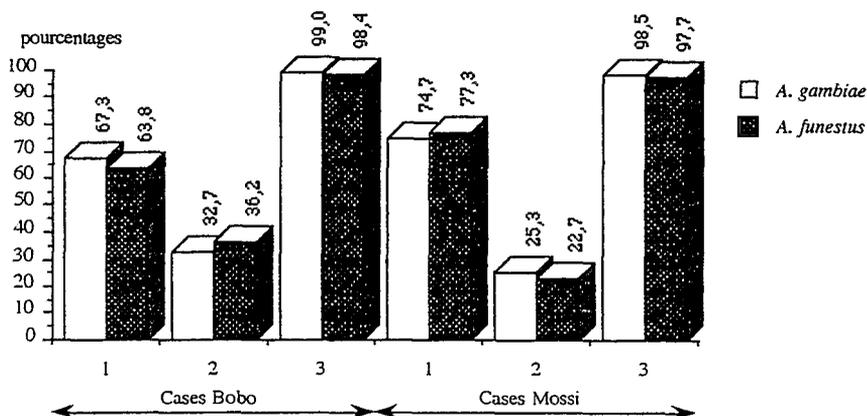


Figure 17

**Pourcentages d'*A. gambiae* et d'*A. funestus* récoltés dans les cases (1) et les vérandas-pièges (2) des maisons Bobo et Mossi témoins au cours des années 1983, 1984, 1985 et 1986. Les pourcentages de gorgement (3) sont exprimés pour cette même période de capture**

La figure 17 montre que dans les maisons-pièges de type Bobo et Mossi, les pourcentages d'*A. gambiae* et d'*A. funestus* récoltés dans les cases demeurent toujours largement supérieurs à ceux enregistrés dans les vérandas-pièges. On peut estimer pour ces deux espèces une exophilie moyenne de 34 % dans les maisons Bobo et de 24 % dans les maisons Mossi. L'endophilie est donc respectivement de 66 % et 76 %. Ces deux anophèles révèlent un comportement naturel à tendance endophile, c'est-à-dire qu'après la prise du repas de sang, les femelles gorgées restent dans les habitations pour digérer et procéder à leur premier ou nouveau cycle gonotrophique.

Il est intéressant de constater que l'exophilie d'*A. gambiae* et d'*A. funestus* est plus importante (+ 10 %) dans les maisons Bobo que dans les maisons Mossi. Ces dernières sont en effet moins hermétiques que les cases Bobo et une partie des moustiques y entrant peut ressortir par l'espace qui se trouve entre le mur et le plafond sans aller dans la véranda-piège.

Pour ce qui est des taux de gorgement, quels que soient l'espèce anophélienne et le modèle de la maison, ils sont très élevés (98 à 99 %).

#### 4.1.4. L'action des adulticides en aspersions intradomiciliaires

Pendant 25 ans, la station expérimentale de Soumouso a permis l'évaluation de nombreux imagocides anti-anophéliens suivant différents modes de traitements, de dosages et de formulations. Hervy *et al.*, 1979

présentent dans une synthèse l'activité d'une trentaine d'insecticides dont les évaluations ont été effectuées dans les stations de Koumbia, de Pala et de Soumouso de 1962 à 1978. Les auteurs ont conclu leur étude en sélectionnant les meilleurs produits et en recommandant l'emploi de cinq organophosphorés (malathion, fénitrothion, chlorphoxim, pirimiphos-méthyl et bromophos) et de trois carbamates (landrin, propoxur et moban).

A la fin des années 70, l'ère des pyréthrinoides de synthèse venait de commencer avec les évaluations de la suméthrine, de la perméthrine et de la deltaméthrine. Seule la deltaméthrine fut reconnue intéressante pour lutter contre les anophèles. Ce fut également grâce à la foudroyante activité de cet insecticide que le groupe des pyréthrinoides de synthèse se retrouva au premier plan des évaluations expérimentales. A titre d'exemple, de 1982 à 1988, cinq nouveaux pyréthrinoides furent testés en aspersions intradomiciliaires, la cyfluthrine et la fenfluthrine (Carnavale *et al.*, 1982), l'ethofenprox (pseudo-pyréthrinoides), l'alpaméthrine et la lambda-cyhalothrine (Darriet, 1991) ainsi qu'un nouveau carbamate, le carbosulfan (Klein et Darriet, 1988). L'ensemble de ces évaluations constitue une masse d'informations relativement complexe au sein de laquelle il est souvent difficile d'établir des comparaisons. Pour mieux cerner l'activité des insecticides, il est préférable d'ajouter les effectifs d'*A. gambiae* et d'*A. funestus* en une somme exprimée pour une seule condition expérimentale qui regroupe les maisons-pièges de type Bobo et Mossi. Au niveau des insecticides, il est également souhaitable de calibrer leurs différentes actions sur les populations anophéliennes, à savoir :

- la mortalité globale répartie en des mortalités immédiate et différée,
- la baisse des pourcentages de gorgement,
- la rémanence,
- et enfin les effets secondaires qui se composent de la répulsion et de l'irritabilité.

L'efficacité d'un traitement est avant toute chose évaluée d'après la mortalité globale (G) :

(G) = < 50 %	:	1
(G) = 51 à 70 %	:	2
(G) = 71 à 90 %	:	3
(G) = > 90 %	:	4

Le rapport des deux composantes (%I/%D) de la mortalité globale donne une mesure de l'effet choc de l'insecticide (I/D), c'est-à-dire son pouvoir à induire une mortalité rapide des populations de moustiques.

(I/D) = < à 1	:	1
(I/D) = 1,1 à 3	:	2
(I/D) = 3,1 à 10	:	3
(I/D) > 10	:	4

La toxicité des adulticides associée à une diminution des pourcentages de gorgement des moustiques (Gorg) agissent sur le taux moyen de survie

des populations anophéliennes. Dans les témoins, les pourcentages de gorgement sont toujours supérieurs à 98 %. La comparaison de ces pourcentages entre les conditions témoins et traitées permet l'analyse statistique des différences par le calcul du  $\chi^2$ . Cependant la valeur d'un  $\chi^2$  augmente d'autant que les effectifs comparés sont grands. Comme les effectifs sont très variables d'une évaluation sur l'autre, l'interprétation du test ne se limitera qu'à sa significativité ou non significativité pour  $p < 0,001$ .

(Gorg) = non significatif : 1

(Gorg) = significatif : 4

L'appréciation de la rémanence (R) dans le cas des aspersions totales est basée sur les résultats des tests effectués uniquement sur les murs en banco car ce substrat poreux s'est avéré, au fil des évaluations, le plus critique pour la stabilité des insecticides. Dans le cas des aspersions sélectives, cette rémanence est évaluée sur le bois pour les cases Bobo et sur la paille pour les maisons Mossi. En prenant comme critère l'intervalle de temps où la mortalité des lots d'*A. aegypti* reste supérieure à 80 %, nous pouvons dresser le barème suivant :

(R) = < 2 mois : 1

(R) = 2 à 3 mois : 2

(R) = 4 mois : 3

(R) = > 5 mois : 4

Lorsque le niveau de mortalité descend en dessous du seuil des 80 %, la rémanence est considérée comme déclinante.

Enfin les effets secondaires de répulsion (Ré) et d'irritabilité (Ir) que provoquent les imagocides reposent essentiellement sur la comparaison des effectifs trouvés dans les maisons-pièges témoins et traitées et leurs vérandas-pièges respectives.

(Ré) (Ir) = < 40 % : 1

(Ré) (Ir) = 40 à 70 % : 2

(Ré) (Ir) = 71 à 90 % : 3

(Ré) (Ir) = > 90 % : 4

Insecticides	Formulations	Doses de traitement	Aspersions
cyfluthrine	PM* à 9,27 %	0,25 g/m <sup>2</sup>	totale
fenfluthrine	PM à 5,35 %	0,25 g/m <sup>2</sup>	totale
ethofenprox	PM à 20 %	1 g/m <sup>2</sup>	totale
alphaméthrine	PM à 5 %	0,1 g/m <sup>2</sup>	totale
lambda-cyhalothrine	PM à 2,5 %	0,1 g/m <sup>2</sup>	sélective et totale
	ED* à 2 %	0,1 g/m <sup>2</sup>	sélective et totale
carbosulfan	PM à 25 %	2 g/m <sup>2</sup>	sélective et totale

PM\* : poudre mouillable dispersible.

ED\* : formulation huileuse adaptée à une pulvérisation électrodynamique.

La modélisation de ces six paramètres va permettre maintenant de tracer les graphes d'activité des cinq pyréthrinoides de synthèse (bien que

compté parmi les pyréthrinoides, l'ethofenprox est un pseudo-pyréthrinoides qui ne possède pas le radical propre à l'ensemble de la famille) et du carbamate testés afin de sélectionner, aux travers de leurs performances propres, les produits les plus actifs. Afin d'avoir une idée plus précise des résultats, les pourcentages des différents paramètres se trouvent dans le tableau 1 situé en annexe.

Les insecticides testés se présentent sous la forme de poudre mouillable dispersible contenant de 2,5 à 25 % de matière active et pour la lambda-cyhalothrine d'une formulation huileuse à 2 % spécialement adaptée à un type nouveau de pulvérisateur électrodynamique (photo n° 12). Le dosage le plus couramment utilisé pour l'évaluation des pyréthrinoides de synthèse se situe entre 0,1 et 1 g/m<sup>2</sup>. Ce dosage est plus important pour le carbosulfan puisqu'il s'élève à 2 g/m<sup>2</sup>. Bien que la plupart des imago-cides soient appliqués en aspersion totale des maisons, deux produits, la lambda-cyhalothrine et le carbosulfan ont fait l'objet d'une évaluation en aspersion sélective des toits.

#### 4.1.4.1. Les aspersion totale

En prenant comme caractère de base la mortalité globale des populations anophéliennes et le rapport des mortalités I/D, nous pouvons d'ores et déjà classer ces six imago-cides en deux grands groupes ; le premier qui induit un fort effet choc (I/D > 3) et le deuxième où la létalité ne se fait sentir que longtemps après le contact avec l'insecticide : pas d'effet choc (I/D < 3).

##### Premier groupe

Ces cinq insecticides se caractérisent par des mortalités globales généralement élevées (de 74 à 94 %) et des rapports I/D de niveau 3-4 correspondant à des mortalités immédiates de 3,1 à 23,7 fois plus élevées que les mortalités différées. L'impact de cet effet choc se répercute sur le nombre de moustiques qui meurent avant de se nourrir et donc directement sur les pourcentages de gorgement toujours très significativement réduits par rapport aux témoins. La rémanence sur banco s'avère en général plutôt médiocre sauf pour l'alpaméthrine où celle-ci se maintient pendant plus de six mois. En plus des propriétés insecticides intrinsèques de ces produits, il importe de tenir compte de l'effet répulsif qui empêche les moustiques d'entrer dans les cases traitées et l'effet irritant qui les pousse une fois à l'intérieur, à fuir les substrats traités. Là encore, nous rencontrons plusieurs conditions. Dans le cas de la cyfluthrine et de la lambda-cyhalothrine PM, la répulsivité est beaucoup moins importante que l'irritabilité. On observe par contre une situation inverse dans le cas de la fenfluthrine et du carbosulfan où la répulsivité demeure cette fois plus grande que l'irritabilité. Seule l'alpaméthrine se distingue, encore, avec des effets secondaires d'irritabilité et de répulsivité à peu près semblables.

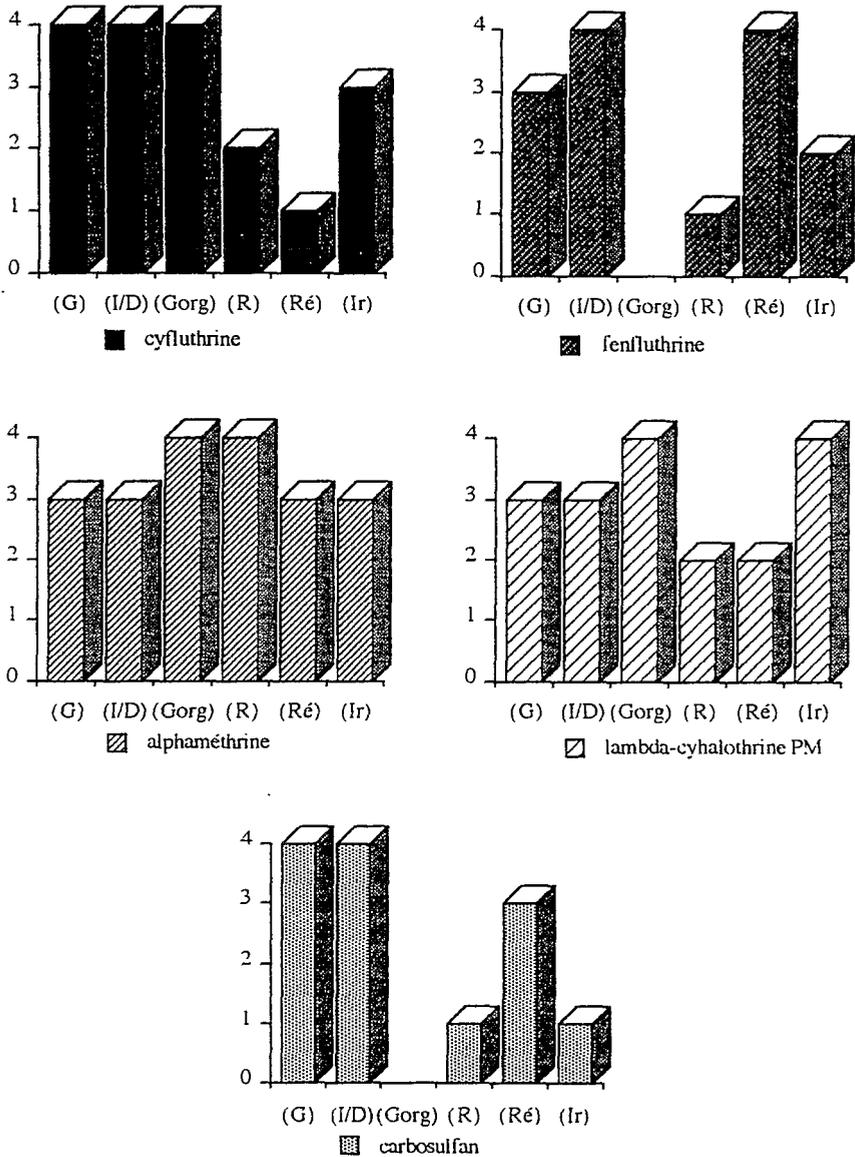


Figure 18

Mode d'action de quatre pyrèthrinoides de synthèse et d'un carbamate à fort effet choc, appliqués en aspersions intadomiciliaires totales des cases Bobo et Mossi. Le test de  $\chi^2$  pour le paramètre (Gorg) n'a pu être effectué dans les cases traitées à la fenfluthrine et au carbosulfan car l'un des effectifs calculés était inférieur à 5

Une attention toute particulière pour le carbo-sulfan : cet insecticide a réalisé la meilleure performance insecticide avec une mortalité globale des anophèles de 93,8 % répartie en une mortalité immédiate de 90 % et une mortalité différée de seulement 3,8 %. Le rapport I/D de 23,7 s'avère le plus fort ratio des six insecticides évalués. Cet effet choc exceptionnel se traduit par une mortalité rapide des anophèles dans les cases traitées, ce qui provoque une fuite moins massive vers l'extérieur et explique le faible nombre des moustiques retrouvés dans les vérandas-pièges.

### Deuxième groupe

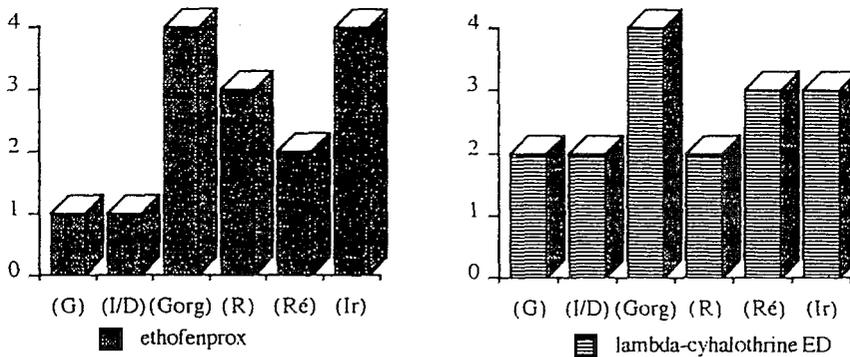


Figure 19

### Mode d'action de deux pyrétroïdes de synthèse à faible effet choc appliqués en aspersions intadomiciliaires totales des cases Bobo et Mossi

L'ethofenprox et la lambda-cyhalothrine ED se caractérisent par une mortalité globale inférieure à 70 % et un rapport I/D < 3 qui n'induit pas ou peu d'effet choc. Les pourcentages de gorgement sont toujours significativement réduits par rapport aux témoins et la rémanence demeure plutôt bonne pour l'ethofenprox (4 mois) et médiocre pour la lambda-cyhalothrine ED (2,5 mois). Pour l'ethofenprox le facteur irritabilité est plus important que la répulsivité mais pour la lambda-cyhalothrine ED, ils sont égaux.

Dans le cas particulier de la lambda-cyhalothrine, les aspersions électrodynamiques ne donnent pas une garantie suffisante sur les quantités insecticides réellement appliquées. Contrairement à un appareil à pression préalable où seule la pression de l'air compresse puis projette la solution insecticide, le pulvérisateur électrodynamique y combine en plus un champ électrique de haut voltage qui plaque la formulation ED sur le support à traiter. Pour le traitement des murs, le manipulateur tenait la rampe de l'appareil en position horizontale ce qui n'engendre pas de problème à ce niveau. Par contre pour le traitement des toits, la rampe devait être tenue dans une position verticale et l'insecticide, au lieu d'être projeté sur les toits sous la forme d'un volume ultra-faible, tombait sur le sol avant

même d'avoir été plaqué sur le substrat. L'évaluation de cette technologie de pointe a donc montré qu'il était difficile d'utiliser cet appareil pour les traitements intradomiciliaires des maisons. De plus, ce type d'aspersion a fait classer la formulation électrodynamique (ED) comme étant un insecticide à faible effet choc alors que la lambda-cyhalothrine formulée en poudre mouillable (PM) et pulvérisée avec les moyens conventionnels est apparue comme un insecticide à fort effet choc.

#### 4.1.4.2. Les aspersiones sélectives

Les aspersiones sélectives se caractérisent par le traitement des plafonds uniquement. Le principe expérimental reste rigoureusement le même que pour les aspersiones totales, à la différence que la rémanence est estimée sur le bois dans les cases Bobo et sur la paille dans les cases Mossi. Pour illustrer cet exemple, nous avons sélectionné les cas d'un pyréthrinolide de synthèse et d'un carbamate qui, à la même dose avaient été aussi évalués en aspersiones totales (voir figures 18 et 19).

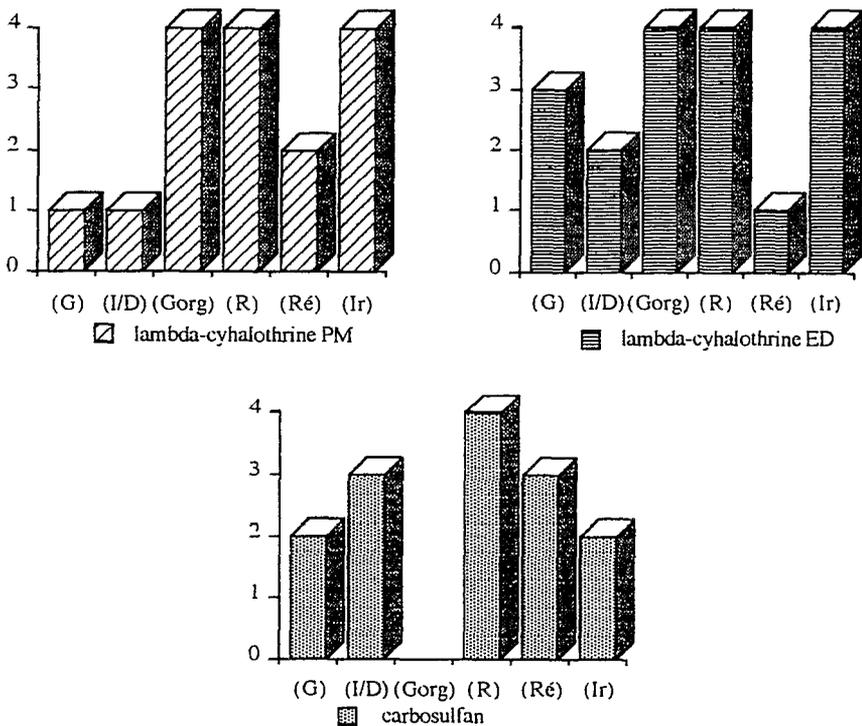


Figure 20

**Mode d'action d'un pyréthrinolide de synthèse sous la forme de deux formulations et d'un carbamate appliqués en aspersiones intradomiciliaires sélectives des cases Bobo et Mossi. Le test de  $\chi^2$  pour le paramètre (Gorg) n'a pu être effectué dans les cases traitées au carbosulfan car l'un des effectifs calculés était inférieur à 5**



Photo 1 : Adulte femelle d'*Anopheles gambiae* prenant son repas de sang sur un homme

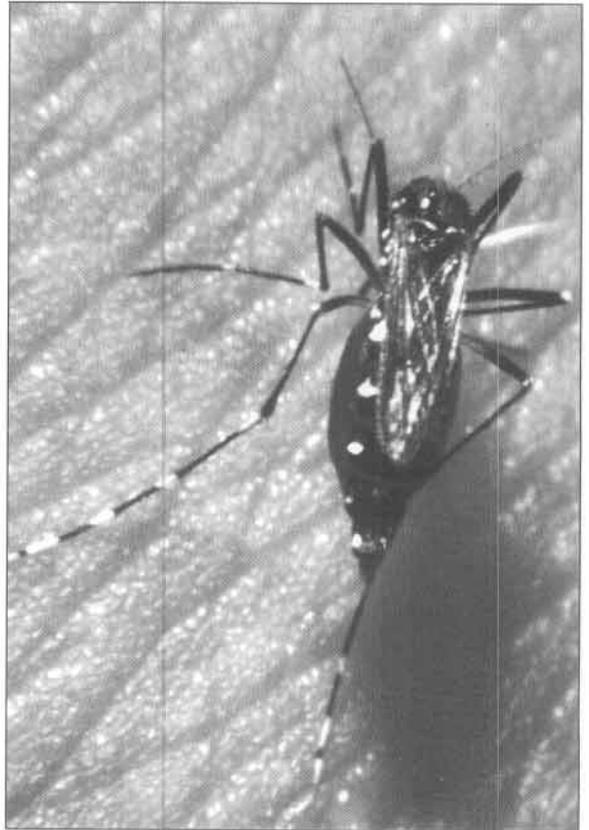


Photo 2 : Adulte femelle d'*Aedes aegypti* prenant son repas de sang sur un homme



Photo 3 : Puisard, gîte typique à *Culex quinquefasciatus*

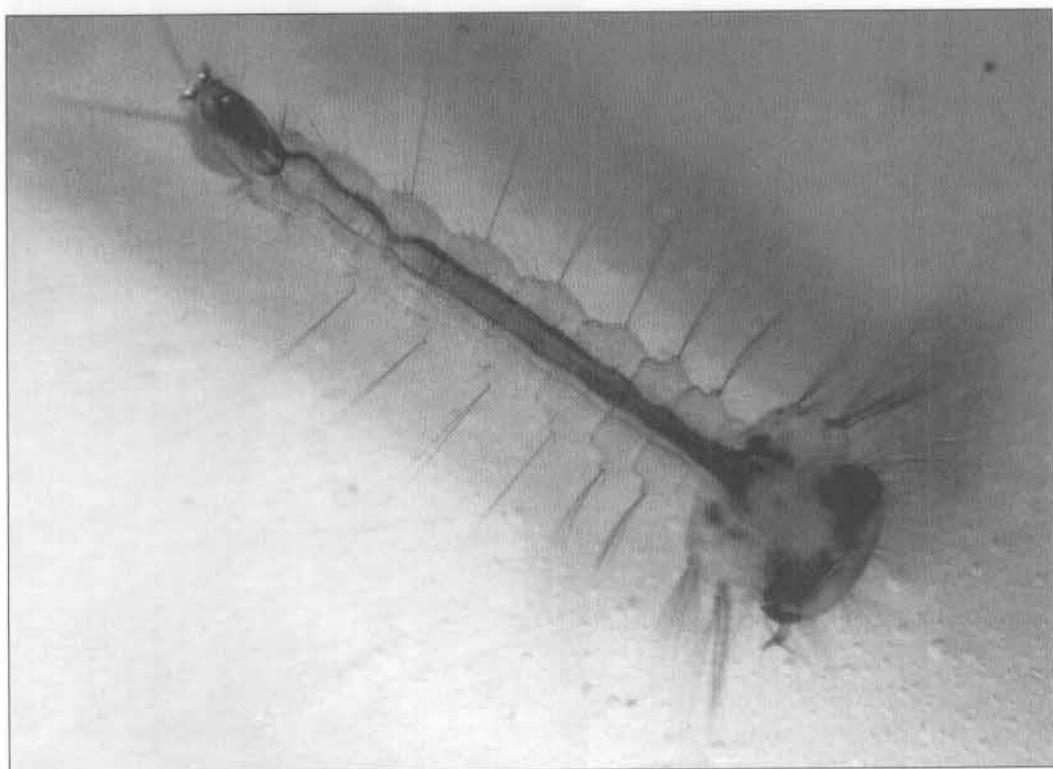


Photo 4 : Larve de *Culex quinquefasciatus*

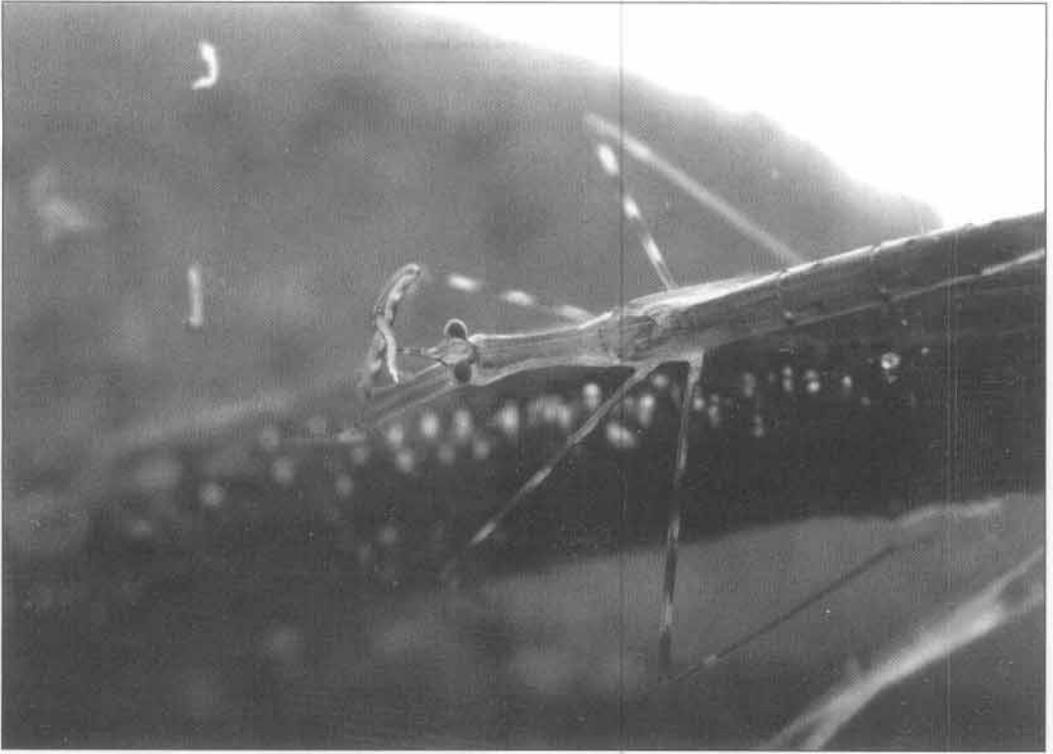


Photo 5 : Hétéroptère aquatique entomophage. Stade préimaginal de *Ranatra parvipes vicina* dévorant une larve de moustique



Photo 6 : Plante carnivore du genre *Droséra* poussant sur les berges d'un lac situé sur le littoral Atlantique en Gironde (France)

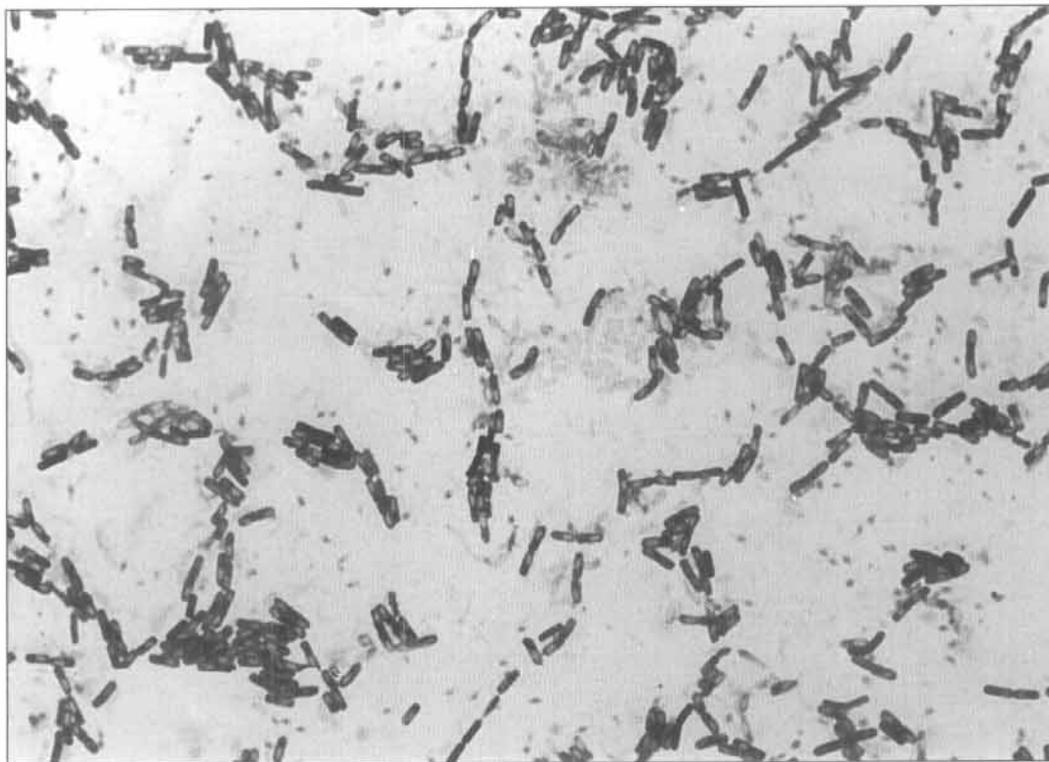


Photo 7 (x 1 250) : Forme végétative et spores de *Bacillus thuringiensis* var *israelensis* sérotype H14

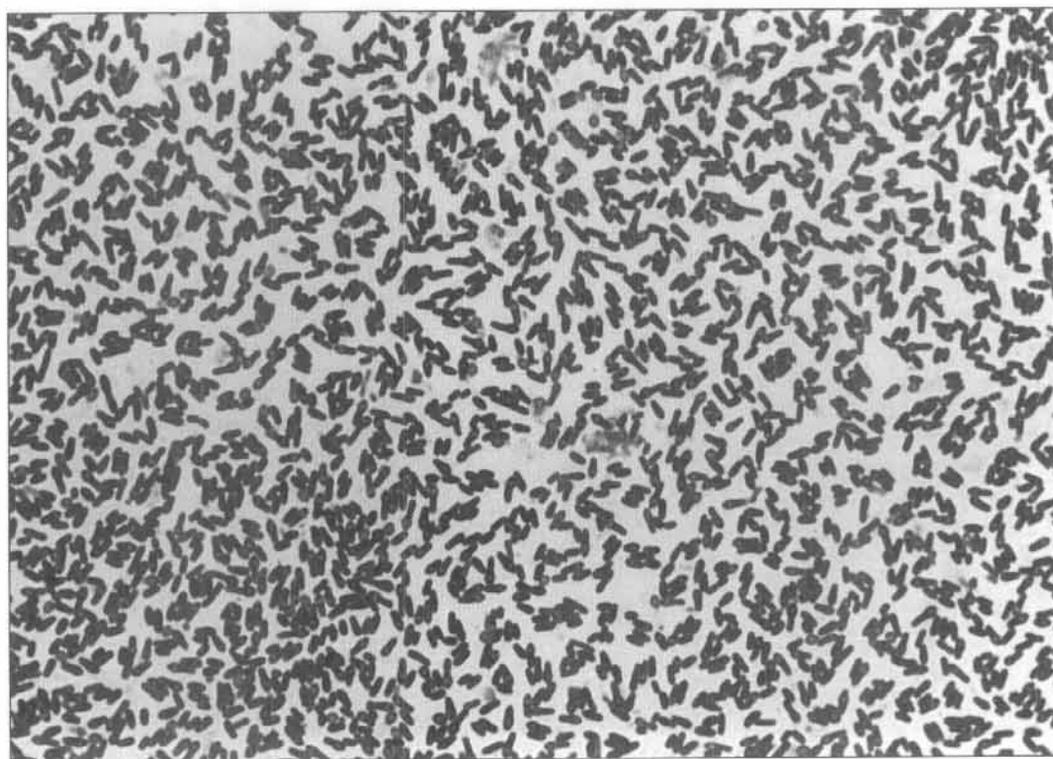


Photo 8 (x 1 250) : Forme végétative et spores de *Bacillus sphaericus*

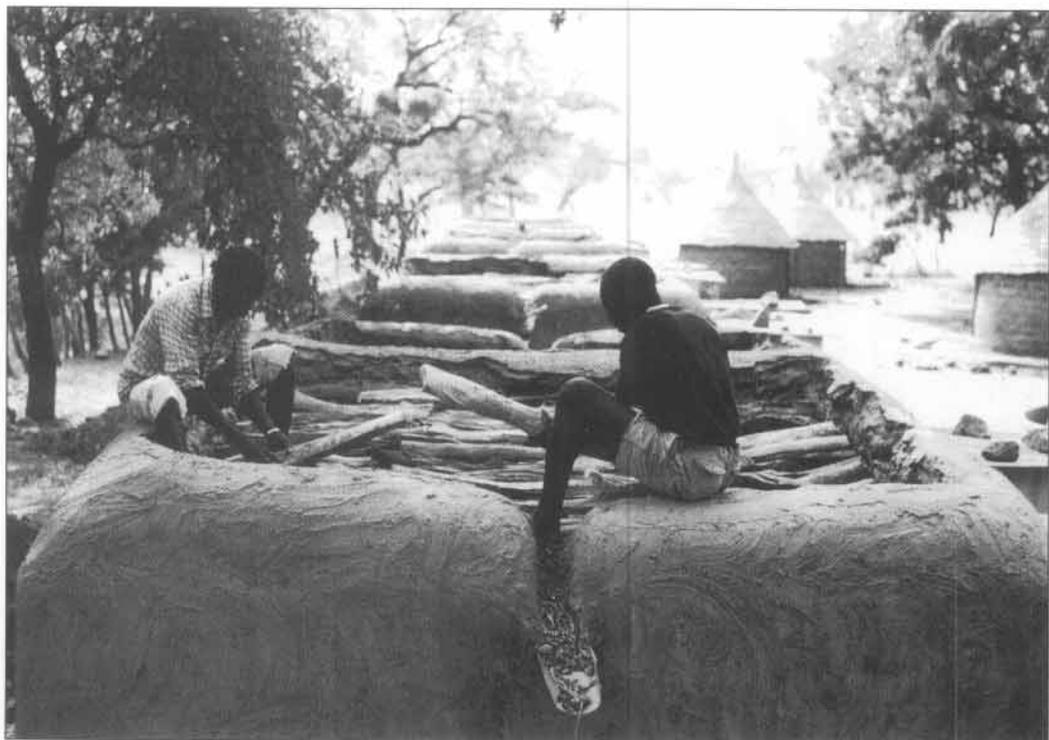


Photo 9 : La station expérimentale de Soumoussou au Burkina Faso en cours de reconstruction. Au premier plan se trouvent les cases de type Bobo et en deuxième plan les cases de type Mossi



Photo 10 : Savane soudano-guinéenne ou savane arborée en saison des pluies à la station expérimentale de Soumoussou



Photo 11 : Pulvérisateur à pression préalable



Photo 12 : Pulvérisateur électrodynamique

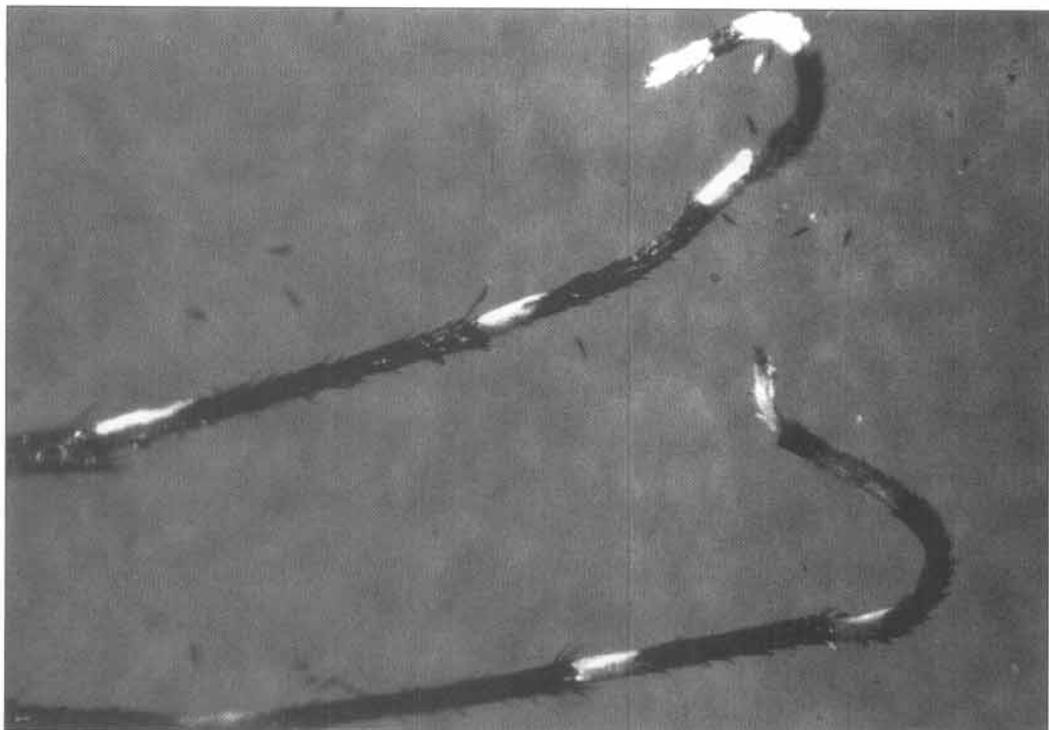


Photo 13 (x 25) : Altération morphologique des pattes postérieures d'un adulte d'*Aedes aegypti* émergeant à la dose sub létale d'un inhibiteur de développement de type ecdysoïde, l'OMS-3031



Photo 14 : Mares artificielles cimentées construites pour l'évaluation des nouveaux larvicides sur *Anopheles gambiae*



Photo 15 : Cours d'eau de savane proche de la ville de Bobo-Dioulasso après un violent orage

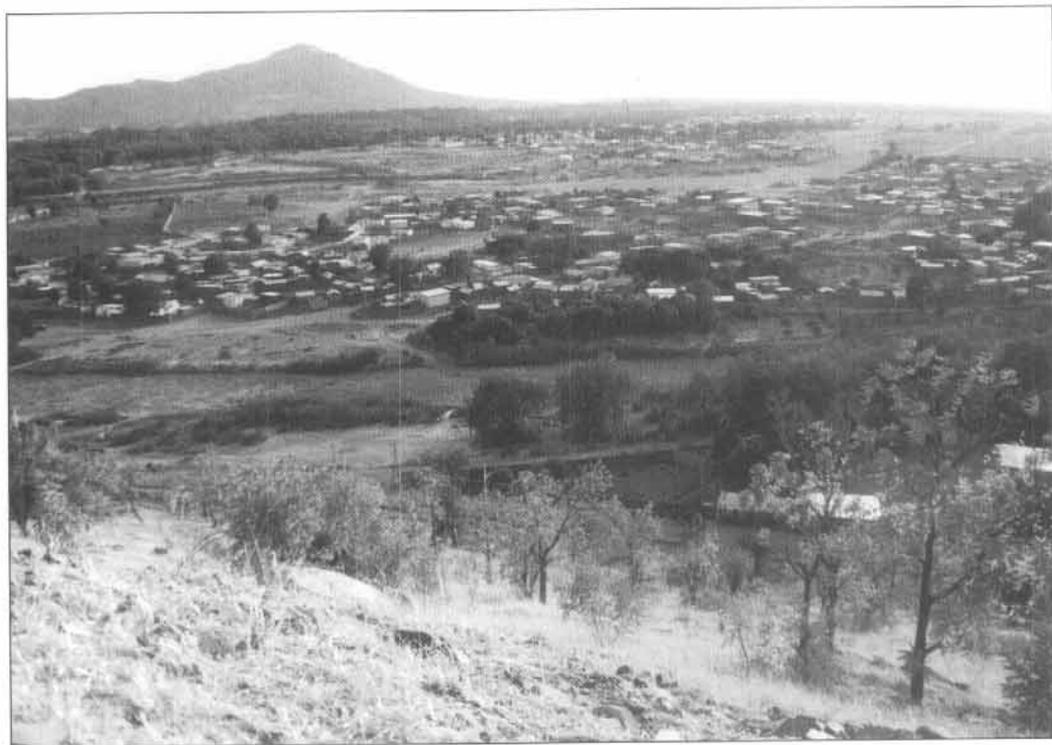


Photo 16 : La ville de Maroua dans l'extrême nord du Cameroun pendant la saison sèche. Les photos de ce hors-texte sont de Frédéric Darriet

Comparée aux aspersions totales, l'efficacité en aspersions sélectives de la lambda-cyhalothrine PM et du carbosulfan révèlent une chute notable de la mortalité globale et de leur effet choc. Un cas particulier cependant avec la lambda-cyhalothrine ED qui manifeste en aspersion sélective une efficacité supérieure au traitement total avec une hausse de la mortalité globale et un maintien du rapport I/D. Ces résultats sont à interpréter avec beaucoup de précautions pour les raisons que nous avons déjà exprimées à propos des aspersions électrodynamiques, à savoir des quantités insecticides pulvérisées qui ne sont pas toujours celles escomptées. Dans ce cas précis, cette hausse de la mortalité témoigne d'un surdosage certain. Dans tous les cas, les pourcentages de gorgement sont significativement réduits par rapport aux témoins et la rémanence qui avait été toujours très moyenne sur banco se révèle excellente sur le bois et la paille. Cette différence s'explique par le caractère moins absorbant de la paille et du bois par rapport au banco. Il faut ajouter que le pH basique des matières telles que le ciment et le banco en font des supports particulièrement défavorables à la stabilité des pyréthrinoides. En ce qui concerne les phénomènes de répulsion et d'irritabilité, ils demeurent en fonction des traitements totaux inchangés pour la lambda-cyhalothrine PM. Pour la lambda-cyhalothrine ED la répulsion diminue considérablement, ce qui s'explique par le caractère localisé et sélectif du traitement mais l'irritabilité augmente sans que l'on puisse avancer de signification logique, à moins de considérer une nouvelle fois, que les quantités insecticides utilisées lors de l'aspersion sélective ont été supérieures à celles de l'aspersion totale. Enfin pour le carbosulfan le pouvoir irritant passe de 20 % en aspersion totale à 43,3 % en aspersion sélective, le phénomène découlant de la forte baisse de la mortalité globale (de 93,8 à 66,6 %) et de son rapport I/D (de 23,7 à 4,8).

#### 4.1.4.3. Synthèse des résultats

Appliqués en aspersions intradomiciliaires totales ou sélectives dans les cases Bobo et Mossi, les cinq pyréthrinoides de synthèse et le carbamate testés donnent globalement de bons résultats, tant au niveau de leur efficacité insecticide que de leurs effets secondaires. Ils engendrent en effet une dynamique nouvelle des populations anophéliennes sauvages au pourtour et à l'intérieur des cases traitées. La mortalité importante des anophèles, la diminution des taux de gorgement ainsi que la répulsion et l'irritabilité des substrats traités sont autant d'effets directs et indirects qui retiennent l'attention des expérimentateurs. Cependant les effets secondaires de répulsion et d'irritabilité induisent des modifications de comportement des moustiques qui n'entraînent pas nécessairement leur mort. La combinaison répulsion-irritabilité diminue le contact homme-vecteur à l'intérieur des cases traitées mais elle réduit également le nombre de moustiques qui entrent en contact avec l'insecticide. A cause

de la répulsivité, beaucoup d'anophèles ne franchissent pas le seuil des habitations traitées et il s'ensuit une recrudescence du nombre de piqûres sur les hommes qui se tiennent à proximité de leur case. Cette information est capitale lorsqu'on sait qu'en Afrique tropicale, courante est l'habitude des villageois à dormir à l'extérieur lorsque les nuits sont chaudes. Le facteur irritabilité écourte quant à lui le temps de contact entre le moustique et le substrat traité.

La répulsivité d'un insecticide n'est plus un inconvénient si les populations villageoises dorment à l'intérieur de leurs cases ou même au dehors, si elles s'assurent la protection de moustiquaires. L'irritabilité devient aussi un atout sérieux si l'imagocide possède un fort effet choc. La combinaison de ces deux paramètres peut dans un premier cas refouler le moustique vers l'extérieur des cases ou même mieux, le tuer avant qu'il ne pique. Dans le deuxième cas, même si l'anophèle se gorge, un fort effet choc terrasse le vecteur dans l'heure ou les heures qui suivent son contact avec l'imagocide, intervenant de ce fait directement sur le taux moyen de survie des populations anophéliennes. La rémanence estimée sur banco donne dans l'ensemble des résultats moyens avec 1 à 4 mois d'activité. Cette même rémanence sur le bois et la paille révèle des temps d'activité de plus de cinq mois. En procédant alors à un traitement total des cases en début de saison des pluies (juin-juillet), certains de ces insecticides couvrent efficacement toute la période favorable à l'évolution des anophèles (de juin à octobre). La cyfluthrine, la fenfluthrine, l'alphaméthrine, la lambda-cyhalothrine PM et le carbosulfan constituent les imagocides les plus actifs de ces dix dernières années et peuvent par un traitement intradomiciliaire total et unique en début de saison des pluies, protéger efficacement les populations villageoises contre les anophèles vecteurs du paludisme.

#### *4.1.5. L'action des adulticides en imprégnation de moustiquaires*

Comparativement au nombre d'études qui ont été réalisées sur les aspersions intradomiciliaires, les évaluations d'insecticides en imprégnation de moustiquaires sont peu représentées dans la liste des expérimentations faites à Soumouso. C'est pourtant dans cette station que cette méthode de lutte a été inaugurée en 1975 avec une évaluation portant sur 4 organophosphorés, le fénitrothion, le chlorpyrifos-méthyl, le chlorphoxim et le pirimiphos-méthyl (Brun et Sales, 1976). Le chlorphoxim utilisé à la dose de 0,2 g/m<sup>2</sup> a donné des résultats encourageants avec une mortalité globale des anophèles sauvages de 88 % pendant 3 mois. Les trois autres insecticides ont montré une activité médiocre doublée d'une faible rémanence comprise entre 2 semaines et 2 mois. En 1979, la rémanence de la deltaméthrine et de la perméthrine (pyréthrinoides de syn-

thèse) a été évaluée après imprégnation de différents tissus entrant dans la confection des moustiquaires (Hervy et Sales, 1980). Aux doses de 0,008 g/m<sup>2</sup> de deltaméthrine et de 0,08 g/m<sup>2</sup> de perméthrine, l'activité de ces deux imogocides s'est montrée satisfaisante pendant 6 mois avec une mortalité des lots d'*A. aegypti* comprise entre 90 et 100 %. C'est d'ailleurs suite à cette étude qu'a été entreprise en 1983 une évaluation sur un grand nombre de moustiquaires individuelles et collectives intactes et trouées imprégnées de perméthrine à la dose de 0,08 g/m<sup>2</sup> (Darriet *et al.*, 1984). Il a fallu par la suite attendre la saison des pluies de 1992 pour que 4 autres pyréthrinoides de synthèse, l'ethofenprox, la bêta-cyfluthrine, de nouveau la deltaméthrine et la lambda-cyhalothrine, soient à leur tour évalués (Lemasson et Lochouarn, 1992).

Insecticides	Formulations	Doses d'imprégnation
perméthrine	CE* à 20 %	0,08 g/m <sup>2</sup>
ethofenprox	CE à 20 %	0,025 g/m <sup>2</sup>
bêta-cyfluthrine	CE à 12,5 %	0,025 g/m <sup>2</sup>
deltaméthrine	CE à 1,2 %	0,025 g/m <sup>2</sup>
lambda-cyhalothrine	PM* à 10 %	0,025 g/m <sup>2</sup>

CE\* : concentré émulsifiable.

PM\* : poudre mouillable dispersible.

Mis à part la lambda-cyhalothrine qui se présente sous la forme de poudre mouillable, les quatre autres pyréthrinoides de synthèse sont formulés en concentré émulsifiable. Beaucoup de matières actives, qu'elles soient solides ou liquides sont insolubles dans l'eau. Pour pallier cette difficulté, les concentrés émulsifiables se composent donc de la matière active solubilisée dans un solvant naturel ou synthétique qui, une fois dilué dans l'eau fournit une solution homogène indispensable à une bonne imprégnation des moustiquaires. La perméthrine a été utilisée à la dose de 0,08 g/m<sup>2</sup> alors que l'ethofenprox, la bêta-cyfluthrine, la deltaméthrine et la lambda-cyhalothrine ont été appliqués à 0,025 g/m<sup>2</sup>. Les moustiquaires confectionnées pour l'ensemble de ces évaluations étaient constituées de percale et de tulle en coton qui possèdent la particularité de bien absorber et fixer les solutions insecticides.

En prenant de nouveau comme système d'analyse les mêmes modèles que ceux utilisés pour les aspersions intradomiciliaires, l'on obtient pour chacune des matières actives et formulations, leur spectre d'activité sur la faune anophélienne sauvage. Le tableau 2 situé en annexe expose par rapport aux témoins, les pourcentages des différents paramètres entomologiques.

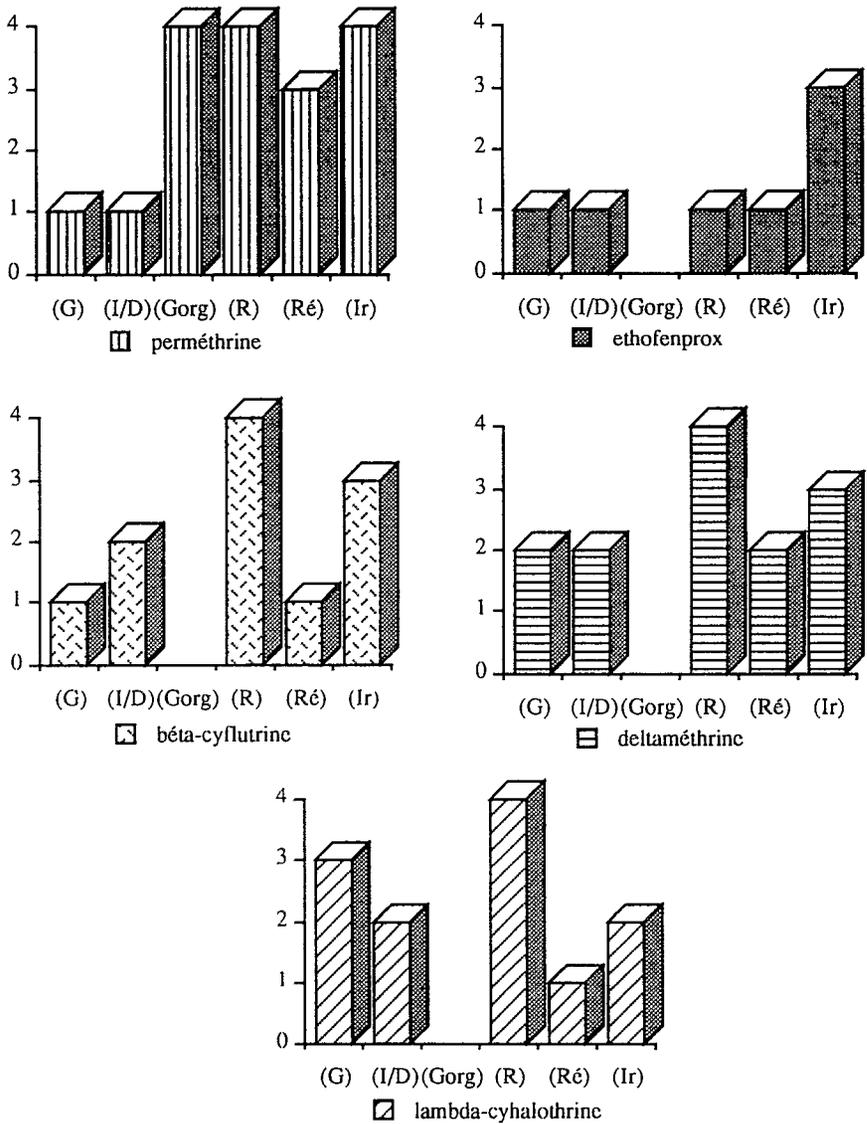


Figure 21

**Mode d'action de cinq pyréthrinoides de synthèse en imprégnation de moustiquaires installées dans des maisons-pièges de type Bobo et Mossi. Le test de  $\chi^2$  pour le paramètre (Gorg) n'a pu être effectué que pour la perméthrine, ce facteur n'ayant pas été pris en compte lors de l'évaluation des quatre autres insecticides**

La perméthrine, l'ethofenprox et la bêta-cyfluthrine sont pourvus d'un pouvoir insecticide faible (respectivement 16,9, 27,8 et 49 % de mortalité globale) presque totalement démunis d'effet choc ( $I/D = 0,5$  et  $1,6$ ). Mais contrairement à l'ethofenprox, la perméthrine et la bêta-cyfluthrine se distinguent par une rémanence longue (5 mois) et pour la perméthrine par des effets de répulsion (72 %) et d'irritabilité (97,2 %) puissants qui se traduisent par une baisse considérable du contact homme-vecteur. Dans le cas de ce dernier adulticide, les pourcentages de gorgement des moustiques ont été significativement réduits, puisque par rapport aux témoins, il a été observé une baisse de 12 %.

La deltaméthrine se caractérise par des propriétés insecticides plus fortes (60,8 %) avec un effet choc plus important ( $I/D = 2,07$ ) et une rémanence de 5 mois.

La lambda-cyhalothrine s'avère l'insecticide le plus actif en imprégnation des moustiquaires avec une mortalité globale de 86,4 % et un rapport ( $I/D$ ) de 2,6. Sa rémanence de 5 mois s'accompagne d'une action répulsive limitée (33,9 %) et d'un pouvoir irritant (59,2 %) bien inférieur aux quatre autres pyréthrinoides de synthèse. Cette faible irritabilité s'explique par une mortalité élevée des anophèles mais surtout par un rapport ( $I/D$ ) conséquent, qui tue le moustique rapidement et l'empêche de gagner la véranda-piège.

Les évaluations de ces 5 adulticides en imprégnation de moustiquaires montrent que la perméthrine, bien que dotée de propriétés insecticides faibles, occasionne des effets de répulsion et d'irritabilité importants qui limitent considérablement le contact entre l'homme et le vecteur. Appartenant à une autre catégorie, la deltaméthrine et la lambda-cyhalothrine se caractérisent plus par leurs effets imagocides que par leurs effets secondaires, ce qui se traduit au niveau de la faune anophélienne par des taux de survie nettement diminués. Une moustiquaire imprégnée avec un insecticide à fort effet choc constitue à l'heure actuelle le meilleur moyen de protection individuelle. A ce titre, il aurait été judicieux d'évaluer à la station expérimentale de Soumouso, les impacts d'une imprégnation de moustiquaires et de rideaux aux fenêtres des maisons avec des insecticides comme l'alphaméthrine et le carbosulfan qui, nous l'avons vu, donnent d'excellents résultats en aspersions intradomiciliaires.

Une question se pose cependant. Les moustiquaires imprégnées d'insecticides pourraient-elles, lors d'un emploi généralisé, remplacer efficacement et avantageusement les traitements intradomiciliaires ? Plusieurs études ont été réalisées dans ce sens. Les évaluations de moustiquaires imprégnées de perméthrine et de deltaméthrine au niveau de villages ont donné des résultats prometteurs (Carnevale *et al.*, 1988 ; Li zuzi *et al.*, 1987 ; Snow *et al.*, 1988). Cependant le contexte expérimental qui demande une surveillance constante des modalités d'études fausse le comportement naturel des populations villageoises. Il s'avère en effet que les

facteurs limitants à l'acceptation de toute nouvelle technique de lutte découlent principalement du comportement et de la culture des hommes. La nature nomade de certains groupes ethniques, les habitudes culturelles des agriculteurs, les habitudes des villageois à dormir au dehors de leur case pendant la saison chaude, l'acceptabilité même de la méthode sont autant de difficultés qui peuvent contrecarrer la fiabilité d'un système de lutte pourtant reconnu efficace par les experts.

#### 4.1.6. *Aspersions intradomiciliaires ou moustiquaires imprégnées ?*

En ce qui concerne le paludisme, il existe des régions dans le monde où la maladie revêt un caractère instable et épidémique. En Afrique, cette instabilité décrite dans les zones rurales arides se caractérise par des conditions climatiques et édaphiques particulièrement sévères où la faible pluviométrie liée à une absence d'eau de surface limitent la prolifération des anophèles. Cependant lorsque les pluies surviennent, certaines années elles déferlent sous la forme de cyclones dont les eaux violentes ravinent les sols et y laissent après leur passage une myriade de flaques propices à l'évolution des anophèles. Si la flambée anophélienne survient dans une zone où les populations villageoises n'ont subi que peu ou pas d'infestation palustre, leur immunité trop basse ne les protégeront pas contre la maladie. On assiste alors à une épidémie qui, en l'absence de toute intervention, peut s'avérer particulièrement meurtrière. Les espèces *A. gambiae* et *A. funestus* naturellement endophiles et anthropophiles ont des comportements qui se prêtent bien à une lutte imagocide. Ainsi, dans les années 1950 les traitements intradomiciliaires avec le DDT ont éliminé les anophèles des hauts plateaux malgaches pendant près de 30 ans. L'arrêt des traitements au milieu des années 1970 entraîna une recrudescence des densités anophéliennes, de la transmission et une flambée de la maladie au sein des populations non immunisées (Blanchy *et al.*, 1993). Dans de tels milieux, juste avant les premières pluies on pourrait envisager des traitements intradomiciliaires avec les pyréthrinoides et les carbamates les plus performants. Il existe de nos jours assez d'insecticides pour entreprendre une rotation et limiter ainsi les risques d'acquisition de résistances chez les moustiques. L'usage de la moustiquaire imprégnée d'insecticide prend quant à elle toute sa signification lors du déplacement des villageois vers leurs champs. L'imprégnation d'une moustiquaire avec un insecticide rémanent protège l'utilisateur d'une barrière chimique qui renforce la barrière physique bien souvent altérée (trous et déchirures). Cette technique de lutte aisément utilisable limite à la fois le contact entre l'homme et le vecteur et la transmission de la maladie.

Dans les zones de savane arborée, les conditions climatiques moins sévères entretiennent toute l'année une population anophélienne résiduelle

qui explose à chaque saison des pluies. Dans ces zones de paludisme endémique ou stable, les villageois reçoivent un grand nombre de piqûres infestantes. L'existence de cette transmission assure un équilibre fragile entre l'homme et le parasite mais surtout elle favorise l'acquisition précoce et l'entretien d'une immunité chez les individus régulièrement infectés. Riche en eaux de surface, la savane arborée est le siège d'activités agricoles qui favorisent l'installation de nombreuses bourgades et populations villageoises. Dans ce contexte, les traitements intradomiciliaires deviendraient particulièrement lourds et onéreux puisque le nombre de foyers à traiter serait considérable. Il est évident qu'aucune communauté villageoise ne pourrait entreprendre une opération de cette envergure sans recourir à des financements extérieurs et du personnel qualifié. Il reste alors l'alternative de la moustiquaire imprégnée d'insecticide, qui au niveau individuel et familial assure une protection raisonnable. Encore faut-il que les habitants de ces régions puissent se payer une moustiquaire et ensuite avoir accès à une structure capable de procéder à des imprégnations. La moustiquaire imprégnée d'insecticide représente à l'heure actuelle le meilleur moyen de lutte contre les vecteurs du paludisme mais elle reste pour beaucoup de gens résidant dans les zones rurales, inaccessible car trop onéreuse. En milieu urbain par contre où les revenus et le niveau de vie sont supérieurs, l'usage de la moustiquaire imprégnée pourrait être généralisée afin de protéger efficacement les populations contre les moustiques (Hougard, 1991 a).

#### 4.2. Les larvicides et leur évaluation

Si les aduicticides peuvent être utilisés en aspersions intradomiciliaires et en imprégnation des moustiquaires pour combattre la plupart des moustiques adultes, les larvicides ne peuvent être épanchés que dans certains milieux aquatiques. En savane, la dissémination, la multiplicité et le caractère hétérogène des gîtes larvaires à *A. gambiae* (empreintes d'homme et d'animaux, mares, flaques, trous d'eau divers...) rendent toute opération de lutte larvicide difficilement envisageable. Seuls certains contextes bien particuliers, tels que les plans d'eaux marécageux, les étangs et les rizières peuvent faire l'objet de traitements. Encore faut-il utiliser des larvicides sélectifs pour ne pas détruire la faune non cible. En milieu urbain, le problème se pose autrement car les gîtes sont localisés (flaques, caniveaux, latrines, puisards...), bien délimités et principalement colonisés par les stades préimaginaux de *C. quinquefasciatus* mais aussi, bien qu'en quantité moindre, par des larves d'*A. gambiae*. Un traitement systématique de tous les gîtes potentiels et productifs en larves de ces moustiques pourrait considérablement réduire leurs populations.

Mais avant de conseiller l'utilisation de tel ou tel larvicide, qu'il soit chimique ou biologique, il est nécessaire d'évaluer expérimentalement leur efficacité et leur rémanence sur le terrain.

A cet effet, des essais à petite échelle ont été réalisés dans la ville de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso pour évaluer en laboratoire et dans les conditions naturelles, l'activité larvicide et la rémanence de composés inhibiteurs de développement des insectes sur les populations larvaires de *C. quinquefasciatus*, d'*A. aegypti* et d'*A. gambiae*.

Une autre étude réalisée à l'échelon d'une ville entière a été faite à Maroua au Nord Cameroun pour évaluer l'impact que pouvait avoir un traitement larvicide biologique (*Bacillus sphaericus*) sur les populations de *C. quinquefasciatus*.

#### 4.2.1. L'évaluation des inhibiteurs de développement des insectes à Bobo-Dioulasso

Bobo-Dioulasso est une ville de moyenne importance située dans le sud-ouest du Burkina Faso en zone de savane soudanienne ou savane arborée. Le climat est marqué par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison des pluies dont la moyenne annuelle des précipitations se chiffre à 1 100 mm. La construction de cette ville datant de la fin du siècle dernier, elle a subi tout au long du XX<sup>e</sup> siècle un développement important tant en superficie qu'en population : de 50 000 en 1960 à 230 000 en 1985 (Robert *et al.*, 1986).

Le centre-ville bénéficie d'un réseau d'assainissement édifié dans les années 1950. Ce réseau est constitué de canaux à ciel ouvert qui convergent vers un cours d'eau naturel recueillant l'ensemble des eaux de ruissellement ainsi que la plupart des eaux usées de la ville. Depuis leur construction, les caniveaux n'ont pas été régulièrement entretenus, ce qui se traduit par des zones d'affaissement et des trous dans lesquels les eaux polluées stagnent. On observe également beaucoup de puisards qui se présentent comme de simples trous d'environ un mètre de diamètre creusés à même le sol. L'expansion des villes concerne avant tout les quartiers périphériques dont la mise en place rapide et spontanée n'autorise aucune infrastructure sanitaire. Les résidents éliminent alors leurs eaux usées par le seul système du puisard.

Dans les quartiers du centre, les plus fortement anthropisés, le nombre de piqûres de *Culex* par homme et par an se chiffrait au cours d'une enquête réalisée en 1985 entre 20 000 et 25 000. Par contre le nombre de piqûres d'*Anopheles* dans ces mêmes quartiers a été évalué entre 75 et 300 piqûres par homme et par an. La plupart des gîtes étant en effet fortement chargés en matière organique, ils favorisent la pullulation des *Culex* au détriment des *Anopheles*. En revanche, dans les quartiers de banlieue

où l'habitat est plus récent, plus clairsemé mais aussi plus proche de la savane environnante, le nombre de piqûres par homme et par an se chiffrait à 4 200 pour *Culex* et à 2 500 pour *Anopheles* (Robert *et al.*, 1986). On vérifie donc une nouvelle fois que *C. quinquefasciatus* est un moustique qui s'est largement adapté à la ville alors que les *Anopheles* colonisent surtout les zones périurbaines et rurales.

En ce qui concerne les inhibiteurs de développement, cette famille de larvicides se scinde en deux grands groupes : les ecdysoïdes qui perturbent la formation de la cuticule au moment des mues larvaires et les juvénoïdes qui bloquent la nymphose de sorte que la nymphe meurt sans donner d'adulte. De 1982 à 1988, trois ecdysoïdes et un juvénoïde particulièrement actifs ont été testés en laboratoire et sur le terrain, dans la ville de Bobo-Dioulasso (Darriet *et al.*, 1985a, 1985b, 1985c, 1986b, 1987a, 1987b et 1989).

Inhibiteurs	Groupes	Formulations
OMS-2015 : triflumuron	ecdyssoïde	SI* à 1,17 %
OMS-3007	juvénoïde	CE* à 10 %
OMS-3009	ecdyssoïde	SC* à 5 %
OMS-3031	ecdyssoïde	CE* à 5 %

SI\* : support (sable) imprégné.

CE\* : concentré émulsifiable.

SC\* : suspension concentrée.

#### 4.2.1.1. Les évaluations en laboratoire sur *A. aegypti*, *C. quinquefasciatus* et *A. gambiae*

##### *Méthodologie*

Le principe des tests d'efficacité de ces substances reste globalement le même que pour les larvicides habituels si ce n'est que le contact de la larve avec l'insecticide reste permanent jusqu'à l'émergence des imagos, au lieu de durer de 24 à 48 heures. La mortalité générale totalise la mortalité larvaire mais aussi la mortalité nymphale et imaginale. Lorsque dans les témoins la mortalité est comprise entre 5 et 20 %, les mortalités observées dans les différentes concentrations en insecticide sont corrigées par la formule d'Abbot (OMS, 1963).

Pour les tests ovicides réalisés sur les pontes d'*A. gambiae*, l'on utilise des œufs qui sont fraîchement déposés la nuit sur un seul pondoir. Des lots de 200 œufs sont comptés puis répartis sur des ronds de papier filtre qui sont ensuite immergés dans différentes concentrations en inhibiteurs de développement. Pendant toute la durée de l'essai qui dure 72 heures, le nombre d'œufs éclos dans chaque concentration est compté puis comparé au nombre éclos dans les témoins.

Enfin, la réduction de la fertilité des femelles et la mise en évidence des effets tératogènes sont observées sur *A. aegypti*. Pour ce faire les essais sont réalisés avec des larves de stade 2 exposées à des concentrations sublétales d'inhibiteurs. Les nymphes issues des larves témoins et traitées sont ensuite mises à éclore en insectarium. Les adultes émergents s'accouplent et les femelles reçoivent en deux jours quatre repas de sang sur lapin. Pour compter avec précision le nombre d'œufs pondus par chacun des lots de moustiques, il faut sélectionner pour chaque essai, témoin et traité, un nombre précis de femelles gorgées que l'on isole dans une autre cage. On rajoute à ces femelles autant de mâles (issus des mêmes lots) pour donner à l'accouplement ses chances optimales. On dispose alors à l'intérieur des cages des pondeurs dont la paroi intérieure est recouverte de papier filtre blanc. Les femelles gravides déposent leurs œufs sur le papier, lesquels sont dénombrés quotidiennement. Un lot de pontes choisi au hasard est mis à éclore et 72 heures après, le nombre d'œufs éclos est comparé au nombre initialement déposé sur le papier (pourcentage d'éclosion des œufs). Parallèlement à cette manipulation, on note la proportion de moustiques mâles et femelles qui présente des malformations morphologiques.

### Résultats

Les tests montrent que les inhibiteurs de développement possèdent une forte activité larvicide à des concentrations très faibles (tableau 3). Pour donner un ordre de grandeur de leur efficacité, la limite supérieure de la CL 100 la plus élevée observée sur *A. gambiae* a été de 0,031 mg/l d'OMS-3007. Les limites supérieures des CL 100 les plus faibles ont été observées sur *A. aegypti* avec l'OMS-3009 à la concentration de 0,0004 mg/l et sur *C. quinquefasciatus* avec l'OMS-3031 à la concentration de 0,0005 mg/l.

En plus de leur action sur les larves, les inhibiteurs de croissance agissent aussi sur le développement embryonnaire des œufs. Cette action dite ovicide se révèle plus ou moins importante selon la nature et la concentration en inhibiteur (tableau 4). Parmi les effets ovicides faibles, nous avons observé avec l'OMS-3009 une réduction des pourcentages d'éclosion des œufs qui par rapport au témoin chute de - 12,4 % à 0,5 mg/l et - 33,5 % à 2 mg/l. Avec l'OMS-3007, ces deux mêmes concentrations entraînent des baisses d'éclosion de respectivement - 13,9 % et - 65,7 %. Mais c'est avec l'OMS-2015 que cette action ovicide est de loin la plus performante, avec des réductions de - 84,5 % à 0,5 mg/l et - 99,7 % à 2 mg/l. Le diflubenzuron, un autre inhibiteur de type ecdysoïde a montré lui aussi une action ovicide remarquable avec une réduction de - 50 % de l'éclosion des œufs d'*A. caspius* et de *C. pipiens pipiens* à la dose de 0,05 mg/l (Sinègre *et al.*, 1980).

Parmi ces quatre inhibiteurs, il a été constaté pour deux d'entre eux, l'OMS-2015 et l'OMS-3031, un effet retard sur les adultes. Ces effets

affectent la fécondité des femelles (tableau 5), très certainement aussi celle des mâles et entraînent des altérations morphologiques létales. A la concentration de 0,00016 mg/l d'OMS-2015, la baisse de la fertilité des femelles est faible (- 9 %) mais le pourcentage d'éclosion des œufs pondus est passé de 90,5 % dans le témoin à 80,1 % pour les femelles traitées. A la dose de 0,0001 mg/l d'OMS-3031, on enregistre cette fois une véritable réduction de la fertilité puisque le nombre d'œufs pondus chute de 64 % par rapport au témoin. Il faut également ajouter à cette baisse de la fertilité une réduction notable du pourcentage d'éclosion des œufs, qui de 90,8 % dans le témoin passe à 82,4 % dans le lot traité.

Pour les adultes non viables, ils se caractérisent par une malformation des pattes postérieures qui, pour les cas les plus graves, empêchent l'adulte de se libérer de son exuvie nymphale. Après avoir soigneusement dégagé l'extrémité des pattes postérieures de l'exuvie, on constate que les trois derniers segments (tarses 3, 4 et 5) forment un coude accentué (photo n° 13). Malgré ces malformations, un nombre important de moustiques mâles et femelles réussissent quand même à prendre leur envol mais la position aberrante des pattes par rapport à l'axe du corps perturbe sérieusement la démarche, le vol et l'alimentation sanguine des moustiques.

Au cours d'une évaluation similaire sur *C. quinquefasciatus*, l'OMS-3031 dosé à 0,00047 mg/l a permis de mettre en évidence une action sur la longévité et la fécondité des femelles. Il a été observé qu'après la prise de 4 repas de sang, seulement 13 % des femelles traitées pouvaient pondre, contre 49 % dans le témoin. Des effets tératogènes affectant les pattes et les ailes des imagos ont également été décelés. Un autre inhibiteur de croissance, celui-ci de type juvénoïde, l'OMS-3010 (phénoxy-carbamate) entraîne à la dose sublétales 80 la formation d'individus chimériques larves-nymphes non viables. Ce juvénoïde agit aussi sur la longévité, le comportement trophique et la fécondité des adultes. Les femelles ne pouvant en effet que difficilement se nourrir, le cycle gonotrophique totalement dépendant de cette prise alimentaire ne peut aboutir à la maturation des ovaires (Lochouarn, 1990).

#### 4.2.1.2. Les évaluations en puisards contre *C. quinquefasciatus*

##### *Méthodologie*

Si les tests de sensibilité et autres études réalisés en laboratoire permettent de mieux cibler l'activité générale des inhibiteurs de développement sur les larves et les adultes de moustiques, les essais effectués sur le terrain permettent de suivre le comportement de ces produits dans des conditions naturelles. Les expérimentations sont faites dans des puisards de taille et de volume à peu près comparables (1 m à 1,5 m de profondeur ; 0,80 à 1 m de diamètre). Chaque concentration exprimée en mg de matière active par litre est testée simultanément dans deux puisards. Nous ne rete-

nons pas de gîte témoin car les travaux ont montré que la meilleure méthode consiste à considérer chaque puisard comme son propre témoin. Les données de référence sur la population préimaginale du gîte sont en effet fournies par un échantillonnage préliminaire par un dipping (cinq coups de louche) réalisé juste avant le traitement. Le matériel biologique prélevé est répertorié en trois groupes préimaginaux : larves de stade 1-2, larves de stade 3-4 et nymphes. Une fois le comptage des trois classes terminées, les populations préimaginale sont restituées dans leur puisard respectif. Les dippings sont répétés selon la même méthodologie le jour suivant le traitement puis une à deux fois par semaine pendant toute la durée de l'évaluation. Si les dippings permettent de vérifier sur le terrain la présence ou non de larves et de nymphes, le prélèvement hebdomadaire des eaux fournit des informations sur l'activité réelle de l'inhibiteur dans le temps. Les eaux traitées sont toujours suivies par rapport à une eau témoin mais différemment selon la nature de l'inhibiteur.

Pour les ecdysoïdes, 25 larves de stades 2 de *C. quinquefasciatus* sont mises en contact avec les eaux traitées puis contrôlées régulièrement jusqu'à la mortalité totale des larves ou au contraire la dernière émergence imaginale.

Pour le juvénoïde, on place dans l'eau traitée 25 nymphes de *C. quinquefasciatus* issues de leurs puisards respectifs. Le test se poursuit jusqu'à la mortalité totale des nymphes ou jusqu'à la dernière émergence imaginale.

Les essais biologiques permettent donc de vérifier les informations recueillies sur le terrain mais surtout, ils définissent le laps de temps après le traitement à partir duquel les premières larves arrivent à se développer jusqu'à la nymphe puis l'émergence imaginale.

### Résultats

Aux doses de 0,5 et 1 mg/l d'OMS-2015 dans les puisards, la rémanence s'étend sur 3 à 5 semaines. Avec l'OMS-3009 utilisé à 0,5 mg/l, les gîtes sont restés totalement improductifs en nymphes pendant 4 à 5 semaines. Une étude particulière a été réalisée avec l'OMS-3031 avec des concentrations qui ont été testées en fonction de la surface et du volume des puisards. Ainsi à la concentration de 0,2 mg/m<sup>2</sup>, les nymphes n'ont disparu des gîtes que pendant une semaine alors qu'à 0,2 mg/l, la fraction nymphale s'est reconstituée dans le courant de la 13<sup>e</sup> semaine après le traitement. Le traitement des puisards avec ces trois ecdysoïdes n'a jamais éliminé les larves de stade 1 et 2. Ce phénomène s'explique par un apport constant en œufs par les femelles gravides dont l'oviposition n'est pas repoussée, ni perturbée par le traitement des gîtes. Par contre l'action larvicide inhibe radicalement la croissance des jeunes larves ce qui, au bout de quelques jours, se traduit par un faible nombre ou une absence totale de nymphes. Avec l'OMS-3007, la concentration de 0,5 mg/l n'a jamais entraîné la disparition des larves et des nymphes dans

les gîtes. Ces résultats sont normaux étant donné le mode d'action des juvénoïdes.

La présence de nymphes dans les gîtes fournit le premier indice sur la fin d'activité des ecdysoïdes mais pas des juvénoïdes. Reste donc à déterminer en laboratoire à partir de quand les larves ou les nymphes engendrent des imagos morphologiquement viables. Pour les ecdysoïdes, les premières émergences en laboratoire coïncident, à une semaine près, avec l'apparition des nymphes dans les puisards. Cependant, dans les eaux traitées à l'OMS-3031, on a remarqué sur *C. quinquefasciatus*, des malformations au niveau des pattes postérieures identiques à celles que nous avons observé sur *A. aegypti*. Pour le juvénoïde OMS-3007, les nymphes ont donné des adultes à partir de la 2<sup>e</sup> semaine après le traitement.

Il est maintenant possible de sélectionner, malgré la bonne efficacité de l'OMS-2015 et de l'OMS-3009, l'OMS-3031 qui, dosé à 0,2 mg/l, entraîne une efficacité totale pendant plus de 3 mois. Un autre ecdysoïde, le diflubenzuron (OMS-1804) est resté actif pendant 1 mois à la dose de 1 mg/l (Sales et Hervy, 1977). Avec 2 semaines de rémanence seulement, l'OMS-3007 présente une efficacité limitée dans les gîtes à *C. quinquefasciatus*.

#### 4.2.1.3. Les évaluations en mares artificielles contre *A. gambiae*

##### *Méthodologie*

Les évaluations sur *A. gambiae* s.l se déroulent dans des mares artificielles de 0,50 m de côté et de 0,30 m de profondeur. Les parois des gîtes sont cimentées et entourées d'une margelle de 0,10 à 0,15 m de hauteur pour les protéger des eaux de ruissellement (photo n° 14).

L'ensemble des mares artificielles sont localisées dans la banlieue est de Bobo-Dioulasso où la densité anophélienne est saisonnièrement élevée. Les gîtes se trouvent localisés sur une des rives d'un cours d'eau qui ne coule qu'en saison des pluies (photo n° 15). Les mares se remplissent naturellement avec les eaux de pluies et deviennent positives en larves d'*A. gambiae* vers la mi-juillet. Pour chaque larvicide testé, deux mares sont utilisées par concentration (mg/l) alors que deux mares non traitées servent de témoins.

Le protocole de suivi sur le terrain par la méthode du dipping avant et après le traitement est identique à celui utilisé pour *C. quinquefasciatus* dans les puisards. La recherche en laboratoire de l'activité insecticide des eaux de mares traitées reste également le même que pour les puisards, si ce n'est que pour le juvénoïde, l'on ne prélève pas les nymphes des gîtes pour suivre la rémanence. Les concentrations larvaires et nymphales d'*A. gambiae* dans les mares étant en effet bien inférieures aux densités de *C. quinquefasciatus* dans les puisards, il n'est pas possible de recueillir de matériel biologique sans modifier sévèrement la composition préimagi-

naïve des populations naturelles. Les tests biologiques sont alors réalisés avec des larves de stade 2 provenant de notre insectarium.

### Résultats

Les évaluations sur *A. gambiae* ont concerné seulement trois inhibiteurs de croissance, l'OMS-2015, l'OMS-3009 et l'OMS-3007.

Aux concentrations de 0,5 et 1 mg/l d'OMS-2015, les premières nymphes sont apparues dans les mares 7 semaines après le traitement. L'OMS-3009 a rendu les gîtes totalement improductifs en nymphes pendant 4 semaines à 0,5 mg/l et 6 semaines à 1 mg/l. Pour l'OMS-3007, les doses de 0,5 et 1 mg/l n'ont jamais fait disparaître les populations larvaires mais par contre la fraction nymphale apparaissait puis disparaissait épisodiquement, témoignant une nouvelle fois de l'activité spécifique de ces larvicides sur les nymphes.

Pour l'OMS-2015 et l'OMS-3009, les émergences en laboratoire ont toujours eu lieu 1 à 2 semaines avant l'apparition des nymphes dans les mares. Cette constatation s'explique par le fait qu'au moment du dipping, il y avait dans les gîtes une composition préimaginale qui comprenait des larves mais pas de nymphe. Les populations larvaires et nymphales des anophèles demeurent en effet, contrairement à celles de *C. quinquefasciatus*, largement disséminées dans le milieu naturel et donc d'une densité beaucoup moins importante au sein d'un même gîte. Cette bioécologie particulière se traduit par des collections d'eau pourvues de populations préimaginale clairsemées qui ne sont pas toujours très fiables pour l'évaluation d'une rémanence. Les tests en laboratoire permettent donc de cerner plus précisément le temps d'activité de ces deux ecdysoïdes à environ 1 mois aux doses de 0,5 et 1 mg/l.

Aux mêmes concentrations, l'OMS-3007 possède une rémanence de 2 à 3 semaines.

#### 4.2.1.4. L'avenir des inhibiteurs de croissance

Le principe de la lutte antivectorielle, telle qu'elle se conçoit de nos jours, s'oriente vers des insecticides toujours plus sélectifs afin de ne pas nuire à l'environnement. A cet égard, les inhibiteurs de développement des insectes semblaient les plus aptes à répondre à l'exigence de cette méthode. En laboratoire, les effets secondaires se montrèrent d'autant plus intéressants que l'action de ces insecticides dépasse le cadre du contrôle des populations préimaginale, en influant directement sur la viabilité et la fécondité des populations émergentes. Au niveau des effets tératogènes, même s'ils ne sont pas létaux, l'imago manifeste de sérieuses perturbations dans ses déplacements, son accouplement et son alimentation sanguine. Ce sont même très certainement ces anomalies morphologiques et physiologiques qui empêchent le moustique d'évoluer normalement et qui nuisent à la maturité sexuelle des imagos. Pourtant, on peut constater que

leur grande rémanence associée à des doses de traitement très faibles n'ont pas été des critères suffisants pour retenir ces produits sur le marché des insecticides utilisables en santé publique. Les organismes de démons-tration exigent en effet comme principale caractéristique des larvicides une action rapide permettant d'évaluer au plus vite les opérations de traitements. Or, dans l'ensemble, les inhibiteurs de développement n'agissent que très lentement en dépit de leur efficacité. On ne peut effectivement déceler l'action des ecdysoïdes que trois à cinq jours après le traitement. Pour les juvénoïdes qui se caractérisent par une action quasi sélective sur les larves de stade 4 et les nymphes, il devient même impossible d'évaluer leur action sans recourir à des tests biologiques en laboratoire. Efficaces dans l'absolu, les inhibiteurs ne sont donc que très peu utilisés comme larvicides anti-moustiques car l'échec des traitements ne se ferait sentir que beaucoup trop tardivement et rendrait de ce fait tout effort de lutte particulièrement onéreux et aléatoire.

Les résultats enregistrés auraient quand même dû encourager l'emploi de ces substances contre les moustiques. Des traitements à base d'OMS-3031 rendent les gîtes à *C. quinquefasciatus* totalement improductifs en adultes pendant plus de 3 mois. Pour lutter contre *A. gambiae*, des opérations de traitements avec l'OMS-2015 et l'OMS-3009 auraient permis d'envisager dans certains contextes bien particuliers, tels que les plans d'eaux marécageux, les étangs et les rizières, un contrôle efficace des populations préimaginales de ce vecteur.

Si les évaluations ont prouvé la grande efficacité des inhibiteurs sur les moustiques, la recherche expérimentale se penchait déjà sur les nouvelles possibilités de la lutte biologique. Les larvicides biologiques d'origine bactérienne montrèrent très vite qu'ils étaient virulents sur les larves de moustiques, non polluants pour le milieu et d'une totale innocuité pour l'homme.

#### 4.2.2. L'évaluation d'un larvicide biologique à Maroua

Nous avons vu avec l'exemple des inhibiteurs de développement des insectes que les évaluations en laboratoire et à échelle réduite sur le terrain déterminent la sensibilité des moustiques aux larvicides mais aussi la stabilité de ces molécules dans les milieux naturels. Ce protocole généralement admis pour les insecticides chimiques est également celui qui est utilisé pour l'évaluation des larvicides biologiques. La toxicité élevée des cristaux de *B. thuringiensis* var *israelensis* sur les larves de similies fit de ce biolarvicide, l'un des insecticides majeurs de la lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest. De même les résultats prometteurs de *B. sphaericus* sur les populations larvaires de *C. quinquefasciatus* amenèrent la recherche expérimentale à passer des évaluations à petite échelle

et des traitements de gîtes pilotes au stade des évaluations à grande échelle. Cette phase ultime de la recherche ne concerne que peu d'insecticides et l'exemple de *B. sphaericus* sur *C. quinquefasciatus* dans la ville de Maroua s'est montrée une expérience enrichissante qui a beaucoup apporté au concept de la lutte contre les moustiques.

#### 4.2.2.1. Quelques rappels sur les évaluations de *B. thuringiensis* et de *B. sphaericus*

Le nombre des évaluations réalisées avec ces deux bactéries est si élevé qu'il serait difficile d'en rendre compte de manière exhaustive.

*B. thuringiensis* var *israelensis* a été la première bactérie sporulée à être utilisée dans la lutte contre les moustiques. Bien que les essais en laboratoire aient montré sa grande toxicité à l'encontre des larves d'*Aedes* et de *Culex*, les résultats observés dans les milieux naturels d'Afrique tropicale se sont révélés quant à eux beaucoup moins prometteurs. Avec la formulation Tecknar® qui se compose d'une suspension concentrée des cristaux pathogènes, les rémanences dans les gîtes à *C. quinquefasciatus* et à *A. gambiae* n'ont jamais dépassé 5 jours (Hougard *et al.*, 1983). Cette durée correspond en fait au temps de sédimentation des toxines au-delà duquel la matière active s'enlise dans le substrat et devient inaccessible aux larves de ces moustiques dont la zone de nutrition affleure la surface des gîtes. Un traitement à grande échelle s'avère dans ces conditions totalement irréalisable, tant au point de vue coût (utilisation de grandes quantités) qu'au point de vue logistique (fréquence des traitements trop rapprochée). L'évaluation de cette même formulation sur les larves d'*A. aegypti* vivant dans les lieux de stockage d'eau de boisson ne permet pas non plus d'envisager une utilisation rationnelle de ce larvicide. Dans les jarres traitées à des doses comprises entre 1 et 5 mg/l, les jeunes larves réapparaissent une semaine après le traitement. Il faut préciser qu'à chaque remplissage des récipients, le mouvement des eaux remet le larvicide en suspension. Les toxines deviennent alors inaccessibles aux larves d'*A. aegypti* dont la zone de nutrition se situe, à l'inverse des deux autres genres, au fond des gîtes (Hougard *et al.*, 1985a).

*B. thuringiensis* s'avère donc sous sa forme de suspension concentrée, non applicable à des programmes de lutte contre les moustiques. Pour *C. quinquefasciatus* et *A. gambiae*, c'est la sédimentation rapide des toxines qui diminue leur rémanence alors que pour *A. aegypti*, c'est au contraire leur remise en suspension qui limite leur efficacité. La dynamique de cette formulation au sein des milieux naturels est chaque fois inverse aux comportements trophiques des populations préimaginales visées. Cependant, compte tenu de la grande stabilité des toxines dans les conditions de stockage en milieu tropical (Guillet *et al.*, 1982) et de sa totale innocuité pour les mammifères (de Barjac *et al.*, 1980), de nouvelles formulations ont été fabriquées allant des briquettes, aux suspen-

sions concentrées améliorées, à la poudre mouillable et aux granulés (Bactimos®). La formulation briquette spécialement adaptée pour le traitement des petits gîtes larvaires comme les mares, les puisards, les vasques et les citernes, libère progressivement les toxines de *B. thuringiensis*. Les autres formulations ne sont actuellement utilisées que dans les écosystèmes fragiles où la protection de l'environnement prime sur l'efficacité et la rentabilité du larvicide.

*B. sphaericus* comprend plusieurs souches très toxiques sur les larves de *Culex* et d'*Anopheles* mais peu pathogènes pour les larves d'*Aedes* (Dagnogo et Coz, 1972; Mulla *et al.*, 1984). La souche 1593 isolée en Indonésie puis testée dans les puisards contre *C. quinquefasciatus* à la dose de 10 g/m<sup>2</sup> reste active pendant 3 à 4 semaines (Hougard *et al.*, 1985b). La découverte de la souche 2362 au Nigeria s'est rapidement imposée comme l'isolat le plus toxique envers les larves de moustiques. Son évaluation dans les puisards à la dose de 10 g/m<sup>2</sup> entraîne une disparition des larves de stade 3-4 et des nymphes pendant 5 à 6 semaines (Nicolas *et al.*, 1987a), soit, à dose comparable, une rémanence de plus de deux semaines par rapport à la souche 1593. Le suivi de *B. sphaericus* dans les larves révèle que les spores germent pendant la phase d'intoxication mais que la multiplication végétative ainsi que la formation des nouvelles spores s'opèrent exclusivement dans les larves mortes. 72 heures après leur ingestion, le nombre de spores évolue pour une larve de 5.10<sup>2</sup>-1.10<sup>3</sup> spores avalées à 5.10<sup>4</sup>-5.10<sup>5</sup> spores recyclées, soit un gain de spores 50 à 1 000 fois plus important que la quantité de spores ingérées (Nicolas, 1986). Cette régénération ne prolonge cependant pas la rémanence du larvicide car les spores formées dans les larves mortes sédimentent puis s'enlisent dans le substrat en même temps que les cadavres porteurs. La zone de nutrition de *C. quinquefasciatus* se trouvant proche de la surface des eaux, le recyclage de *B. sphaericus* n'apporte donc que relativement peu d'intérêt dans les gîtes profonds et dénués de mouvements d'eau.

Sur *A. gambiae*, les spores de *B. sphaericus* n'ont montré qu'une efficacité limitée puisque à la concentration de 10 g/m<sup>2</sup>, la rémanence n'a été que de 10 à 15 jours. Cette faible activité dans les gîtes à anophèles est en grande partie liée à la forte exposition de ces plans d'eau au soleil et de la destruction des spores par les rayons solaires (Nicolas *et al.*, 1987b).

Les résultats et les observations accumulés au fil de toutes ces évaluations ont montré la grande sensibilité de *C. quinquefasciatus* à ces toxines. De même, la remarquable stabilité des spores en eaux polluées font de ce bacille un candidat prometteur pour le contrôle des populations préimaginales de ce moustique, notamment dans les lieux où il transmet la filariose de Bancroft et où il a développé des résistances aux insecticides chimiques. A ce titre, le Département Biologie et Contrôle des Vecteurs de l'OMS s'était fixé comme priorité, l'évaluation à grande échelle de

*B. sphaericus* afin d'apprécier ses véritables possibilités d'utilisation dans un contexte de lutte intégrée en milieu urbain.

#### 4.2.2.2. *B. sphaericus* contre *C. quinquefasciatus* et *A. gambiae* à Maroua

La ville de Maroua est la capitale de l'extrême-nord du Cameroun. Bâtie le long d'une rivière (Mayo Kaliao) dont les eaux ne coulent qu'en saison des pluies, cette cité de 130 000 habitants constitue un milieu « insulaire » particulièrement intéressant du fait de son isolement par rapport aux autres villes (la plus proche étant Mora, 5 000 habitants, située à 60 km vers le nord) mais aussi sa franche délimitation imposée par les montagnes et les cours d'eau environnants (photo n° 16). La végétation urbaine principalement constituée d'un arbre appelé Neem (*Azadirachta indica*) borde toutes les grandes artères et les ruelles de la ville. La savane limitrophe est de type soudanien avec une saison sèche qui s'étend de octobre à avril et une saison pluvieuse de mai à septembre. La moyenne pluviométrique se chiffre à 800 mm par an (Olivry, 1986).

Les habitants de Maroua se sont toujours plaints de la nuisance occasionnée par *C. quinquefasciatus*. Cependant, comme pour la plupart des villes de moyenne et de grande importance en Afrique tropicale, aucune campagne de démoustication n'est entreprise faute de moyens et de matériel. De plus le choix des insecticides est particulièrement complexe en milieu urbain. Il ne faut pas que les larvicides employés polluent les nappes phréatiques qui alimentent les puits et les eaux de surface propres à la consommation des hommes et des animaux domestiques. Il faut également proscrire les insecticides chimiques auxquels *C. quinquefasciatus* est devenu résistant. En matière de lutte biologique, une première grande évaluation des potentialités de *B. sphaericus* a été réalisée sur 200 hectares de la ville de Yaoundé dans le sud-Cameroun et a confirmé l'efficacité de ce produit (Hougard *et al.*, 1993 a). Restait alors dans la logique expérimentale à traiter une ville toute entière et Maroua fut choisie pour sa situation « d'îlot urbain » au milieu de la savane et donc, de son éloignement des sources potentielles de réinvasions culicidiennes (Hougard *et al.*, 1993 b).

L'année 1991 servit d'année témoin au cours de laquelle des captures furent réalisées dans plusieurs points de la ville. Ces captures ont été effectuées tous les mois pendant 4 nuits consécutives, par seize captureurs répartis dans huit quartiers différents. Leur rôle était d'emprisonner dans un tube en verre tous les moustiques qui se posaient sur eux avant qu'ils ne piquent. Après chaque séance de capture, il était procédé à l'identification et au comptage de la récolte. Cette enquête enseigna dans un premier temps la dynamique naturelle des populations de *C. quinque-*

*fasciatus* et d'*A. gambiae* mais surtout, quel pourrait être l'impact de la future campagne de traitement sur ces deux moustiques.

Cette campagne reposait sur l'idée qu'un traitement réalisé en fin de saison sèche ne concernerait qu'un nombre limité de gîtes puisque à cette époque de l'année, la dernière pluie remonte généralement à plus de cinq mois. La conséquence directe de cette sécheresse se traduit par une faible densité en gîtes larvaires et de très faibles densités de moustiques.

Dans la zone forestière du Cameroun, l'humidité relative et la pluviométrie plus importantes entretiennent une dynamique culicidienne plus homogène. Une évaluation suivie dans plusieurs quartiers de la ville de Yaoundé a montré que la persistance de *B. sphaericus* pulvérisé dans les gîtes à la dose de 10 g/m<sup>2</sup> était égale à trois mois (Hougard *et al.*, 1993 a).

Dans un environnement aussi défavorable que la saison sèche en savane, une femelle de *C. quinquefasciatus* vit environ trois semaines. Puisque l'activité de *B. sphaericus* en milieu équatorial se chiffre à trois mois, il était permis de penser qu'elle serait au moins égale en zone de savane. Trois mois de rémanence contre trois semaines de survie de l'insecte, l'activité larvicide dépasse largement l'espérance de vie du moustique d'où, la déduction logique qu'au terme de la troisième à quatrième semaines après le traitement, il n'y aurait théoriquement plus de femelle survivante pour pondre dans les gîtes.

Au cours du traitement réalisé entre février et mars 1992, 48 personnes réparties en plusieurs équipes ont sillonné la ville, concession par concession pour localiser puis traiter à la dose de 10 g/m<sup>2</sup>, l'ensemble des gîtes potentiels et productifs en larves de moustiques. Gigantesque entreprise puisque 18 000 maisons ont été visitées et le traitement a nécessité plus de mille litres de suspension concentrée en spores de *B. sphaericus* (sphérimos®) pulvérisés dans 27 000 puisards, latrines, caniveaux, flaques et autres multiples réservoirs d'eaux polluées. Force nous a été de constater que même en fin de saison sèche, le nombre de gîtes reste extrêmement élevé. En plus des traditionnels puisards, latrines et caniveaux où *C. quinquefasciatus* pullule la plupart de l'année, il existe des gîtes résultant du mauvais entretien du réseau d'eau urbain dont les fuites bien souvent importantes se déversent dans la rue. De plus, la proximité du mayo et la résurgence des eaux de surface font que certains quartiers sont parsemés de flaques plus ou moins étendues que *C. quinquefasciatus* et *A. gambiae* se partagent suivant le degré de pollution des eaux.

Les captures effectuées les mois suivant le traitement ont permis de mettre en évidence par rapport à l'année témoin, l'impact réel de la campagne de démoustication.

L'impact du traitement sur les populations imaginales de *C. quinquefasciatus* s'est fait sentir rapidement puisque dès la fin des opérations, c'est-à-dire en mars 1992, le nombre de piqûres par homme et par nuit

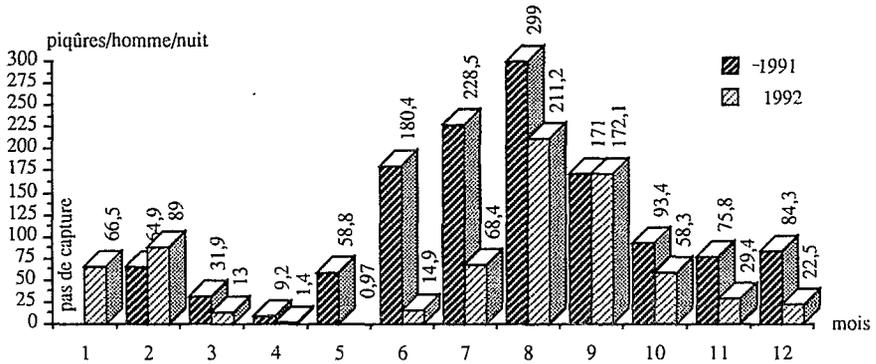


Figure 22

**Nombre de piqûres de *C. quinquefasciatus* par homme et par nuit recensé dans la ville de Maroua avant (1991) et après le traitement (1992) des gîtes larvaires avec *B. sphaericus***

était déjà réduit de 2,5 fois par rapport au même mois de l'année témoin. Deux mois après le traitement (mai 1992), les habitants de Maroua n'accusaient plus qu'une piqûre par nuit alors qu'en mai 1991, ces mêmes personnes étaient piquées près de 60 fois dans la nuit. Le traitement est resté réellement efficace jusqu'en juillet 1992 puisqu'au cours de ce mois, le nombre de piqûres était encore réduit de 3 fois. C'est seulement à partir du mois d'août 1992 que les populations préimaginales de *C. quinquefasciatus* se sont normalement reconstituées. Les captures ont montré que par rapport à l'année précédente, le nombre de piqûres par homme et par nuit n'était plus que 1,4 fois plus faible en août et revenu à un niveau initial le mois suivant. La saison pluvieuse demeure la cause principale de cette reconstitution culicidienne car les pluies diluent ou même éliminent la fraction larvicide encore active dans les gîtes mais surtout elles créent de nouveaux plans d'eau dans la ville. De plus, le repeuplement massif des gîtes pendant la saison des pluies laisse à penser que les populations imaginales de ce moustique étaient encore suffisamment importantes pour entamer une aussi rapide recolonisation de la ville. Malgré la grande vigilance apportée au traitement, il est évident que les opérateurs n'ont pas pu ne pas oublier certains gîtes difficilement repérables. De plus, la répartition des gîtes n'est pas figée, des plans d'eaux nouveaux se créent et disparaissent chaque jour au gré des pluies et du relief. La rémanence aussi, les spores de *B. sphaericus* dans les gîtes de plein soleil sont actives bien moins longtemps que dans les gîtes fermés. C'est l'ensemble de tous ces paramètres difficilement contrôlables qui est à la base de la recolonisation. Ces informations nous démontrent les capacités de survie exceptionnelle de *C. quinquefasciatus* mais surtout elle nous enseigne qu'une

stratégie de lutte ne doit pas reposer sur un traitement unique mais sur un ensemble de traitements judicieusement répartis dans le temps.

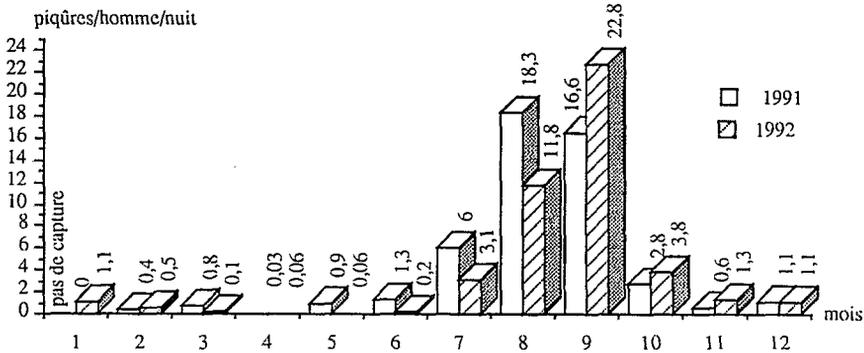


Figure 23

**Nombre de piqûres d'*A. gambiae* par homme et par nuit recensé dans la ville de Maroua avant (1991) et après le traitement (1992) des gîtes larvaires avec *B. sphaericus***

Le traitement de la ville de Maroua a eu également un impact non négligeable sur les populations d'*A. gambiae*. Les écarts les plus frappants ont été perçus en mars 1992 avec 8 fois moins de piqûres que le même mois de l'année précédente. De même en mai 1992, cette différence s'est chiffrée à 15 fois moins, en juin à 6,5 fois moins et enfin en juillet à 2 fois moins. Comme pour *C. quinquefasciatus*, les effectifs d'*A. gambiae* sont redevenus comparables sinon supérieurs à l'année témoin dans le courant du mois d'août 1992. Il est tout de même intéressant de constater que malgré la moindre sensibilité des larves d'*A. gambiae* aux toxines de *B. sphaericus*, le traitement de la ville de Maroua n'en a pas moins provoqué une forte réduction des effectifs pendant 4 mois.

#### 4.2.3. L'utilisation rationnelle des larvicides chimiques et biologiques

Les évaluations de larvicides chimiques et biologiques dans des contextes écologiques variés ont permis de sélectionner les composés les plus actifs sur les populations préimaginales de moustiques. Cependant, la bonne activité d'un larvicide n'est pas un atout suffisant à la réussite d'une campagne de lutte. Il faut d'abord prendre en compte l'écologie, le comportement et les préférences trophiques des larves de moustiques à combattre afin d'y adapter un système de lutte approprié. L'emploi des inhibiteurs de développement associé au *B. sphaericus* pourrait faire l'objet d'une évaluation conjointe dans le cadre d'un programme de lutte intégrée contre *C. quinquefasciatus* en milieu urbain. Le pouvoir pathogène à la

fois important et rapide des toxines de *B. sphaericus* engendrerait l'effet tant recherché de la mortalité des larves après 48 heures et l'excellente rémanence des inhibiteurs de développement soutiendrait dans les gîtes une activité larvicide comprise entre 1 et 3 mois. L'emploi des inhibiteurs dans certains milieux naturels tels que les plans d'eau aménagés, les rizières, les étangs et les marécages constituerait également un bon moyen de contrôle des populations anophéliennes vectrices de paludisme. Un programme de lutte intégrée dirigée dans l'île de Funafuti au nord des Fidji contre *A. aegypti* combinait l'utilisation de *B. thuringiensis* var *israelensis* avec deux autres larvicides de synthèse, un inhibiteur de croissance de type juvénoïde, le méthoprène, et un insecticide de la famille des carbamates (Lacey, 1985). Dans un domaine autre que celui des moustiques mais tout aussi primordial en matière de santé publique, le programme de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest traitait 50 000 km de cours d'eau répartis sur une aire de 1 300 000 km<sup>2</sup> et utilisait près de 300 000 litres de *B.t.i.* par an, ce qui représentait environ 50 % des quantités insecticides déversées, les autres 50 % étant représentés par trois organophosphorés, un pyréthrianoïde et un carbamate (Hougard et Back, 1992 b).

Dans certains contextes bien particuliers, les larvicides biologiques peuvent donc s'associer efficacement à l'activité des larvicides chimiques. L'évaluation des nouveaux insecticides dont l'Organisation Mondiale de la Santé assurait le financement au cours des années 1960 à 1990, se retrouve de nos jours dans une situation critique. Les nouveaux insecticides sont de plus en plus difficiles à découvrir et ne passent bien souvent plus par le stade des évaluations sur le terrain, faute de crédits. Cet état de fait est d'autant plus regrettable qu'en Afrique, les anophèles commencent à devenir de plus en plus résistants aux pyréthrianoïdes de synthèse (Elissa *et al.*, 1993). De même, une souche de *C. quinquefasciatus* sélectionnée en laboratoire a réussi à développer en 12 générations seulement une résistance 100 000 fois plus importante à la toxine de *B. sphaericus* souche 2362 (Georghiou, 1992). Devant une telle explosion de résistances, il ne faudrait pas supprimer l'évaluation des nouveaux insecticides mais au contraire l'intensifier. De gros efforts devraient être également consentis pour la recherche de nouveaux pathogènes d'insectes et de substances naturelles d'origines animale et végétale. Des travaux sont déjà réalisés en ce sens mais encore, faudrait-il dès à présent connaître leur efficacité réelle au sein des milieux naturels.

### 4.3. Les insecticides de demain

En amont de l'évaluation des insecticides en laboratoire et sur le terrain se situe un secteur de la recherche qui s'intéresse à la découverte de nouveaux produits. Ce domaine se développe d'ailleurs de plus en plus car il ne se limite pas seulement aux insecticides de synthèse. Dans un premier temps, la découverte de nouveaux pathogènes d'insectes avait amené les chercheurs à prospecter plus en profondeur les ressources naturelles. Ainsi des substances extraites de plantes et d'animaux ont pu révéler des propriétés intéressantes que les chimistes se sont empressés d'améliorer pour en faire des composés plus actifs et peut-être, pour certains d'entre eux, les insecticides de demain.

#### 4.3.1. La recherche des nouveaux pathogènes d'insectes

Les agents de lutte biologique ont pour les plus réputés été découverts accidentellement, tels *B. thuringiensis* sérotype H 14 isolé en Israël à partir de larves de moustiques mortes et *B. sphaericus* souche 2362 extrait d'une similie adulte au Nigeria. L'intérêt croissant que manifeste la communauté scientifique à l'égard de la lutte biologique a entraîné la mise en place de centres collaborateurs de l'OMS dont les activités se sont centrées sur la recherche, l'isolement et l'identification de nouveaux pathogènes d'insectes. En Afrique intertropicale, cinq centres se sont ouverts sur les territoires du Cameroun, de la Côte-d'Ivoire, du Ghana, du Nigeria et de l'Ouganda. Ces centres se sont intéressés à la recherche d'agents pathogènes des moustiques les plus représentés en Afrique, *C. quinquefasciatus*, *A. gambiae* s.l. et *A. aegypti* dont on pouvait espérer extraire des bactéries, des champignons, des virus et des nématodes parasites.

Les recherches effectuées au centre collaborateur de Yaoundé au Cameroun se sont orientées sur la découverte des bactéries entomopathogènes du genre *Bacillus*. Ce genre s'est en effet révélé particulièrement riche en espèces sporogènes toxiques sur les populations préimaginales de certains diptères (voir § 3.2.5.1). Les isolats bactériens les plus efficaces sont ensuite confiés au laboratoire des bactéries entomopathogènes de l'Institut Pasteur de Paris pour l'identification du bacille puis son enregistrement dans la collection de référence.

Au Cameroun, les 385 prélèvements de larves et de substrat recueillis sur l'ensemble du pays ont permis d'isoler 1 166 bacilles sporogènes dont sept isolats pathogènes pour les larves de moustiques. Les sept bacilles pathogènes se sont révélés être, après examen microscopique et identification biochimique, six souches de *B. sphaericus* et une souche appartenant au complexe *B. circulans*.

Les six souches de *B. sphaericus* ont montré une forte activité larvicide sur *C. quinquefasciatus* et *A. aegypti*. Le premier de cet isolat a été extrait d'une larve de *Culex spp* récoltée dans un plan d'eau pollué à Garoua alors que les cinq autres ont été trouvés dans des larves d'*A. aegypti* et d'*Anopheles spp* récoltées dans le village de Mora, dans l'extrême nord du Cameroun. Ces six souches de même sérotype H5 que la souche 2362 sont très toxiques sur *C. pipiens* (Hougard *et al.*, 1991).

La prospection de la ville de Ngaoundéré, située à une altitude de 1 100 mètres dans la chaîne montagneuse de l'Adamaoua, a permis l'isolement d'une souche de *B. circulans* virulente sur les larves de moustique. Cette bactérie a été extraite d'une larve vivante de *C. quinquefasciatus* prélevée dans un caniveau de la ville. Cet isolat de *B. circulans* serait la toute première souche de cette espèce à manifester une activité pathogène sur les larves de moustiques et mérite par conséquent de figurer sur la liste des nouvelles bactéries entomopathogènes.

A Pondichéry aux Indes, le « Vector Control Research Centre » a découvert deux nouveaux bacilles pathogènes, *B. alvei* et *B. brevis* isolés à partir de larves de moustiques mortes récoltées dans une rizière. Ces deux bacilles se montrent très toxiques sur tous les stades larvaires d'*A. aegypti* et de *C. quinquefasciatus* ainsi que sur les jeunes stades d'*A. stephensi* (Balaraman *et al.*, 1979). De même, le laboratoire des bactéries entomopathogènes de l'Institut Pasteur de Paris a extrait à partir d'un prélèvement de boue provenant de Malaisie, une souche de *C. bifermentans* var *malaysia* active sur les larves de moustiques et de simulies (de Barjac *et al.*, 1990). Il est intéressant de voir dans la découverte de ces nouvelles bactéries, la nature variée et le mode d'action original des toxines. De plus, ces toxines bactériennes se caractérisent par des structures et des compositions moléculaires autrement plus complexes que les insecticides de synthèse. Dans l'avenir, plus grand sera le nombre des toxines connues, plus vaste sera leur champ d'application en tant que bio-larvicides.

Devant la découverte récente de nouvelles bactéries, champignons, virus et autres parasites entomopathogènes, on peut sans nul doute penser qu'il existe dans les milieux naturels des agents qui n'ont pas encore été isolés et qui pourraient être plus performants que ceux déjà connus. La recherche de nouveaux pathogènes d'insectes ne doit pas s'arrêter sous prétexte de la non rentabilité de ce genre de travaux mais au contraire s'intensifier afin d'optimiser leur découverte. C'est pourquoi, plutôt que d'abandonner les investigations comme c'est la tendance actuelle, les organismes internationaux et les sociétés privées devraient s'impliquer davantage afin de faciliter le travail des chercheurs. Tout comme la lutte chimique a besoin d'insecticides nouveaux, la lutte biologique se fonde sur la diversité et la virulence de ses agents. Enrichir l'arsenal des micro-organismes entomopathogènes, c'est aussi contribuer à l'essor et à la

pérennité d'un système de lutte, dont l'utilité et l'efficacité ne sont plus à prouver.

#### 4.3.2. La recherche de nouveaux insecticides d'origine naturelle

Les molécules organiques d'origine végétale dotées d'un effet insecticide sont connues depuis très longtemps. La nicotine, la roténone et les pyrèthes ont été les premiers insecticides naturels à être utilisés contre les insectes ravageurs des cultures mais aussi les insectes nuisants et vecteurs de maladies. L'intérêt porté aux substances naturelles a pris au cours de ces vingt dernières années un essor considérable. Les pyrèthrine extraites du pyrèthe ont toujours servi de « têtes de série » à la fabrication de composés de synthèse dont les propriétés physico-chimiques, l'activité et la stabilité dépassent largement les pouvoirs du produit naturel. Les pyrèthrinoides de synthèse dont l'activité insecticide et la photostabilité se sont révélées bien supérieures aux pyrèthes naturels illustrent parfaitement bien la maîtrise et donc l'intérêt de la chimie organique.

Récemment dérivé de la nicotine, le groupe chimique des nicotinoïdes de synthèse présente un modèle structural unique pouvant amener à la synthèse d'une nouvelle famille d'insecticides. Le mode d'action de ces composés étant des inhibiteurs de l'enzyme acétylcholinestérase, ils pourraient dans les années qui viennent devenir des insecticides précieux pour lutter contre les insectes qui ont développé des résistances aux groupes des organophosphorés et des carbamates (Callec *et al.*, 1985).

De même la molécule d'azadirachtine contenue dans les fruits et les feuilles du neem (*Azadirachta indica*) provoque chez les insectes qui l'absorbent ou subissent son contact des troubles de la nutrition et une inhibition du développement qui aboutissent généralement à la mort. Non toxique sur les vertébrés, l'action de cet insecticide induit aussi des effets tératogènes létaux sur un grand nombre d'insectes (Kumar, 1991). Quand on sait la place privilégiée que détient le neem parmi les essences qui poussent en Afrique tropicale, on pourrait envisager une extraction, même artisanale de l'huile contenue dans les fruits afin de traiter les latrines et les puisards où pullule *C. quinquefasciatus* et bien d'autres diptères néfastes à la santé des hommes. Les tourteaux résultants du broyage des graines de neem sont utilisés dans certains pays pour protéger les cultures contre les termites et autres insectes ravageurs (Maydel, 1983).

Il existe aussi des substances d'origine naturelle qui dans un avenir proche, agrandiront la gamme des inhibiteurs du développement de type ecdysoïde. Il a été découvert que les champignons du genre *Streptomyces* fabriquent une famille d'antibiotiques appelée polyoxines. Parmi ce groupe des polyoxines, se démarque la nikkomicine qui, de par son analogie structurale avec l'Uridine diphosphate N-acétylglucosamine, inhibe

la synthèse de la chitine chez les champignons (Descoin, 1985). l'UDP N-acétylglucosamine sous l'effet de la chitine synthétase se polymérise en une longue chaîne organique pour donner la chitine proprement dite. Ainsi calqué sur le modèle de la nikkomicine, toute une série de nouvelles molécules a été synthétisée et demeure à l'heure actuelle en cours d'évaluation sur les insectes.

Les avermectines aussi produites par *Streptomyces avermitilis* sont des insecticides chers mais remarquablement efficaces. A fortes doses, les avermectines paralysent les insectes et perturbent les échanges hydriques alors qu'à des doses sublétales ces produits provoquent une inhibition de la prise alimentaire, de la fécondation et de l'oviposition (Hassall, 1992).

Le règne animal fournit également des substances insecticides naturelles. Le ver marin *Lumbriconereis heteropoda* élabore une molécule appelée néréistoxine qui s'avère un puissant neurotoxique vis-à-vis des insectes (Sakai, 1964). Son mode d'action principalement centré sur l'inhibition de l'acétylcholinestérase bloque la transmission synaptique au niveau du système nerveux. Un nouvel insecticide de synthèse calqué sur le modèle de la néréistoxine, le cartap®, serait métabolisé chez l'insecte en néréistoxine proprement dite et agirait par conséquent de la même manière.

Tout comme l'isolement des nouvelles bactéries entomopathogènes, la recherche des substances naturelles pourvues d'un effet insecticide a pour objectif de découvrir des molécules nouvelles pouvant apporter une solution aux multiples problèmes causés par les résistances. Généralement précurseurs de nouvelles familles chimiques, ces substances doivent être au moins aussi efficaces que les produits déjà utilisés, tout aussi sélectives pour l'environnement et si possible moins chères à produire. A travers les exemples énumérés ci-dessus, l'on s'aperçoit que la nature est riche en insecticides naturels. Il existe très certainement beaucoup d'autres plantes, microorganismes et invertébrés dont la chimie interne fabrique ce genre de produits. Encore faudrait-il connaître la plante ou l'animal porteur puis isoler ensuite le principe actif. Or l'isolement et l'identification de la matière active, sa synthèse chimique, son évaluation en laboratoire et sur le terrain exigent beaucoup de temps ainsi que des moyens techniques et financiers considérables. De nos jours, rares sont les nouveaux insecticides qui apparaissent sur le marché des pesticides car les industriels n'investissent pas à perte et les molécules les plus prometteuses se doivent de tenir leurs promesses à chaque stade de leur évaluation.

## **Conclusion : la lutte antivectorielle, une somme de connaissances**

Nous venons de constater que les moustiques font partie de ces insectes qui s'adaptent sans difficulté à diverses situations. Pendant longtemps, l'homme a cru maîtriser « son ennemi suceur de sang » en le bombardant d'insecticides qui ont eu, il faut le reconnaître, un impact certain sur la transmission d'endémies majeures telles que le paludisme, mais aussi des effets néfastes sur l'ensemble des écosystèmes traités. Les campagnes extensives de démoustication ont engendré des pressions de sélection très fortes qui sont à l'origine des phénomènes de résistance des vecteurs aux insecticides. Pour remédier au phénomène, il a d'abord fallu augmenter la fréquence des traitements puis les doses appliquées. Les insecticides qui se devaient d'améliorer le confort des sociétés humaines se sont alors révélés toxiques pour l'environnement.

Il existe une telle diversité de prédateurs, d'agents entomopathogènes et, depuis la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, d'insecticides chimiques et biologiques, qu'il est techniquement possible de lutter efficacement contre les moustiques. La lutte antivectorielle ne fait désormais plus appel à une seule technique et intègre une somme de connaissances. Ainsi une campagne de lutte ne se raisonne plus seulement en termes de vecteurs, de nuisances et d'insecticides mais de bioécologie, de capacités vectorielles puis en dernier lieu enfin, du choix des méthodes de lutte chimique, biologique et physique efficaces sans pour autant nuire à l'environnement. Les traitements seront le plus possible localisés, appliqués à même l'habitat humain dans le cas des aspersions intradomiciliaires et des imprégnations de moustiquaires ou au niveau des sites d'émergence des moustiques comme les caniveaux, les flaques et les puisards en milieu urbain ainsi que les rizières, les marais et les abords des lacs en zones rurale et péri-urbaine. Longtemps les hommes ont cru que le concept d'éradication pouvait résoudre le problème des grandes maladies à vecteurs. De nos jours, on ne peut plus ignorer que le choix, la sélectivité, le mode

d'action et d'application d'un insecticide sont déterminants au regard du succès ou de l'échec d'une campagne de lutte.

Les phénomènes naturels de régulation des populations de moustiques ont un rôle important mais n'ont jamais empêché la transmission d'une maladie. En Afrique, la lutte biologique se limite pour le moment à l'utilisation de *B. thuringiensis var israelensis* dans le cadre du programme de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest et à des évaluations ponctuelles de *B. sphaericus* au Cameroun et en Côte-d'Ivoire. Pour la lutte génétique, mis à part le succès enregistré aux États-Unis sur la mouche parasite du bétail *Cochlyomyia hominivorax*, aucune réussite majeure n'a par contre été signalée sur les moustiques. La production puis le lâcher de mâles stériles demandent des moyens techniques et financiers extrêmement importants qui bien souvent dépassent les ressources des pays en voie de développement. La transgénèse qui permet de produire des souches de moustiques ayant perdu leur capacité à transmettre des agents infectieux est encore trop peu avancée pour qu'on puisse statuer sur son avenir pratique. Si la production en laboratoire de souches de moustiques transgéniques ne fait aucun doute, la possibilité de voir ces moustiques remplacer un jour sur de grandes étendues géographiques les souches sauvages vectrices de maladies reste encore à démontrer.

Dans le domaine de la lutte chimique, en utilisant des adulticides tels que les pyréthrinoides et les carbamates en aspersions intradomiciliaires ou en imprégnation de moustiquaires, on limite l'application à une aire strictement domestique qui n'interfère pas avec l'environnement et notamment avec l'entomofaune utile. En ce qui concerne l'utilisation des larvicides, le problème est plus délicat car les larves de moustique et les prédateurs évoluent dans les mêmes niches écologiques. Détruire l'un signifie pour bon nombre de larvicides anéantir également l'autre sauf, si l'on utilise judicieusement des larvicides sélectifs tels que les inhibiteurs de développement des insectes et les larvicides d'origine biologique.

La lutte antivectorielle fait aussi appel à des méthodes de lutte physique, drainage et assèchement des marais qui devraient être systématiquement pris en compte dans les programmes d'aménagement et de mise en valeur des territoires. Lorsque ces méthodes sont bien maîtrisées, elles peuvent se révéler très efficaces et salutaires pour les hommes ; dans le cas contraire, elles peuvent anéantir de vastes milieux.

On se rend compte en définitive que la lutte antivectorielle est avant tout une question de stratégie. Celle-ci peut parfois se révéler relativement simple dans sa conception mais d'autant plus complexe dans sa mise en pratique qu'il n'existe en réalité pas de solution toute faite et universelle. Il n'y a pas d'insecticides miracles mais seulement des insecticides efficaces. Pulvérisés ou épandus au bon moment en tenant compte de la bioécologie des vecteurs, les insecticides permettent dans la plupart des cas un contrôle efficace des populations de moustiques. En revanche, il

faut proscrire la notion trop simpliste de « stratégie unique » dans la mesure où les caractéristiques épidémiologiques d'une maladie transmise par un vecteur ne sont pas les mêmes selon les régions, les climats, le relief et le comportement des communautés villageoises et urbaines. La lutte antivectorielle doit tenir compte de tous ces paramètres et, à notre époque, l'homme a produit suffisamment d'adulticides et de larvicides efficaces pour mener à bien les opérations de lutte qu'il s'est fixé. Il ne faudrait pas, comme c'est la tendance actuelle, arrêter l'évaluation des nouveaux insecticides mais au contraire l'intensifier. Ces produits peuvent en effet servir de manière plus efficace les programmes de lutte antivectorielle en se substituant à tous les insecticides à l'égard desquels les moustiques sont devenus résistants. Il faut tenir compte aussi des coûts d'utilisation de ces nouveaux insecticides qui bien souvent conditionnent la faisabilité des campagnes de lutte dans les pays en voie de développement. A une époque où l'homme prend de plus en plus conscience de la nécessité de sauvegarder son environnement, ces mêmes insecticides doivent être les plus sélectifs possible. On impose donc à ces produits des spécifications de plus en plus nombreuses et, rares sont les nouveaux insecticides qui regroupent autant de qualités.

Enfin je me permets de clôturer cet ouvrage en citant une phrase écrite non pas par un entomologiste, ni par un médecin mais par un astronome : « L'évolution a voulu que nous prenions plaisir à comprendre – et qui comprend mieux accroît ses chances de survie » (Sagan, 1981). A mon avis, ce n'est pas une vaine pensée quand on sait que par l'intermédiaire des insectes, des millions d'hommes, de femmes et d'enfants meurent encore chaque année de maladie et de famine.



# ANNEXE

Tableau 1

**Pourcentages des différents paramètres entomologiques enregistrés dans les cases témoins et traitées en aspersions intradomiciliaires totales et sélectives de cases Bobo et Mossi**

insecticides	aspersions	(G)	(I)	(D)	(I/D)	(Gorg)	(R)	(Ré)	(Ir)
cyfluthrine	totale	93,1	87,5	5,6	15,6	82,8 : $\chi^2 = 80,3$ (S)	3 mois	-21,8	78,2
fenfluthrine	totale	74,4	69,2	5,2	13,3	66,7	1 à 2 mois	-96,5	69,2
témoin	/	0	0	0	0	98,1	/	/	43,3
ethofenprox	totale	47,9	22	25,9	0,8	95,6 : $\chi^2 = 24,7$ (S)	4 mois	-70	94
alphaméthrine	totale	82,7	62,6	20,1	3,1	80,8 : $\chi^2 = 189,2$ (S)	6,5 mois	-72,7	80,8
témoin	/	0	0	0	0	99,2	/	/	33,1
lambda-cyhalothrine PM*	totale	89,3	77,2	12,1	6,4	87,5 : $\chi^2 = 227,3$ (S)	2,5 à 3 mois	-55	91,3
lambda-cyhalothrine PM	sélective	50,4	19,8	30,6	0,6	89,9 : $\chi^2 = 165,3$ (S)	5 mois	-53,9	93,5
lambda-cyhalothrine ED*	totale	65,7	39,1	26,6	1,5	84,9 : $\chi^2 = 204,1$ (S)	2,5 à 3 mois	-87,4	85,2
lambda-cyhalothrine ED	sélective	76,1	52,6	23,5	2,2	90,2 : $\chi^2 = 172,8$ (S)	1 à 5 mois	-31,2	91,6
témoin	/	0	0	0	0	98,7	/	/	25
carbosulfan	totale	93,8	90	3,8	23,7	97,7	1 à 2 mois	-74,5	20
carbosulfan	sélective	66,6	55,1	11,5	4,8	98,1	2 à > 5 mois	-82,1	43,3
témoin	/	0	0	0	0	99,5	/	/	27,9

PM\* poudre mouillable.

ED\* formulation électrodynamique.

(G) : % de la mortalité globale.

(I) et (D) : % des mortalités immédiate et différée.

(I/D) : rapport des % de mortalités immédiate et différée qui mesure l'effet choc de l'insecticide.

(Gorg) : % de gorgement des moustiques et calcul du  $\chi^2$  pour  $p < 0,001$ .

(R) : rémanence de l'insecticide.

(Ré) et (Ir) : % de répulsivité et d'irritabilité des insecticides.

Toutes ces valeurs sont calculées par rapport aux témoins.

Tableau 2

**Pourcentages des différents paramètres entomologiques  
enregistrés dans les cases témoins  
et pourvues de moustiquaires imprégnées d'insecticides**

insecticides	(G)	(I)	(D)	(I/D)	(Gorg)	(R)	(Ré)	(Ir)
perméthrine	16,8	5,4	11,4	0,5	85,3 : $\chi^2 = 210,6$ (S)	5 mois	-72	97,2
témoin	0,04	/	/	/	97,3	/	/	28,1
béta-cyfluthrine	49	25,2	23,8	1,06	/	5 mois	-5,6	75,3
deltaméthrine	60,8	41	19,8	2,07	/	5 mois	-40,6	72
lambda-cyhalothrine	86,4	62,4	24	2,6	/	5 mois	-33,9	59,2
ethofenprox	27,8	9,8	18	0,5	/	< 1 mois	-35,6	83,2
témoin	3,9	/	/	/	/	/	/	32,2

(G) : % de la mortalité globale.

(I) et (D) : % des mortalités immédiate et différée.

(I/D) : rapport des % de mortalités immédiate et différée qui mesure l'effet choc de l'insecticide.

(Gorg) : % de gorgement des moustiques et calcul du  $\chi^2$  pour  $p < 0,001$ .

(R) : rémanence de l'insecticide.

(Ré) et (Ir) : % de répulsivité et d'irritabilité des insecticides.

Toutes ces valeurs sont calculées par rapport aux témoins.

Tableau 3

**Limite de la CL100 observée (en mg/l) de quatre inhibiteurs  
de développement sur des larves de stade 3 de *C. quinquefasciatus*  
d'*A. gambiae* et d'*A. aegypti***

inhibiteurs	<i>C. quinquefasciatus</i>	<i>A. gambiae</i>	<i>A. aegypti</i>
OMS-2015	0,004	0,0008	0,0008
OMS-3007	0,00125	0,031	/
OMS-3009	0,0008	0,0032	0,0004
OMS-3031	0,0005	/	/

Tableau 4

**Pouvoir ovicide de trois inhibiteurs de développement  
sur des œufs d'*A. gambiae***

inhibiteurs	concentrations (mg/l)	œufs éclos/total œufs	traités/témoins*
Témoin	-	355/400 = 88,8 %	-
OMS-2015	0,5	55/400 = 13,8 %	-84,5%
	1	6/400 = 1,5 %	-98,3%
	2	1/400 = 0,25 %	-99,7%
Témoin	-	280/400 = 70,0 %	-
OMS-3007	0,5	241/400 = 60,3 %	-13,9%
	1	197/400 = 49,3 %	-29,6%
	2	96/400 = 24,0%	-65,7%
Témoin	-	564/600 = 94,0 %	-
OMS-3009	0,5	494/600 = 82,3 %	-12,4%
	1	425/600 = 70,8 %	-24,6%
	2	375/600 = 62,5 %	-33,5%

\* (Nombre d'œufs éclos dans les lots traités x 100 / nombre d'œufs éclos dans les témoins) - 100.

Tableau 5

**Effet de deux inhibiteurs de développement  
sur la fertilité de femelles d'*A. aegypti***

inhibiteurs	doses (mg/l)	(FI)	(OP)	(M)	traités/témoins	œufs éclos/total œufs	traités/témoins
Témoin	-	100	6034	60,3	-	699/772 = 90,5 %	-
OMS-2015	0,00016	75	4121	54,9	-9%	335/418 = 80,1 %	$\chi^2=25,8$ p<0,001 (S)
Témoin	-	50	4974	99,5	-	865/953 = 90,8 %	-
OMS-3031	0,0001	66	2362	35,8	-64%	953/1157 = 82,4 %	$\chi^2=30,8$ p<0,001 (S)

(FI) : Nombre de femelles isolées pour la ponte.

(OP) : Nombre d'œufs pondus par chaque lot de femelles.

(M) : Moyenne d'œufs pondus par femelle.



# Bibliographie

- ALEXEEV A. (1983), L'utilisation des parasites (mermithides), des invertébrés prédateurs et des graines végétales dans la lutte contre les larves de moustiques. La lutte contre le paludisme. Les méthodes écologiquement rationnelles de lutte contre le paludisme et ses vecteurs. Tome 2. La lutte antivectorielle et la protection de l'environnement, *Édition MIR*: 150-160.
- BALARAMAN K., RAO U.S.B. et RAJAGOPALAN P.K. (1979), Bacterial pathogens of mosquito larvae - *Bacillus alvei* (Cheshire and Cheyenne) and *Bacillus brevis* (Migula) - isolated in Pondicherry. *Indian. J. Med. Res.*, 70: 615-619.
- BARJAC H. DE (1978), Une nouvelle variété de *Bacillus thuringiensis* très toxique pour les moustiques: *B. thuringiensis* var. *israelensis* sérotype 14. *C.R. Acad. Sci.*, 286: 797-800.
- BARJAC H. DE et COZ J. (1979), Sensibilité comparée de six espèces différentes de moustiques à *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis*. *Bull. WHO.*, 57: 139-141.
- BARJAC H. DE, LARGET I., BÉNICHOU L., COSMAO V., VIVIANI G., RIPOUTEAU H. et PAPION S. (1980), Tests d'innocuité sur mammifère avec du sérotype H 14 de *Bacillus thuringiensis*. *Doc. miméo. OMS, WHO/VBC/80. 761*: 23 pages.
- BARJAC H. DE, SEBALD M., CHARLES J.-F., CHEONG W.H. et LEE H.L. (1990), *Clostridium bifermentans* serovar *malaysia*, une nouvelle bactérie anaérobie pathogène des larves de moustiques et de simules. *C.R. Acad. sci. Paris.*, 310 (3): 383-387.
- BARRAUD P.J. (1928), The distribution of *stegomyia fasciata* in India with remarks on dengue and yellow fever. *Ind. J. Med. Res.*, 16: 377-88.
- BLANCHY S., RAKOTONJANABELO A. et RANAIVOSON G. (1993), Surveillance épidémiologique du paludisme instable. *Cahiers Santé.*, 3 (4): 247-255.
- BOWERS W.S., THOMSON M.I. et UEBEL E.G. (1965), Juvenile and gonadotropic activity of 10, 11 epoxyfarnesoic acid methyl ester. *Life Sci.*, 4: 2323-2331.
- BRENGUES J., BRUNHES J. et HERVY J.-P. (1979), La filariose de Bancroft en Afrique, à Madagascar et dans les îles voisines, *Études Médicales.*, 1: 85 pages.
- BREY P.T. et PAPIEROK B. (1987), Laboratory procedures for the identification and preliminary screening of fungal pathogens of mosquito larvae. Informal consultation on the Detection, Isolation, Identification and Ecology of bio-control Agents of Disease Vector. Genève, Suisse. BCV/ICBA/7: 6 pages.
- BRUN L.O. et SALES S. (1976), Stage 4 evaluation of four organophosphorous insecticides: OMS-43, OMS-1155, OMS-1197 and OMS-1424 applied at 0,2 g/m<sup>2</sup> to cotton mosquito nets. *Doc. miméo. OMS.*, WHO/VBC/76.630: 12 pages.

- CALLEC J.-J., HUE B. et CALLEC M. (1985), Le neurone, cible potentielle des insecticides. Insectes-Insecticides-Santé. Colloque national d'Angers, mode d'action et utilisation des insecticides. *ACTA* : 93-108.
- CANEL P., DELIS Ph. et GIRARD C. (1990), Construire la ville africaine - Chronique du citoyen promoteur, *Éditions Karthala/ACCT* : 200 pages.
- CARLES P.R. (1985), Mode d'action et utilisation des pyréthrinoides. Insectes-Insecticides-Santé. Colloque national d'Angers, mode d'action et utilisation des insecticides. *ACTA* : 325-244.
- CARNEVALE P., BAUDON D., MOLEZ J.-F. et GUIGEMDE T.-R. (1984), Aspects classiques et modernes des cycles de développement des plasmodiums humains. Les paludismes en Afrique, première partie, *Études médicales* : 61-78.
- CARNEVALE P., DARRIET F., SALES S. et ROBERT V. (1984), Évaluation en phase 2, dans la station expérimentale de Soumouso (Haute-Volta) de l'efficacité de deux insecticides, l'OMS-2012 et l'OMS-2013 sur les adultes d'anophèles à une concentration de 0,25g/m<sup>2</sup> et en traitement total. *Doc. mimeo. OMS, WHO/VBC/84. 887* : 23 pages.
- CARNEVALE P., ROBERT V., BOUDIN C., HALNA J.-M., PAZART L., GAZIN P., RICHARD A. et MOUCHET J. (1988), La lutte contre le paludisme par des moustiquaires imprégnées de pyréthrinoides au Burkina Faso. *Bull. Soc. Path. Ex.*, 81 : 832-846.
- CHAMP P. (1985), Mode d'action et utilisation des organophosphorés. Insectes-Insecticides-Santé. Colloque national d'Angers, mode d'action et utilisation des insecticides. *ACTA* : 207-221.
- CHARLES J.-F. et BARJAC H. DE (1981), Histopathologie de l'action de la delta-endotoxine de *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* sur les larves d'*Aedes aegypti* (Dip : Culicidae). *Entomophaga.*, 26 (2) : 203-212.
- CHEVALIER J. et GHEERBRANT A. (1969), Dictionnaire des symboles. Mythes, rêves, coutumes, gestes, formes, figures, couleurs, nombres. *Éditions Robert Laffont/Jupiter* : 1 060 pages.
- CHIDESTER F.E. (1917), *Dytiscus* as a destroyer of mosquito larvae. *Entomol. News.*, 28 : 454.
- CHRISTOPHERS S.R. (1960), *Aedes aegypti* (L.). The yellow fever mosquito. Its life history, bionomic and structure. *Cambridge at the University Press* : 739 pages.
- COLLINS F.H. et WASHINO R.K. (1985), Insect predators. *J. Am. Mosq. Control. Assoc.*, 6 : 25-41.
- COMBES C. (1990), D'où viennent les parasites de l'homme ? *Ann. Parasitol. Hum. Comp.*, 65, Suppl. I : 59-64.
- COZ J. et HAMON J. (1963), Importance pratique de la résistance aux insecticides en Afrique au sud du sahara pour l'éradication du paludisme dans ce continent. *Cah. Orstom, sér. Ent. méd.*, 1 : 27-37.
- COZ J. (1965), Expériences en Haute-Volta sur l'utilisation de cases-pièges pour la mesure de l'activité du DDT contre les moustiques. *Bull. Org. mond. Santé.*, 33 : 435-452.
- COZ J. (1971), Étude comparative des fenêtres et des véranda-pièges comme moyen de sortie pour les moustiques, Koumbia (Haute-Volta). *Cah. Orstom, sér. Ent. méd. et parasitol.*, 9 (3) : 239-246.

- DAGNOGO M. et COZ J. (1982), Un insecticide biologique : *Bacillus sphaericus*. 1. Activité larvicide de *B. sphaericus* sur quelques espèces et souches de moustiques. *Cah. Orstom, sér. Ent. méd. et Parasitol.*, 20 (2) : 133-138.
- DARRIET F., ROBERT V., VIEN N.T. et CARNEVALE P. (1984), Évaluation de l'efficacité sur les vecteurs du paludisme de la perméthrine en imprégnation sur des moustiquaires intactes et trouées. *Doc. mimeo. OMS., WHO/VBC/84. 899* et *WHO/MAL/84. 1008* : 20 pages.
- DARRIET F., CARNEVALE P. et ROBERT V. (1985a), Laboratory and field evaluation of the activity of an ecdysoid-type insect growth inhibitor, triflumuron (OMS-2015) on *Culex quinquefasciatus*, *Anopheles gambiae* and *Aedes aegypti*. *Doc. mimeo. OMS., WHO/VBC/85. 916* : 16 pages.
- DARRIET F., ROBERT V., ZOULANI A. et CARNEVALE P. (1985 b), Évaluation en laboratoire et sur le terrain de l'activité larvicide de deux inhibiteurs de croissance de type ecdysoïde : l'OMS-2016 et l'OMS-3009 sur *Culex quinquefasciatus* Say, 1823, *Anopheles gambiae* Giles, 1902 et *Aedes aegypti* Linné, 1762. *Doc. Tech. OCCGE n° 8758* : 35 pages.
- DARRIET F., ROBERT V. et CARNEVALE P. (1985 c), Évaluation en laboratoire et sur le terrain de l'activité larvicide d'un inhibiteur de croissance de type juvénole : l'OMS-3007 sur *Culex quinquefasciatus* Say, 1823 et *Anopheles gambiae* s.s. Giles, 1902. *Doc. Tech. OCCGE n° 8804* : 29 pages.
- DARRIET F., ROBERT V. et CARNEVALE P. (1986 a), Nouvelles perspectives de lutte contre *Culex quinquefasciatus* dans la ville de Bobo-Dioulasso. Journée internationale de l'eau. Colloque international sur l'eau, la ville et le développement. Marseille, 9-11 juin 1986 : 2 pages.
- DARRIET F., ROBERT V. et CARNEVALE P. (1986 b), Évaluation en laboratoire et sur le terrain de l'activité larvicide d'un inhibiteur de croissance de type ecdysoïde : l'OMS-2015 sur *Culex quinquefasciatus* Say, 1823 et *Anopheles gambiae* s.s. Giles, 1902. *Doc. Tech. OCCGE n° 8969* : 19 pages.
- DARRIET F., ROBERT V. et CARNEVALE P. (1987 a), Évaluation de trois inhibiteurs de croissance, deux ecdysoïdes et un juvénole, dans la lutte contre *C. quinquefasciatus*. *Cah. Orstom, sér. Ent. méd. et Parasitol.*, 25 (3-4) : 119-126.
- DARRIET F. (1987 b), Évaluation sur le terrain de trois inhibiteurs de croissance, deux ecdysoïdes et un juvénole dans la lutte contre *Anopheles gambiae*. *Cah. Orstom, sér. Ent. méd. et Parasitol.*, numéro spécial : 113-119.
- DARRIET F. (1989), Évaluation en laboratoire et sur le terrain de l'activité insecticide d'un inhibiteur de croissance de type ecdysoïde : l'OMS-3031 sur *C. quinquefasciatus* Say, 1823 et *A. aegypti* Linné, 1762. *Doc. mimeo. OMS., WHO/VBC/89. 978* : 15 pages.
- DARRIET F. (1991), Évaluation sur le terrain de l'efficacité de trois pyréthrinoides dans le cadre de la lutte contre les vecteurs du paludisme. *Parassitologia.*, 33 : 111-119.
- DARRIET F. et HOUGARD J.-M. (1993), Étude en laboratoire de la biologie et des capacités prédatrices de l'Hétéroptère aquatique *Ranatra parvipes vicina* (Signoret, 1880) à l'encontre des larves de moustiques. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale.*, 26 (4) : 305-311.
- DARRIET F., GUILLET P., CHANDRE F., N'GUESSAN R., DOANNIO J.M.C., RIVIÈRE F. et CARNEVALE P. (1997), Présence et évolution de la résistance aux pyréthrinoides et au DDT chez deux populations d'*Anopheles gambiae* s.s. d'Afrique de l'Ouest. *Doc. mimeo. OMS., WHO/CTD/VBC/97. 1001* ; *WHO/MAL/97.1081* : 15 pages.

- DAVIDSON G. (1969), The potential use of sterile hybrid males for the eradication of member species of the *Anopheles gambiae* complex. *Bull. World Health Organ.*, 40, 221-8.
- DAVIDSON G. (1974), Genetic Control of Insect Pests. *Academic Press, London.*, 158 pages.
- DELORME R. (1985), Les phénomènes de résistance : mécanismes biochimiques et physiologiques. Insectes-Insecticides-Santé. Colloque national d'Angers, mode d'action et utilisation des insecticides. *ACTA* : 257-272.
- DERIVAUX R.C. (1916), A note on the predacious habits of *Dineutes* (Whirligig beetles) toward *Anopheles* larvae. *Public Health rep.*, 331 : 1228-1230.
- DESCOINS C. (1985), Politique de l'INRA en matière de contrôle des insecticides. Insectes-Insecticides-Santé. Colloque national d'Angers, mode d'action et utilisation des insecticides. *ACTA* : 195-204.
- DETINOVA T.S. (1963), Méthode à appliquer pour classer par groupes d'âge les diptères présentant une importance médicale. *Org. mond. Santé.*, série de monographies, 47 : 220 pages.
- EDWARDS F.W. (1941), Mosquitoes of the Ethiopian Region. Vol. III, Culicine adults and pupae. *British Museum Natural History and the Oxford University Press* (London).
- EFTHYMIU M.-L. (1985), Insecticide et toxicologie clinique. Insectes-Insecticides-Santé. Colloque national d'Angers, mode d'action et utilisation des insecticides. *ACTA* : 357-375.
- ELISSA N., MOUCHET J., RIVIÈRE F., MEUNIER J.-Y. et YAO K. (1993), Resistance of *Anopheles gambiae* s.s. to pyrethroids in Côte-d'Ivoire. *Ann. Soc. Belge, Med. Trop.*, 73 : 291-4.
- FEDERICI B.A. (1985), viral pathogens. *J. Am. Mosq. Control. Assoc.*, 6 : 62-74.
- FOX I.J. et MATTHIESEN P. (1982), Acute toxicity to fish of low-dose aerosol applications of endosulfan to control tse-tse fly in the odavango delta, Botswana. *Environmental research.*, 27 : 129-192.
- FRÉMY D. et FRÉMY M. (1988), *Quid. Éditions Robert Laffont* : 1 801 pages.
- GARNHAM P.C.C., HARPER G.A. et HIGTON R.B. (1946), The mosquitoes of the Kaimosi Forest, Kenya Colony, With special reference to yellow fever. *Bull. Ent. Res.*, 36 : 473-96.
- GEORGHIOU G.P. (1992), Characterisation of resistance of *Culex quinquefasciatus* to the insecticidal toxins of *Bacillus sphaericus* (strain 2362). *Mosquito Control Research, Annual report, University of California* : 76 pages.
- GERMAIN M., CORNET M., MOUCHET J., HERVÉ J.-P., ROBERT V., CAMICAS J.-L., CORDELLIER R., HERVY J.-P., DIGOUTTE J.-P., MONATH T.P., SALAUN J.J., DEUBEL V., ROBIN Y., COZ J., TAUFFLIEB R., SALUZZO J.-F. et GONZALEZ J.-P. (1981), La fièvre jaune en Afrique : Données récentes et conceptions actuelles. *Médecine Tropicale.*, 41 (1) : 31-43.
- GERBERICH J.B. et LAIRD M. (1968), Bibliography of papers relating to the control of mosquitoes by the use of fish. An annotated bibliography for the years 1901-1966. *FAO Fisheries Tech.*, paper 75. *FRS/T 75* : 1-70.
- GILLIES M.T. and MEILLON B. DE (1968), The Anophelinae of Africa south of the Sahara. *Publication of the South African Institute for Medical Research, Johannesburg.*, 54 : 343 pages.

- GUILLET P., ESCAFFRE H. et PRUD'HOM J.-M. (1982), L'utilisation d'une formulation de *Bacillus thuringiensis* H 14 dans la lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest. II. Stabilité dans les conditions de stockage en milieu tropical. *Cah. Orstom, sér. Ent. et Parasitol.*, 20 (3): 181-185.
- HARGREAVES E. (1924), Entomological notes from Taranto (Italie) with reference to Faenza during 1917 and 1918. *Bull. Entomol. Res.*, 14: 213-219.
- HASSAL K.A. (1990), The biochemistry and uses of pesticides. Structure, metabolism, mode of action and uses in crop protection. *Second Edition, Macmillan press Ltd.*, 261 pages.
- HAZARD E.I. (1985), Microsporidie (microspora) (protozoa). *J. Am. Mosq. Control. Assoc.*, 6: 51-55.
- HERVY J.-P., COOSEMANS M.-H. et BRENGUES J. (1979), Évaluation d'insecticides contre les adultes de moustiques en Afrique de l'Ouest. Bilan de dix-sept années d'expérimentation sur le terrain effectuées en Haute-Volta. 19<sup>e</sup> Conf. Tech. OCCGE, Bobo-Dioulasso, 5-8 juin 1979, *Doc. Tech. OCCGE*, N° 7141/79: 652-664.
- HERVY J.-P. et SALES S. (1980), Évaluation de la rémanence de deux pyréthri- noïdes de synthèse – OMS-1821 et OMS-1998 – après imprégnation de différents tissus entrant dans la confection de moustiquaires. *Doc. Tech. OCCGE*, n° 7353/80: 14 pages.
- HOPKINS G.E. (1952), Mosquitoes of the Ethiopian Region. Vol. I, Larval bionomics of mosquitoes and taxonomy of Culicine larvae. *Seconde édition* (London).
- HOUGARD J.-M. (1981), Évaluation des potentialités de *Nosema algerae*, Vavra et undeen, 1970 en tant qu'agent de lutte biologique anticulicidien. *Université de Paris, rapport de stage de DEA en entomologie médicale et vétérinaire*: 40 pages.
- HOUGARD J.-M., DARRIET F. et BAKAYOKO S. (1983), Évaluation en milieu naturel de l'activité larvicide de *Bacillus thuringiensis* sérotype H 14 sur *Culex quinquefasciatus* Say, 1823 et *Anopheles gambiae* Giles, 1902 s.l. (Diptera: Culicidae) en Afrique de l'Ouest. *Cah. Orstom, sér. Ent. méd. et Parasitol.*, 21 (2): 111-117.
- HOUGARD J.-M., DUVAL J. et ESCAFFRE H. (1985 a), Évaluation en milieu naturel de l'activité larvicide d'une formulation de *Bacillus thuringiensis* H 14 sur *Aedes aegypti* (Linné) dans un foyer épidémique de fièvre jaune en Côte-d'Ivoire. *Cah. Orstom, sér. Ent. méd. et Parasitol.*, 23 (4): 235-240.
- HOUGARD J.-M., KOHOUN G., GUILLET P., DOANNIO J., DUVAL J. et ESCAFFRE H. (1985 b), Évaluation en milieu naturel de l'activité larvicide de *Bacillus sphaericus* Neide, 1904 souche 1593-4 dans les gîtes larvaires à *Culex quinquefasciatus* Say, 1823 en Afrique de l'Ouest. *Cah. Orstom, sér. Ent. et Parasitol.*, 23 (1): 35-44.
- HOUGARD J.-M. (1991 a), Chemical insecticides for lymphatic filariasis vectors and the role of impregnated bednets. *Doc. miméo. OMS., FIL/EC/91/WP.18*: 7 pages.
- HOUGARD J.-M., CHANDRE F., DARRIET F., WOUAFO NDAYO M., LOHOUÉ PETMY J., PIGNON D., CHIPPAUX J.-P., THIERY I. et GHIPIONI P.M. (1991 b), Présentation du centre collaborateur de l'OMS sur la recherche, l'isolement et l'identification d'agents de lutte biologique entomopathogènes en Afrique centrale. *Bull. liais. doc. OCEAC.*, 98: 56-59.

- HOUGARD J.-M., DARRIET F., CHANDRE F., WOUAFO NDAYO M., NGASSAM J.-P., BALDET T., THIERY I., LOHOUE J., PIGNON D., GIMOUX M.M., CHIPPAUX J.-P., ESCAFFRE H., BARBAZAN P., MBENTENGAM R. et GHIPIONI P.M. (1992 a), Isolement, identification et écologie d'agents de lutte biologique contre les insectes vecteurs de maladies : implantation au Cameroun d'un centre collaborateur OMS pour l'Afrique centrale. *Document d'Entomologie Médicale et de parasitologie*, n° 01/92 : 13 pages.
- HOUGARD J.-M. et BACK C. (1992 b), Perspectives on the bacterial control of vectors in the tropics. *Parasitology Today*, 8 (11) : 364-366.
- HOUGARD J.-M., MBENTENGAM R., LOCHOUARN L., ESCAFFRE H., DARRIET F., BARBAZAN P. et QUILLÉVÉRÉ D. (1993 a), Lutte contre *Culex quinquefasciatus* par *Bacillus sphaericus* : résultats d'une campagne pilote dans une grande agglomération urbaine d'Afrique équatoriale. *Bull. Org. mond. Santé.*, 71 (3/4) : 367-375.
- HOUGARD J.-M., BARBAZAN P. et BALDET T. (1993 b), Des bactéries pour la lutte anti-moustique. *La Recherche*, 24 (252) : 346-348.
- HOWARD L.O., DYAR H.G. et KNAB F. (1912), The mosquitoes of the North and Central America and the West Indies. *Carnegie Inst.* (Washington).
- JEANNEL R. (1949), Les insectes. Classification et phylogénie, les insectes fossiles, évolution et géonémie. Traité de zoologie. Anatomie, systématique, biologie. Paléontologie, géonémie, insectes inférieurs, coléoptères. Tome IX. *Éditeur Masson & C<sup>e</sup>* : 1-110.
- JULVEZ J., GALTIER J., ALI ALIDI M., HENRY M. et MOUCHET J. (1987), Épidémiologie du paludisme et lutte antipaludique à Mayotte (Archipel des Comores - océan Indien), évolution de la situation de 1976 à 1986. *Perspectives. Bull. Soc. Pathol. exotique.*, 80 : 505-519.
- KELLEN W.R., CLARCK T.B., LINDEGREN J.E., HO C.B., ROGOFF M.H. et SINGER S. (1965), *Bacillus sphaericus* Neide as a pathogen of mosquitoes. *J. Invert. Path.*, 7 : 442-448.
- KÖPPEN W. et WEGENER A. (1924), Die Klimate der geologischen Vorzeit. Berlin, Borntraeger.
- KOUZNETSOV R. (1983), La place des mesures de lutte contre les vecteurs dans les programmes antipaludiques. La lutte contre le paludisme. Les méthodes écologiquement rationnelles de lutte contre le paludisme et ses vecteurs. Tome 2. La lutte antivectorielle et la protection de l'environnement. *Édition MIR* : 20-29.
- KLEIN J.-M. et DARRIET F. (1989), Évaluation en phase 2 du carbusulfan en aspersions intradomiciliaires contre les moustiques sauvages, *Anopheles* et *Mansonia* à la station expérimentale de Soumouso, Burkina-Faso. *Doc. mimeo. OMS.*, WHO/VBC/89.968 : 20 pages
- KUMAR R. (1991), La lutte contre les insectes ravageurs. L'agriculture en région tropicale. *Éditions CTA et Karthala* : 311 pages.
- LACEY L.A. (1985), *Bacillus thuringiensis* Serotype H-14. *J. Am. Mosq. Control. Assoc.*, 6 : 132-158.
- LEFEUVRE J.-C. (1985), Intensification de l'agriculture et usage des produits insecticides : Évaluation des risques pour les équilibres biologiques, la faune et la santé humaine. Insectes-Insecticides-Santé. Colloque national d'Angers, mode d'action et utilisation des insecticides. *ACTA* : 7-70.

- LEGNER E.F. (1985), Invertebrate predators other than insects. *J. Am. Mosq. Control. Assoc.*, 6: 46-50.
- LEMASSON J.-J. et LOCHOUARN L. (1993), Évaluation en phase 2 de l'efficacité de quatre insecticides en imprégnation de moustiquaires contre les culicidés à la station expérimentale de Soumouso, Burkina-Faso. *Doc. Tech. OCCGE*, n° 10050/93: 15 pages.
- LEVY R. et MILLER Jr T.W. (1979), Observations on the sea anemone *Aiptasia pallida*, a potential biological control agent of mosquitoes in some salt marsh habitats of south-west Florida. *Fla. Entomol.*, 62: 407-409.
- LI Zuzi, XU Jinjang, LI Bangqan, ZHU Taihua and LI Mingxin (1987), Mosquito nets impregnated with deltamethrin against malaria vectors in China. *Doc. Miméo, OMS., WHO/VBC/ 87 939*.
- LOCHOUARN L. (1990), Action des régulateurs de croissance à doses sublétales sur des vecteurs de filarioses en Afrique centrale. *Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6*: 208 pages.
- MAGNIN M., MARBOUTIN E. et PASTEUR N. (1988), Insecticide Resistance in *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae) in West Africa. *J. Med. Entomol.*, 25 (2): 99-104.
- MARA L. (1946), Considerations sul rinvenimento dell' *Aedes aegypti* L. (Diptera: Aedinae) ad altitudini d'accazione e brevi note sulla fauna del M. Bizen (Eritrea A.O.). *Boll. Soc. Ital. Med. (Sez. Eritrea)*, 5: 189-98.
- MAUCHAMP B. (1985), Endocrinologie du développement: régulateurs de croissance, analogues d'hormones et antihormones. Insectes-Insecticides-Santé. Colloque national d'Angers, mode d'action et utilisation des insecticides. *ACTA*: 147-162.
- MAYDEL H.-J. VON (1983), Arbres et arbustes du Sahel. Leurs caractéristiques et leurs utilisations. *Azadirachta indica* A. Juss. *Édition Eschborn*: 159-161.
- MAZIER D. (1991), Cycle et biologie des plasmodiums. Paludisme. Universités francophones, *Édition Marketing Ellipses*: 25-33.
- MCCRAY Jr E.M. (1985), *Lagenidium giganteum* (fungi). *J. Am. Mosq. Control. Assoc.*, 6: 87-98.
- MEISCH M.V. (1985), *Gambusia Affinis Affinis*. Biological control of mosquitoes. *J. Am. Mosq. Control. Assoc.*, 6: 3-17.
- MOUCHET J. et CARNEVALE P. (1991), Les vecteurs et la transmission. Paludisme. Universités francophones, *Édition Marketing Ellipses*: 34-59.
- MOUCHET J. et CARNEVALE P. (1991), La lutte et protection contre les vecteurs. Paludisme. Universités francophones, *Édition Marketing Ellipses*: 210-227.
- MULLA S., DARWAZEH H.A., DAVIDSON E.W. and DULMAGE H.T. (1984), Efficacy and persistence of the microbial agent *Bacillus sphaericus* against mosquito larvae in organically enriched habitats. *Mosq. News.*, 44 (2): 166-173.
- NICOLAS L. (1986), Potentialité de *B. sphaericus* dans la lutte anti-vectorielle en Afrique tropicale. *Cah. Orstom, sér. Ent. méd. et Parasitol.*, 24 (4): 265-273.
- NICOLAS L., DOSSOU-YOVO J. et HOUGARD J.-M. (1987 a), Persistence and recycling of *Bacillus sphaericus* 2362 spores in *Culex quinquefasciatus* breeding sites in West Africa. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 25: 341-345.
- NICOLAS L., DARRIET F. et HOUGARD J.-M. (1987 b), Efficacy of *Bacillus sphaericus* 2362 against larvae of *Anopheles gambiae* under laboratory and field conditions in West Africa. *Médical and Veterinary Entomology.*, 1: 157-162.

- OLIVRY J.-C. (1986), Fleuves et rivières du Cameroun. *Collection Monographie Hydrologiques Orstom.*, 9 : 733 pages.
- OMS (1957), 7<sup>e</sup> rapport du comité d'Experts des insecticides. *Org. Mond. Santé, Sér. rapp. tech.* (Genève).
- OMS (1963), Résistance aux insecticides et lutte contre les vecteurs. 13<sup>e</sup> rapport du comité OMS d'experts des insecticides. *Org. Mond. Santé, Sér. rapp. tech.*, 265 : 242 pages.
- PERRY A.S. et HOSKINS W.M. (1950), The detoxification of DDT by resistant houseflies and inhibition of this process by piperonyl cyclonene. *Science.*, 111 : 600.
- PETERSEN J.J. (1985), Nematode parasites. *J. Am. Mosq. Control. Assoc.*, 6 : 110-122.
- PILET C., BOURDON J.-L., TOMA B., MARCHAL N. et BALBASTRE C. (1983), Bactériologie médicale et vétérinaire. Systématique bactérienne. Collection biologie appliquée, *Doin Éditeurs* (Paris) : 437 pages.
- PLATZER E.G. (1981), Biological control of mosquitoes with mermithids. *J. Nematol.*, 13 : 257-262.
- POISSON R. (1951), Ordre des hétéroptères (heteroptera Latreille, 1810 - Frontirostres Fallien, 1814). *Traité de zoologie, anatomie, systématique, biologie. Insectes supérieurs et hémiptéroïdes. Édition Masson et C<sup>ie</sup>*, 10 (2) : 1657-1803.
- RAMADE F. (1977), Écotoxicologie. *Éd. Masson* (Paris) : 205 pages.
- RAMADE F. et THYBAUD E. (1985), Écotoxicologie des composés organohalogénés. Insectes-Insecticides-Santé. Colloque national d'Angers, mode d'action et utilisation des insecticides. *ACTA* : 469-485.
- ROBBE P. (1988), Index phytosanitaire, produits insecticides, fongicides, herbicides..., 24<sup>e</sup> édition, *ACTA* : 491 pages.
- ROBERT V., BARATHE J., SANNIER C. et COZ J. (1983), Comparaison du développement larvaire et des stades tueurs de *Toxorynchites brevipalpis* et de *T. amboinensis* (Diptera: Culicidae). *Cah. Orstom, sér. Ent. méd. et Parasitol.*, 26 (1) : 13-18.
- ROBERT V., GAZIN P., OUEDREOGO V. et CARNEVALE P. (1986), Le paludisme urbain à Bobo-Dioulasso (Burkina-Faso). 1. Étude entomologique de la transmission. *Cah. Orstom, sér. Ent. méd. et Parasitol.*, 24 (2) : 121-128.
- ROBERT V. (1989), La transmission du paludisme humain : La zone des savanes d'Afrique de l'Ouest. *Thèse de l'Université de Paris 6* : 325 pages.
- SABATINELLI G., MAJORI G., BLANCHY S., FAYAERTS Ph. et PAPAKAY M. (1990), Expérimentation du poisson larvivoire *Poecilia reticulata* dans la lutte contre le paludisme en RFI des Comores. *Doc. mimeo. OMS., WHO/MAL/90.1060* : 10 pages.
- SAGAN C. (1981), Cosmos. Un prodigieux voyage dans l'espace et le temps. *Éditions Marabout* : 450 pages.
- SAKAI M. (1964), Studies on the insecticidal action of nereistoxin, 4-N, N-dimethylamino-1,2-dithiolane. Insecticidal properties. *Jap. J. Appl. Ent. Zool.*, 8 : 324-333.
- SALES S. et HERVY J.-P. (1977), Évaluation au stade IV de l'efficacité de l'OMS-1804 (Dimilin) contre les larves de *Culex pipiens fatigans* Wiedemann et *Aedes aegypti* Linné. *Doc. miméo. OMS., WHO/VBC/77.655* : 8 pages.

- SAWICKI R.M. et FARNHAM A.W. (1968), Examination of the isolated autosome of the SKA strain of houseflies (*musca domestica* L.) for resistance to several insecticides with and without pretreatment with sesamex and T.B.T.P. *Bull. Entomol. Res.*, 59: 409-421.
- SÉGUY E. (1951), Ordre des diptères (Diptera Linné, 1758). Traité de zoologie. Anatomie, systématique, biologie. Insectes supérieurs et hémiptéroïdes. Tome X, premier fascicule. Éditeur Masson & C<sup>ie</sup>: 449-744.
- SERVICE M.W. (1977), Mortalities of the immature stages of the species B of the *Anopheles gambiae* complex in Kenya: Comparison between rice fields and temporary pools, identification of predators, and effects of insecticidal spraying. *J. Med. Entomol.*, 13: 535-545.
- SINÈGRE G., JULLIEN J.-L., GAVEN B. et CRESPO O. (1980), Action larvicide et ovicide du diflubenzuron sur trois espèces de Culicidés. *Parassitologia.*, 22 (1-2): 187-198.
- SINGER S. (1973), Insecticidal activity of recent bacterial isolates and their toxins against mosquitoes larvae. *Nature London.*, 244: 110-111.
- SINGER S. (1977), Isolation of bacterial pathogens of vectors in: Biological regulation of vectors. *DHEW, Publ (NIH)*, 77 (1180): 3-17.
- SNOW R., ROWAN K., LINDSAY S. and GREENWOOD B. (1988), A trial of bed nets (mosquito nets) as a malaria control strategy in rural area of the Gambia, West Africa. *Trans. R. Soc. trop. Med. Hyg.*, 82: 212-215.
- SOKOLOVA E. (1983), Perspectives d'application des insecticides biogènes. La lutte contre le paludisme. Les méthodes écologiquement rationnelles de lutte contre le paludisme et ses vecteurs. Tome 2. La lutte antivectorielle et la protection de l'environnement. Édition MIR: 128-139.
- SUBRA R. (1974), Urbanisation et filariose de bancroft en Afrique et à Madagascar. *Doc. miméo. OMS.*, WHO/FIL/74.127: 15 pages.
- TWINN C.R. (1931), Observations on some aquatic animal and plant enemies of mosquitoes. *Can. Entomol.*, 63: 51-61.
- UMPHLETT C.J., et HUANG C.S. (1970), *Lagenidium culicidum* as a agent of biological control of mosquitoes, *A.S.B. Bull.*, 17: 68.
- UMPHLETT C.J. (1973), A note to identify a certain isolate of *Lagenidium* which kills mosquito larvae. *Mycologia.*, 65: 970-972.
- WEISER J. (1984), A mosquito virulent *Bacillus sphaericus* in adult *Simulium damnosum* from northern Nigeria. *Zentralblatt fur Mikrobiologie.*, 139 (1): 57-60.
- WEISER J. (1991), Biological control of vectors. Manual for collecting, field determination and handling of biofactors for control vectors. *Published by John Wiley & sons Ltd*: 189 pages.
- WHITE G.B. (1985), *Anopheles bwambae* sp. n., a malaria vector in the Semliki Valley, Uganda, and its relationships with other sibling species of the *An. gambiae* complex (Diptera: Culicidae). *System. Entomol.*, 10: 501-522.
- WICKREMESINGHE R.S.B. et MENDIS C.L. (1980), *Bacillus sphaericus* spore from Sri Lanka of larval *Culex quinquefasciatus*. *Mosq. News.*, 40: 387-389.
- ZAKHAROVA N. (1983), La méthodologie moderne de la lutte génétique contre les moustiques. La lutte contre le paludisme. Les méthodes écologiquement rationnelles de lutte contre le paludisme et ses vecteurs. Tome 2. La lutte antivectorielle et la protection de l'environnement. Édition MIR: 161-175.



## Liste des figures

Figure 1 : Les trois grands asiles du carbonifère supérieur (d'après Köppen et Wegener, 1924) .....	10
Figure 2 : Structure et composition atomique du DDT .....	26
Figure 3 : Structure et composition atomique de l'HCH .....	26
Figure 4 : Structure et composition atomique du TEPP .....	27
Figure 5 : Structure et composition atomique du parathion éthyl ....	28
Figure 6 : Structure et composition atomique du propoxur et du carbaryl .....	28
Figure 7 : Structure et composition atomique de la perméthrine ....	29
Figure 8 : Structure et composition atomique de la deltaméthrine ..	29
Figure 9 : Action de l'enzyme DDT-déhydrochlorase .....	33
Figure 10 : Dégradation du malathion en malathion acide par une hydrolase de type carboxylestérase .....	34
Figure 11 : Oxydation des cycles aromatiques .....	34
Figure 12 : Structure et composition atomique du méthoprène et du fénoxycarb .....	39
Figure 13 : Structure et composition atomique du diflubenzuron ....	40
Figure 14 : Structure et composition atomique du triflumuron .....	40
Figure 15 : Moyenne pluviométrique enregistrée par la station expérimentale de Soumouso pour les années 1983, 1984, 1985 et 1986 .....	56
Figure 16 : Dynamique et effectifs de la faune culicidienne capturée dans les cases-pièges témoins et traitées de la station expérimentale de Soumouso au cours des années 1983, 1984, 1985 et 1986 .....	57
Figure 17 : Pourcentages d' <i>A. gambiae</i> et d' <i>A. funestus</i> récoltés dans les cases (1) et les vérandas-pièges (2) des maisons Bobo et Mossi témoins au cours des années 1983, 1984, 1985 et 1986. Les pourcentages de gorgement (3) sont exprimés pour cette même période de capture .....	58
Figure 18 : Mode d'action de quatre pyréthrinoides de synthèse et d'un carbamate à fort effet choc, appliqués en aspersions intradomiciliaires totales des cases Bobo et Mossi. Le test de $\chi^2$ pour le paramètre (Gorg) n'a pu être effectué dans les cases traitées à la fenfluthrine et au carbosulfan car l'un des effectifs calculés était inférieur à 5 .....	62

Figure 19 : Mode d'action de deux pyréthrinoides de synthèse à faible effet choc appliqués en aspersions intradomiciliaires totales des cases Bobo et Mossi .....	63
Figure 20 : Mode d'action d'un pyréthrinouide de synthèse sous la forme de deux formulations et d'un carbamate appliqués en aspersions intradomiciliaires sélectives des cases Bobo et Mossi. Le test de $\chi^2$ pour le paramètre (Gorg) n'a pu être effectué dans les cases traitées au carbosulfan car l'un des effectifs calculés était inférieur à 5 .....	64
Figure 21 : Mode d'action de cinq pyréthrinoides de synthèse en imprégnation de moustiquaires installées dans des maisons-pièges de type Bobo et Mossi. Le test de $\chi^2$ pour le paramètre (Gorg) n'a pu être effectué que pour la perméthrine, ce facteur n'ayant pas été pris en compte lors de l'évaluation des quatre autres insecticides .....	68
Figure 22 : Nombre de piqûres de <i>C. quinquefasciatus</i> par homme et par nuit recensé dans la ville de Maroua avant (1991) et après le traitement (1992) des gîtes larvaires avec <i>B. sphaericus</i> .....	84
Figure 23 : Nombre de piqûres d' <i>A. gambiae</i> par homme et par nuit recensé dans la ville de Maroua avant (1991) et après le traitement (1992) des gîtes larvaires avec <i>B. sphaericus</i> .....	85

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Pourcentages des différents paramètres entomologiques enregistrés dans les cases témoins et traitées en aspersions intradomiciliaires totales et sélectives de cases Bobo et Mossi .....	95
Tableau 2 : Pourcentages des différents paramètres entomologiques enregistrés dans les cases témoins et pourvues de moustiquaires imprégnées d'insecticides .....	96
Tableau 3 : Limite de la CL 100 observée (en mg/l) de quatre inhibiteurs de développement sur des larves de stade 3 de <i>C. quinquefasciatus</i> , d' <i>A. gambiae</i> et d' <i>A. aegypti</i> .....	96
Tableau 4 : Pouvoir ovicide de trois inhibiteurs de développement sur des œufs d' <i>A. gambiae</i> .....	97
Tableau 5 : Effet de deux inhibiteurs de développement sur la fertilité de femelles d' <i>A. aegypti</i> .....	97



# Table des matières

Remerciements .....	5
Introduction .....	7
<b>Chapitre 1 : Des moustiques et des hommes</b> .....	9
1.1. Insectes, diptères et moustiques .....	9
1.2. L'avènement humain .....	11
1.3. La bioécologie des moustiques .....	13
1.4. Les moustiques et les maladies .....	19
<b>Chapitre 2 : Des moustiques, des hommes et des insecticides</b> .....	25
2.1. L'histoire des quatre plus grandes familles d'insecticides ...	25
2.2. Des modes d'action focalisés sur une cible : le système nerveux .....	30
2.3. Un exemple de lutte concertée à l'échelon mondial : l'éra- dication du paludisme .....	32
2.4. Une réaction imprévue : les résistances .....	33
2.5. Une science née de l'erreur des hommes : l'écotoxicologie	36
2.6. Une cible imprévue : l'homme .....	38
2.7. Les dernières générations des insecticides de synthèse .....	38
<b>Chapitre 3 : Une approche écologique : la lutte biologique</b> .....	41
3.1. Les prédateurs .....	41
3.2. Les parasites ou agents entomopathogènes .....	45
3.3. La lutte génétique .....	51
<b>Chapitre 4 : La recherche expérimentale</b> .....	53
4.1. Les adulticides et leur évaluation .....	54
4.2. Les larvicides et leur évaluation .....	71
4.3. Les insecticides de demain .....	87
<b>Chapitre 5 : Conclusion : la lutte antivectorielle, une somme         de connaissances</b> .....	91

Annexe .....	95
Bibliographie .....	99
Liste des figures .....	109
Liste des tableaux .....	111

Compogravure, mise en pages :  
*Vire-Graphic*  
Z.I., rue de l'Artisanat, 14500 Vire

Achévé d'imprimer en septembre 1998  
sur les presses de la Nouvelle Imprimerie Laballery  
58500 Clamecy

Dépôt légal : septembre 1998  
Numéro d'impression : 809033

*Imprimé en France*

Depuis l'Antiquité, les hommes s'acharnent à détruire les moustiques. En l'an 450 avant Jésus-Christ, le médecin grec Hypocrate recommandait de construire les villes loin des marécages. Mais la lutte contre les moustiques n'a connu de véritable essor que depuis cinquante ans, avec la fabrication des insecticides de synthèse, plus efficaces et plus rémanents que les produits naturels.

En cette fin du XX<sup>e</sup> siècle, devant les flambées épidémiques de certaines maladies à virus, la recrudescence du paludisme et autres parasitoses dont les moustiques sont les vecteurs, il devient urgent de limiter leur pullulation. Les stratégies de lutte contre les moustiques nuisants et vecteurs de maladies sont nombreuses et l'Afrique tropicale a été le théâtre d'évaluations « pilotes » qui ont souvent été reprises comme modèle expérimental dans d'autres régions du monde.

Les moustiques sont des insectes dangereux qui nuisent gravement à la santé des hommes, des femmes et des enfants. Limiter leur pullulation nécessite l'élaboration de méthodes de lutte pas toujours évidentes à mettre en œuvre. Cet ouvrage analyse ces différentes mesures en tenant compte de l'extrême diversité des milieux où les moustiques prolifèrent.

*Frédéric Darriet est entomologiste médical à l'ORSTOM. Travaillant depuis plus de seize ans en Afrique, il a dirigé de nombreux programmes de recherche au Burkina-Faso, au Cameroun et en Côte-d'Ivoire. Ses travaux sur les moustiques et les insecticides et plus particulièrement son étude pionnière sur les moustiquaires imprégnées de pyréthrinoides sont connus dans le monde entier.*

***Économie et développement***  
***Collection dirigée par Georges Courade***



9 782865 378647

ISBN : 2-86537-864-0