

# Quand les activités urbaines et agricoles favorisent la pullulation des moustiques nuisants et vecteurs d'agents pathogènes pour l'Homme

## When Urban and Agricultural Activities Favor the Proliferation of Mosquito Nuisance and Vectors of Pathogens to Humans

F. Darriet

Reçu le 5 mars 2019 ; accepté le 15 mai 2019  
© Société de pathologie exotique et Lavoisier SAS 2019

**Résumé** Les grandes villes se sont multipliées sur tous les continents en générant des pollutions domestiques et industrielles et dans les campagnes, l'utilisation souvent irraisonnée des intrants agricoles (engrais et pesticides) déciment les plantes et les animaux. Cent quatre-vingt millions de tonnes d'engrais et 2,4 millions de tonnes de pesticides sont déversées chaque année dans le monde. Ces pollutions, qu'elles soient urbaines ou rurales, ont un impact considérable sur la biologie des moustiques. Aujourd'hui, certains espaces urbains sont devenus de véritables nids à moustiques et, dans les campagnes, l'usage combiné des engrais et des pesticides favorise, paradoxalement, leur prolifération. L'ironie de cette histoire du monde moderne est que les différents facteurs qui favorisent la pullulation des moustiques sont ceux là mêmes qui déciment une bonne partie de la biodiversité.

**Mots clés** Engrais · Insecticide · Moustiques · Ville · Campagne · Prolifération · Stratégie de lutte innovante · Spinosad · Pyriproxyfen

**Abstract** Big cities have thrived on all continents, so have domestic and industrial wastes not to mention the often irrational use of agricultural inputs (fertilizers and pesticides) detrimental to plants and animals. One hundred and eighty million tons of fertilizers and 2.4 million tons of pesticides are spread every year worldwide. Such pollutions, whether urban or rural, have a significant impact on the biology of mosquitoes. Today some urban spaces have properly become a land of plenty for mosquitoes. The combined use of fertilizer and pesticides in the country, quite paradoxically also favor their proliferation. Ironically the very reasons that

account for the multitudes of mosquitoes are the exact reasons responsible for the depletion of biodiversity.

**Keywords** Fertilizer · Insecticide · Mosquitoes · City · Country · Proliferation · Innovative strategy mosquito control · Spinosad · Pyriproxyfen

### Introduction

En ce début du 21<sup>e</sup> siècle, la biodiversité connaît une crise majeure qui, globalement, s'étage sur deux niveaux. Le premier, le plus médiatisé auprès du grand public est celui de l'érosion du monde du vivant. Le second niveau, moins connu, et pourtant directement lié au premier, est celui de la pullulation des espèces nuisibles et/ou vectrices d'agents pathogènes pour l'homme [21]. L'appauvrissement de la biodiversité n'est pas un phénomène contemporain, il fait partie des processus vitaux de l'évolution [7]. Cependant, notre planète connaît actuellement une crise sans précédent, consécutive cette fois aux seules activités humaines [3,11,41]. Au 19<sup>e</sup> siècle, la planète comptait un milliard d'habitants et le double en 1930. La Terre en hébergeait sept milliards en 2011 et les prévisionnistes avancent une population dépassant neuf milliards d'ici à 2045 [40]. Les conséquences de cette explosion démographique se traduisent par la construction de villes démesurées et la mise en place dans les campagnes d'une agriculture intensive gourmande en intrants agricoles (engrais et pesticides). La transformation d'un habitat naturel en aires urbaines ou agro-industrielles se traduit par une simplification à l'extrême de ses écosystèmes. De surcroît, l'usage des engrais chimiques et des pesticides sur de vastes surfaces cultivées entraîne la pollution des sols, des eaux de surface et des nappes phréatiques. Face à un tel déséquilibre des environnements terrestres et aquatiques, il n'est pas surprenant de constater que les espèces animales les plus vulnérables disparaissent au profit de toute

F. Darriet (✉)

Maladies infectieuses et vecteurs, écologie, génétique, évolution et contrôle (MIVEGEC), IRD, CNRS, Université de Montpellier, 911 av. Agropolis, BP 64501, 34394 Montpellier, France  
e-mail : frederic.darriet@ird.fr

une kyrielle d'animaux parfois nuisibles pour la santé des hommes [21,37,51]. En inoculant à l'homme des agents pathogènes aussi dangereux que le paludisme, la dengue, la maladie à virus chikungunya, la fièvre jaune, la maladie à virus zika et bon nombre d'autres parasites et virus, les moustiques (Diptera : Culicidae) provoquent à eux seuls la mort de près d'un million de personnes chaque année dans le monde. La question que se posent désormais les institutions en charge de lutter contre les moustiques est de savoir comment limiter efficacement leurs pullulations dans les villes et les campagnes. Des questions qui ne peuvent plus rester sans réponse dans la mesure où certains de ces moustiques sont désormais inscrits sur la liste des espèces les plus invasives au monde [9].

### Dans les villes et les campagnes : les lieux de vie des moustiques

Plus le temps passe et plus les villes concentrent sur leurs aires des densités humaines élevées. Actuellement 50 % de la population mondiale habite dans les villes, ce taux devrait se chiffrer à 70 % en 2050 [49]. La consommation en eau y est importante, qu'elle soit utilisée pour la cuisine, les soins corporels, laver le linge ou bien arroser les espaces verts. Les eaux finissent par s'accumuler dans une multitude de collections d'eau différentes. Dans la plupart des pays émergents, les villes se développent sans véritable plan d'urbanisation. Très vite s'installe dans les quartiers une insalubrité grandissante en grande partie occasionnée par l'accumulation des déchets, par le manque d'hygiène, la pollution des eaux de surface et l'absence de traitement des eaux usées. Les effluents urbains qui s'accumulent dans les puisards, les latrines et les zones d'affaissement des caniveaux (Fig. 1) deviennent rapidement des lieux de vie et de reproduction du moustique *Culex pipiens* (*C. p. pipiens* et *C. p. quinquefasciatus*). Dans de nombreuses villes africaines, il n'est pas rare de dénombrer plusieurs milliers de larves et de nymphes de ce moustique dans un seul gîte [16]. Pour *Culex*, il n'existe pas de milieux qui lui soient plus appropriés que les environnements urbains. Leurs gîtes larvaires qui contiennent des eaux sales et polluées se trouvent disséminés un peu partout dans les espaces publics et privés. Des captures effectuées dans la ville de Maroua (extrême nord du Cameroun) ont montré qu'un habitant de cette localité pouvait subir, chaque nuit, jusqu'à 300 piqûres de *C. p. quinquefasciatus* [2]. Les moustiques *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* profitent eux aussi des villes et de la négligence des hommes pour proliférer et se faire les vecteurs d'arboviroses, fièvre jaune, la dengue, chikungunya et zika [1,36,48]. Les *Aedes* femelles pondent leurs œufs dans des collections d'eau claire, au repos, de petites et de moyennes tailles (fûts, jarres, citernes, abreuvoirs, vases, soucoupes placées sous



**Fig. 1** Les caniveaux éventrés par manque d'entretien forment des collections d'eau polluées où pullulent *Culex pipiens quinquefasciatus* - Bobo-Dioulasso, Burkina-Faso (1985) / *Gutters in a state of disrepair for lack of maintenance, thus generating polluted water collections where *Culex pipiens quinquefasciatus* proliferate* - Bobo-Dioulasso, Burkina-Faso (1985) (© F. Darriet)

les pots de fleurs, boîtes de conserve, pneus, bouteilles, etc.) (Fig. 2) disséminées un peu partout dans les villes et les zones résidentielles [13,27]. Ces gîtes larvaires « hors sol » possèdent une origine identique : ce sont tous des produits issus de l'activité humaine. Pour les plus petits de ces gîtes, le plus simple est de les détruire physiquement. Pour les contenant les plus volumineux, ils sont le plus souvent traités par les services de lutte antivectorielle (LAV) avec le larvicide biologique *Bacillus thuringiensis* var *israelensis* (*Bti*) dont il n'existe encore pas de résistance chez les moustiques. De plus, le *Bti* est doté d'une totale innocuité vis-à-vis de l'Homme et des animaux domestiques.

Dans les campagnes, les étendues les plus favorables à la pullulation des moustiques sont les terrains agricoles, les plus prolifiques étant les surfaces en eau que constituent les cultures irriguées (Fig. 3). Sur tous les continents, les rizières et les maraîchages « produisent en masse » des moustiques vecteurs d'agents pathogènes pour l'homme (paludisme, encéphalite japonaise, filarioses lymphatiques, fièvre à virus du Nil occidental, etc.). Jusque dans les années 1950, les fermes exploitaient des champs et des prairies délimités par des murs en pierre et/ou des haies composées d'arbres et d'arbustes. Le bocage qui résulte de cette fragmentation des surfaces agricoles par un maillage complexe de haies et de murs a dominé les paysages européens durant des siècles. Les effets bénéfiques du bocage sur la biodiversité ne sont plus à discuter. Situés en travers des reliefs, les haies limitent l'érosion du sol tout en régulant la déperdition de ses éléments chimiques. Une foule de mammifères, d'oiseaux et de reptiles cohabitent dans les régions de taillis. Dans les mares et les étangs vivent les poissons, les grenouilles, les tritons et les salamandres. Dans les haies et les



**Fig. 2** Dans les Caraïbes, il est fréquent que les habitants placent des fûts en plastique sous les gouttières pour recueillir les eaux de pluies. Ces collections d’eaux « hors sol » sont très productives en *Aedes aegypti* - Martinique (2008) / *It is commonplace for the people living in the Caribbean to put plastic barrels under the drainpipes to collect rainfall water. Such “above ground” water collections swarm with Aedes aegypti - Martinique (2008) (© F. Darriet).*



**Fig. 3** Au moment du repiquage du riz, les rizières aux eaux chaudes et ensoleillées abritent d’importantes populations d’*Anopheles gambiae*, vecteur majeur des paludismes en Afrique subsaharienne - Vallée du Kou, Burkina-Faso (2004) / *At the time of rice transplanting, the warm sunlit waters of the rice fields host large population of Anopheles gambiae, the main malaria vector in sub-Saharan Africa - Kou Valley, Burkina-Faso (2004) (© F. Darriet).*

prairies rampent et bourdonnent les insectes. Le bocage est un monde d’une grande diversité sans lequel, l’équilibre biologique de nos campagnes serait rompu. Or dans les années 1960, les agronomes ont décidé de détruire les haies, les talus et les murets ; les mares et les étangs ont été comblés pour regrouper les parcelles en des champs plus vastes. La destruction de tous ces habitats naturels a engendré une chute drastique de la biodiversité [52]. Pour accroître le rendement des cultures, la consommation en engrais chimiques et en pesticides s’est de même fortement accrue. Après plusieurs décennies d’un tel régime, les terres se sont appauvries. De même le ruissellement des eaux de pluie a dépouillé les reliefs de leur terre arable, indispensable à la croissance des plantes. Conséquence de ces déséquilibres, la faune prédatrice des insectes a été la première à en pâtir. Les insectes nuisibles n’étant plus régulés par leurs ennemis naturels, les agriculteurs ont dû consommer plus d’insecticides. Or ces apports réguliers en engrais et substances biocides sur l’ensemble des territoires agricoles ont joué et jouent encore de nos jours un rôle capital dans la pullulation des moustiques [20,46,53].

### L’impact des engrais sur les adultes de moustiques

Les engrais sont des associations de minéraux destinées à apporter aux plantes les compléments nutritifs nécessaires à leur croissance. Ils sont le plus souvent incorporés à même les sols, mais ils peuvent être aussi véhiculés par les eaux d’irrigation ou bien directement pulvérisés sur le feuillage des végétaux [33]. Les engrais modernes de type NPK combinent de l’azote (N), du phosphore (P) et du potassium (K). Si l’agriculture intégrée recommande une utilisation raisonnée des engrais chimiques, il n’en demeure pas moins qu’aujourd’hui encore 180 millions de tonnes sont utilisées chaque année dans le monde [32]. Dans les villes et les quartiers résidentiels, les engrais chimiques sont utilisés par les jardiniers amateurs et les ménages pour fertiliser les jardins et les plantes en pots. Des recherches conduites sur *Ae. aegypti* ont révélé que des eaux contenant des engrais NPK attiraient les femelles de moustiques à la recherche d’un lieu de ponte. Les eaux les plus attractives sont celles qui contiennent de 17 à 33 mg/l d’azote et de potassium et 23 à 47 mg/l de phosphore. En revanche, des concentrations trop faibles ou bien trop élevées en fertilisant n’engendrent pas le moindre effet attractif [17]. Dans les environnements urbains, les collections d’eau pouvant contenir des engrais sont nombreuses, mais les soucoupes sous les pots de fleurs sont assurément parmi les gîtes les mieux placés pour en contenir des quantités attractives pour les moustiques. Pendant l’épidémie de chikungunya qui a sévi sur l’île de la Réunion en 2006, ces soucoupes représentaient 44 % des

gîtes recensés positifs en larves et en nymphes d'*Ae. albopictus* [27]. En France métropolitaine et en particulier dans le sud-est du pays, les soucoupes placées sous les pots de fleurs représentent 19 % des gîtes colonisés par *Ae. albopictus* [30]. Au Brésil et en Argentine, les soucoupes totalisent de 4 à 14 % de l'ensemble des gîtes positifs en *Ae. aegypti* [42,14]. Parmi les autres moustiques d'intérêt médical, *Anopheles gambiae*, le vecteur majeur du paludisme en Afrique, prolifère dans la plupart des cultures irriguées. Dans les rizières, les densités les plus élevées en larves d'anophèles sont observées peu après l'épandage des engrais au moment du repiquage [46]. Un phénomène similaire de pullulation de *Culex tritaeniorhynchus*, principal vecteur du virus de l'encéphalite japonaise, a été observé peu après la fertilisation de casiers rizicoles localisés dans le sud de l'Inde [53]. Ces phénomènes d'attraction à la ponte, observés de la simple coupelle à l'échelle du paysage, dépendent donc en grande partie, de la composition physico-chimique et biologique des lieux de vie des moustiques [4,5,17-20].

En plus de leur influence sur le comportement de ponte des moustiques, les engrais agissent sur la fertilité des femelles. Une étude réalisée avec *Ae. albopictus* a montré que lorsque les adultes de ce moustique absorbaient une solution sucrée contenant un engrais, le nombre d'œufs pondus par les femelles s'en trouvait très significativement augmenté [24]. Ce volume de ponte plus important pourrait s'expliquer par la cinétique de l'azote, du phosphore et du potassium à l'intérieur de l'insecte. L'azote est l'atome le plus abondant dans la chimie du vivant après le carbone. Le phosphore est assimilé par les cellules pour la synthèse des acides nucléiques et des phospholipides, alors que le potassium est plus spécifiquement impliqué dans la synthèse des protéines [43]. En plus du sucre riche en carbone et à forte valeur énergétique, l'ingestion simultanée de NPK par les femelles de moustiques pourrait constituer au moment de leur cycle gonotrophique un apport en sels minéraux qui aurait la capacité de dynamiser la synthèse des protéines et des acides nucléiques et donc, au final, de générer un volume d'œufs plus important.

### L'impact des engrais sur les larves de moustiques

Même si les larves de moustiques se développent dans une myriade de collections d'eau différentes, il existe des facteurs liés à la qualité de l'eau qui font que certaines d'entre-elles sont plus favorables à leur croissance. Le développement des larves de moustiques est surtout assujéti à la quantité et à la qualité des ressources alimentaires disponibles [20,22,26,39,45]. Dans les gîtes d'extérieur, les débris végétaux et les cadavres de petits animaux qui tombent dans l'eau sont consommés par les larves. Lorsqu'une eau se

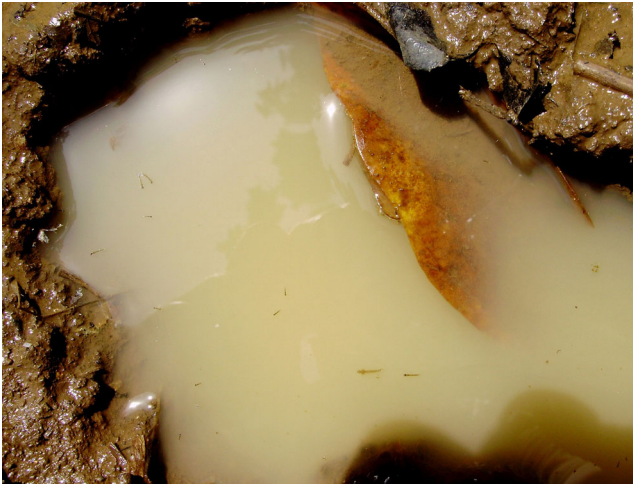
retrouve contaminée par un engrais, le mélange d'azote, de phosphore et de potassium provoque l'apparition d'une biomasse additionnelle constituée d'algues, de bactéries et de champignons [35]. Les larves de moustiques exploitent ce surplus de nutriments pour croître et proliférer. Dans les sites qui contiennent du NPK, les taux de survie des moustiques sont 2 à 3 fois supérieurs aux collections d'eau qui n'en contiennent pas. De même dans les gîtes pollués par ces intrants, la vitesse de croissance des larves est 2 à 4 fois plus rapide que dans les eaux qui en sont dépourvues [25]. Cet apport supplémentaire de nutriments dans le gîte est crucial pour les larves dans la mesure où celles-ci ne digèrent pas la cellulose [12]. D'autre part, si les larves vivent dans des gîtes de moyens à grands volumes (citernes et fûts pour *Ae. aegypti* et *Ae. albopictus* ; rizières pour *An. gambiae* et *Cx. tritaeniorhynchus*), elles peuvent aussi se développer dans des petites collections d'eau très sensibles au tarissement (Fig. 4 et 5). Cette vitesse de croissance accélérée des larves de moustiques fait que ces dernières peuvent se nymphoser et donner des adultes avant que le gîte ne s'assèche totalement.

### L'impact des combinaisons engrais + insecticides sur la biologie des moustiques

Dans les régions de monoculture intensive, les agriculteurs éliminent les ravageurs avec des substances insecticides.



**Fig. 4** Les soucoupes placées sous les pots de fleurs constituent des petites collections d'eau urbaines fréquemment colonisées par *Aedes aegypti* et/ou *Aedes albopictus* - Pérols, France (2012) / The dishes under the flower pots provide small urban water collections that are often populated with *Aedes aegypti* and/or *Aedes albopictus* - Pérols, France (2012) (© F. Darriet).



**Fig. 5** Une petite flaque ensoleillée où vivent différents stades larvaires d'*Anopheles gambiae* - Mayotte (2010) / A little sunlit puddle where all larval stages of *Anopheles gambiae* can be found - Mayotte (2010) (© F. Darriet).

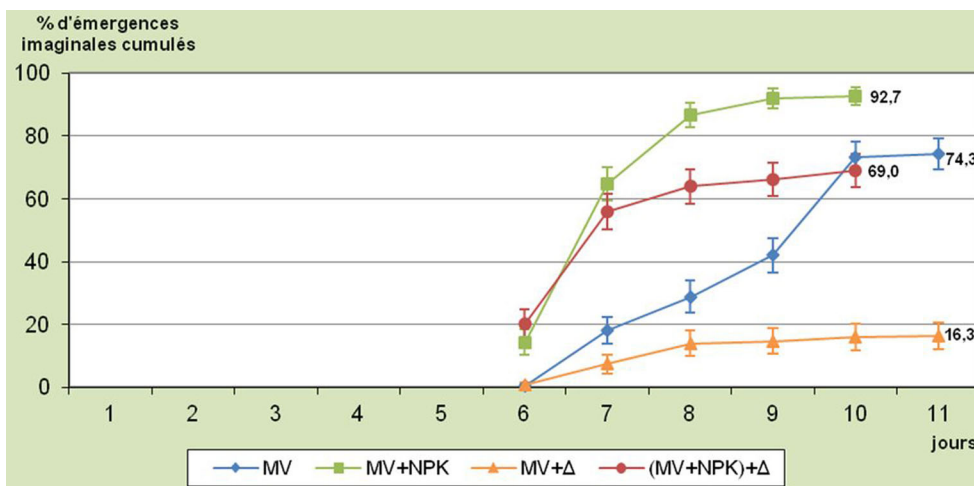
L'utilisation répétée de ces composés sur de grandes surfaces favorise l'apparition des résistances, à la fois chez les ravageurs et chez les moustiques, tout en entraînant la destruction de la faune non cible [31]. Attirés par les engrais, les femelles de moustiques viennent pondre en masse dans les eaux qui en contiennent et donc, inévitablement, des quantités très importantes de larves subissent l'action toxique des insecticides. La pression de sélection est élevée et les mécanismes de résistance présents chez les moustiques se retrouvent sélectionnés d'autant plus rapidement que la fréquence des fumures minérales et des traitements phytosanitaires est soutenue. Pour mieux comprendre les actions combinées que génèrent les engrais et les insecticides sur la biologie des moustiques, il a été conduit en laboratoire, une étude sur une population d'*An. gambiae* résistante aux pyréthrinoides. Au cours de cette expérience, les larves se sont développées dans des environnements contenant de la matière végétale seule ou bien mise en présence d'engrais NPK à la concentration de 17-23-17 mg/l. Pour mesurer l'impact d'un traitement insecticide selon la composition des milieux, les larves d'anophèles ont été mises en contact avec de la deltaméthrine ( $\Delta$ ) au stade 3 de leur développement [20]. La dose de 2,5 g de deltaméthrine par hectare retenue pour l'étude est celle usuellement utilisée dans les rizières pour lutter contre la galle du riz *Orseolia oryzivora* (Diptera: Cecidomyiidae) [15]. Les bioessais ont montré que les eaux qui contiennent 5 g de matière végétale par litre d'eau (MV) alimentent, normalement, la centaine de larves présentes dans chaque gîte (Fig. 6). En favorisant la croissance des algues et des bactéries, l'engrais apporte un complément nutritionnel aux larves qui se traduit par un plus grand nombre d'adultes émergents. Dans la mesure où ces milieux riches en nutriments ne géné-

rent pas de stress alimentaire, l'impact du traitement insecticide a suivi un schéma de sélection traditionnel qui s'est exprimé par une réduction du nombre des adultes. Dans les collections d'eau qui n'ont contenu que moitié moins de matière végétale (2,5 g par litre d'eau), la pression de sélection induite par l'insecticide s'est traduite par une dynamique très différente du moustique (Fig. 7). Une quantité égale à 2,5 g de matière végétale par litre d'eau ne suffit pas à nourrir la centaine de larves présentes dans chaque gîte et l'addition de NPK dans l'eau ne crée pas, cette fois, de situation plus favorable. Traiter les gîtes à la deltaméthrine inverse toutefois la situation en donnant aux larves qui survivent à l'action de l'insecticide, l'occasion de se partager le peu de nourriture disponible et de poursuivre ainsi leur développement jusqu'au stade de l'adulte [20].

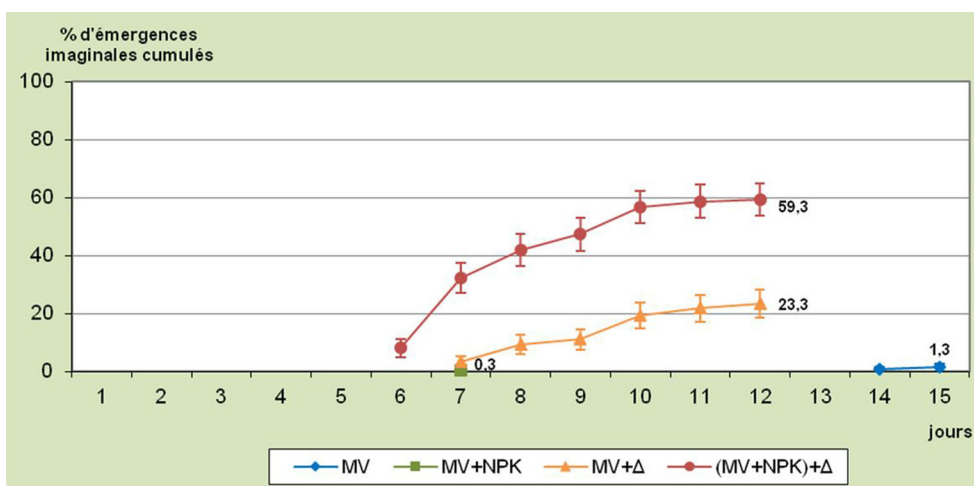
Cette pression de sélection induite par la molécule biocide, qui au final transforme un gîte impropre à la survie des moustiques en un gîte productif, ne peut être observée que dans les endroits où les moustiques sont résistants aux insecticides. La résistance aux insecticides s'accompagne d'un effet appelé « coût génétique » qui affecte les performances biologiques des moustiques. La mutation acétylcholinestérase insensible (*Ace.1<sup>R</sup>*) à l'origine de la résistance aux insecticides organophosphorés et carbamates induit un coût génétique élevé. La mutation Knock-down résistance (*Kdr*) qui est responsable de la résistance croisée entre les insecticides pyréthrinoides et DDT génère à l'inverse un coût génétique faible. Il existe néanmoins dans la nature des moustiques double mutants (*Ace.1<sup>R</sup> + Kdr*) qui résistent à l'action toxique de la plupart des insecticides conventionnels tout en affichant dans les milieux non traités, des aptitudes à la survie supérieures à leurs homologues sensibles [6]. À la lumière de toutes ces observations, il ne fait plus aucun doute que l'utilisation pas toujours raisonnée des pesticides et des engrais en agriculture crée des situations écologiques nouvelles, favorables à la pullulation des moustiques. Limiter leur prolifération dans de tels environnements devient une urgence de santé publique. Mais encore faudrait-il élaborer des stratégies de lutte innovantes, faciles à utiliser, bien acceptées par les populations et les communautés paysannes et dotées d'un coût raisonnable, tant pour les agriculteurs que pour les services de lutte antivectorielle.

### Une stratégie de lutte innovante qui associe un insecticide à un engrais

Le seul moyen pour que les gîtes larvaires – qu'ils soient urbains ou agricoles – produisent moins de moustiques est d'ajouter à l'engrais qui fertilise les milieux de croissance des plantes, un larvicide chimique ou biologique qui tue les larves dès l'éclosion des œufs. L'évaluation du concept engrais + larvicide dans des coupelles placées sous les pots



**Fig. 6** Pourcentages cumulés d'adultes mâles et femelles d'*Anopheles gambiae* résistants aux pyréthrinoïdes. Les larves ont évolué dans des milieux contenant de la matière végétale (MV) seule ou en combinaison avec un engrais NPK, traités ou non avec l'insecticide deltaméthrine ( $\Delta$ ) / *The cumulated percentages of males and female adults of Anopheles gambiae* pyrethroid resistant. The larvae were raised in environments containing plant matter (PM) alone or in combination with a NPK fertilizer, treated with deltamethrine or not ( $\Delta$ ).



**Fig. 7** Pourcentages cumulés d'adultes mâles et femelles d'*Anopheles gambiae* résistants aux pyréthrinoïdes. Les larves ont évolué dans des milieux contenant de la matière végétale (MV) seule ou en combinaison avec un engrais NPK, traités ou non avec l'insecticide deltaméthrine ( $\Delta$ ) / *The cumulated percentages of males and female adults of Anopheles gambiae* pyrethroid resistant. The larvae were raised in environments containing plant matter (PM) alone or in combination with a NPK fertilizer, treated with deltamethrine or not ( $\Delta$ ).

de fleurs a montré que la composition NPK + spinosad est restée efficace pendant 30 jours, avec l'émergence de moins de 5 % d'adultes d'*Ae. aegypti*. Évaluées selon les mêmes modalités expérimentales, les combinaisons NPK + pyriproxyfen et NPK + diflubenzuron se sont montrées efficaces pendant 45 jours [23]. Le spinosad est un bio-insecticide (famille des naturalites) synthétisé par la bactérie *Saccharopolyspora spinosa* (actinomycètes). Cette substance neurotoxique se fixe sur les récepteurs GABA et nicotiques du neurone, entraînant la paralysie de l'insecte [50]. Le pyriproxyfen est un analogue d'hormone juvénile qui se caractérise

par une action quasi sélective sur les nymphes [38]. Enfin, le diflubenzuron est un inhibiteur de croissance des insectes qui agit par ingestion et perturbe l'étape de la polymérisation de la chitine [44]. Ces trois larvicides sont recommandés par l'OMS pour détruire les moustiques qui vivent à l'intérieur des réservoirs d'eaux potables et autres contenants domestiques [55-57]. De telles compositions engrais + larvicides permettraient l'élimination automatique et sélective des larves de moustiques présentes dans les sous-pots de fleurs à chaque fois que l'utilisateur distribue de l'engrais à ses plantes. Un nombre incalculable de collections d'eau colonisées

par les moustiques pourraient être ainsi détruites sans occasionner de pollution environnementale. Cette mesure de protection individuelle innovante, sans danger pour l'homme et les animaux, viendrait en appui aux actions communautaires dispensées par les services institutionnels de lutte antivectorielle. Un enjeu d'autant plus considérable que l'aire de distribution d'*Ae. albopictus* ne cesse de s'étendre dans l'ensemble des régions tropicales et tempérées [8,10].

Cette stratégie de lutte pourrait être également adaptée aux milieux agricoles. Pour contrer la prolifération des moustiques dans les cultures irriguées, la lutte intégrée préconise la diminution du nombre des traitements insecticides [54]. Il en résulte, c'est vrai, des pressions de sélection moins grandes sur les ravageurs et les moustiques ; néanmoins, si l'agriculteur diminue sa consommation en insecticides, il lui faudra dans le même temps abaisser sa consommation en engrais pour ne pas voir ses cultures produire plus de moustiques encore. Pour éviter une telle pullulation, il suffirait d'incorporer à l'engrais épandu dans les champs un insecticide systémique, dont les candidats possibles seraient sélectionnés pour n'avoir qu'un faible impact sur la faune non cible. Ces insecticides systémiques doivent de surcroît répondre aux critères de la législation européenne, très exigeants en matière d'innocuité pour l'homme et l'environnement. Or les législations qui encadrent l'utilisation des pesticides ne sont pas les mêmes selon les pays et les continents et il est très difficile de concevoir des méthodes de lutte innovantes acceptables à un niveau mondial. Il est néanmoins attendu d'une association engrais + insecticide systémique, trois effets simultanés (i) l'engrais fertilise les milieux de croissance de la plante, (ii) l'insecticide élimine les larves de moustiques qui prolifèrent dans les cultures irriguées, (iii) le même insecticide tue les ravageurs qui déprécient le végétal. Ce nouveau concept de lutte s'insérerait de surcroît dans l'initiative « One Health » qui préconise une approche holistique, transdisciplinaire et multisectorielle de la santé de l'homme, des animaux domestiques et des plantes [29]. Cette stratégie de lutte actuellement en cours d'évaluation dans les laboratoires de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) de Montpellier permettrait aux agronomes, aux agriculteurs et aux acteurs de la santé publique de réfléchir ensemble à des actions de lutte commune, financièrement et techniquement bénéfiques aux trois parties.

## De l'urgence d'une politique commune entre santé publique et agriculture

Dans la mesure où l'interface agriculture/santé publique humaine et animale ne relève ni des compétences de l'agriculteur, ni de celles des services de la lutte antivectorielle, il apparaît à ce niveau un champ de recherche encore aujourd'hui

d'explorer. Un tel partenariat entre les agronomes, les agriculteurs et les services de démoustication créerait une synergie à même d'initier des programmes de recherches pluridisciplinaires, dont la finalité serait de protéger les cultures tout en visant à réduire au mieux, les densités de moustiques agressifs pour l'Homme [21,29]. La réduction des densités de moustiques à l'intérieur des périmètres agricoles diminuerait l'incidence des maladies à transmission vectorielle. Au-delà du domaine des moustiques, les engrais peuvent aussi avoir un impact important sur la croissance des gastéropodes vecteurs de bilharzioses dont on sait que les niveaux de prolifération dépendent étroitement de la quantité de végétaux présents dans leurs milieux de vie [47]. De même, il serait pertinent de chiffrer les niveaux de pullulation des rongeurs en fonction des techniques culturales, sachant que ces animaux partagent avec l'homme un grand nombre d'agents infectieux [28]. Plus inquiétant encore est la disparition des abeilles dans de nombreux pays du monde, les experts apicoles ayant maintenant la certitude que le syndrome d'effondrement des colonies est en grande partie lié à l'exposition chronique de ces insectes aux substances agrochimiques [34].

« De l'urgence d'une politique commune entre santé publique et agriculture » : cette démarche est désormais plus pressante que jamais. Si un tel rapprochement des compétences arrivait un jour à se construire, il fournirait aux agronomes, aux agriculteurs et aux services de lutte antivectorielle des approches de lutte nouvelles, associant dans une action commune, santé publique et agriculture.

**Liens d'intérêts** L'auteur déclare ne pas avoir de liens d'intérêts.

## Références

1. Akiner MM, Demirci B, Babuadze G, et al (2016) Spread of the Invasive Mosquitoes *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* in the Black Sea Region Increases Risk of Chikungunya, Dengue, and Zika Outbreaks in Europe. *PLoS Negl Trop Dis* 10(5):e0004764. doi: 10.1371/journal.pntd.0004764
2. Barbazan P, Baldet T, Darriet F, et al (1997) Control of *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae) with *Bacillus sphaericus* in Maroua, Cameroun. *J Am Mosq Control Assoc* 13(3):263–9
3. Barnosky AD, Matzke N, Tomiya S, et al (2011) Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471(7336):51–7. doi: 10.1038/nature09678
4. Barrera R, Amador M, Clark GG (2006). Ecological factors influencing *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) productivity in artificial containers in Salinas, Puerto Rico. *J Med Entomol* 43(3):484–92
5. Bentley MD, Day JF (1989) Chemical ecology and behavioral aspects of mosquito oviposition. *Annu Rev Entomol* 34:401–21
6. Berticat C, Bonnet J, Duchon S, et al (2008) Costs and benefits of multiple resistance to insecticides for *Culex quinquefasciatus* mosquitoes. *BMC Evol Biol* 8:104. doi: 10.1186/1471-2148-8-104

7. Blondel J (2005) La biodiversité sur la flèche du temps. *Natures Sciences Sociétés* 3(13):296–301
8. Bonizzoni M, Gasperi G, Chen X, James AA (2013) The invasive mosquito species *Aedes albopictus*: current knowledge and future perspectives. *Trends Parasitol* 29(9):460–8. doi: 10.1016/j.pt.2013.07.003. Epub 2013 Aug 3
9. Boudjelas S, Browne M, De Poorter M, Lowe S (2007) 100 espèces exotiques envahissantes parmi les plus néfastes au monde : une sélection de la Global invasive species database. 12 p
10. Caminade C, Medlock JM, Ducheyne E, et al (2012) Suitability of European climate for the Asian tiger *Aedes albopictus*: recent trends and future scenarios. *J R Soc Interface* 99(75):2708–17. doi: 10.1098/rsif.2012.0138. Epub 2012 Apr 25
11. Ceballos G, Ehrlich PR, Barnosky, AD, et al (2015) Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Sci Adv* 1(5):e1400253. doi: 10.1126/sciadv.1400253. eCollection 2015 Jun
12. Clements AN (2000) The biology of mosquitoes. Development, nutrition and reproduction. CABI publishing, Eastbourne, 5323 p
13. Cordellier R, Germain M, Hervy JP, Mouchet J (1977) Guide pratique pour l'étude des vecteurs de fièvre jaune en Afrique et méthode de lutte. Paris, Orstom Éditions, Initiation-Documents techniques. 117 p
14. Costa F, Fattore G, Abril M (2012) Diversity of containers and buildings infested with *Aedes aegypti* in Puerto Iguazú, Argentina. *Cad Saúde Pública* 28(9):1802–6.
15. Dakouo D, Nacro S (1987) Chemical control of African rice gall midge (GM) *Orseolia oryzivora*. *International Rice Research Newsletter* 12(3):38
16. Darriet F, Robert V, Carnevale P (1987) Évaluation de trois inhibiteurs de croissance, deux ecdysoïdes et un juvénoloïde, dans la lutte contre *Culex quinquefasciatus*. *Cahiers Orstom, série Entomologie médicale et Parasitologie* 25(34):119–26
17. Darriet F, Corbel V (2008) Influence des engrais de type NPK sur l'oviposition d'*Aedes aegypti*. *Parasite* 15(1):89–92
18. Darriet F, Corbel V (2008) Propriétés attractives et modifications physicochimiques des eaux de gîtes colonisées par des larves de *Aedes aegypti* (Diptera : Culicidae). *C R Biol* 331(8):617–22
19. Darriet F, Zumbo B, Corbel V, Chandre F (2010) Influence des matières végétales et des engrais NPK sur la biologie de *Aedes aegypti* (Diptera : Culicidae). *Parasite* 17(2):149–54
20. Darriet F, Rossignol M, Chandre F (2012) The combination of NPK fertilizer and deltamethrin insecticide favors the proliferation of pyrethroid-resistant *Anopheles gambiae* (Diptera: Culicidae). *Parasite* 19(2):159–64
21. Darriet F (2014) Des moustiques et des hommes. *Chronique d'une pullulation annoncée*. IRD Éditions, collection Didactiques, Marseille. 136 p
22. Darriet F (2016) Development of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* (Diptera : Culicidae) larvae feeding on the plant material contained in the water. *Ann Community Med Pract* 2(1):1014
23. Darriet F (2016) An anti-mosquito mixture for domestic use, combining a fertiliser and a chemical or biological larvicide. *Pest Manag Sci* 72(7):1340–5. doi: 10.1002/ps.4157. Epub 2015 Oct 19
24. Darriet F (2018) Les substrats sucrés contaminés par les intrants agricoles favorisent la prolifération du moustique *Aedes albopictus* (Diptera : Culicidae). *Bull Soc Pathol Exot* 111(4):205–211. doi: 10.3166/bspe-2018-0042
25. Darriet F (2018) Synergistic effect of fertilizer and plant material combinations on the development of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) and *Anopheles gambiae* (Diptera: Culicidae) Mosquitoes. *J Med Entomol* 55(2):496–500. doi: 10.1093/jme/tjx231
26. Daugherty MP, Alto BW, Juliano SA (2000) Invertebrate carcasses as a resource for competing *Aedes albopictus* and *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *J Med Entomol* 37(3):364–72
27. Delatte H, Dehecq J, Thiria J, et al (2008) Geographic distribution and developmental sites of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) during a chikungunya epidemic event. *Vector Borne Zoonotic Dis* 8(1):25–34. doi: 10.1089/vbz.2007.0649
28. Delattre P, Duplantier JM, Fichet-Calvet E, et al (1998) Pullulation de rongeurs, agriculture et santé publique. *Cahiers Agricultures* 7:285–98
29. Destoumieux-Garzon D, Mavingui P, Boetsch G, et al (2018) The One Health Concept: 10 Years Old and a Long Road Ahead. *Front Vet Sci* 5:14. doi: 10.3389/fvets.2018.00014. eCollection 2018.
30. EID (2016) Surveillance du moustique *Aedes albopictus* en France métropolitaine. Bilan 2015. Montpellier. 47 p
31. FAO (2004) Aquatic biodiversity in rice field. International year of rice. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2 p
32. FAO (2012) Current world fertilizer trends and outlook to 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 43 p
33. Fernández V, Brown PH (2013) From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Front Plant Sci* 4:289. doi: 10.3389/fpls.2013.00289. eCollection 2013
34. Goulson D, Nicholls E, Botias C, Rotheray EL (2015) Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science* 347(6229):1255957. doi: 10.1126/science.1255957. Epub 2015 Feb 26
35. Hao XH, Hu RG, Wu JS, Tang SR, et al (2010) Effects of long-term fertilization on paddy soils organic nitrogen, microbial biomass, and microbial functional diversity. [article en chinois] *J Appl Ecol* 21(6):1477–84
36. Hayes EB (2009) Zika virus outside Africa. *Emerg Infect Dis* 15(9):1347–50. doi: 10.3201/eid1509.090442
37. Hulme PE (2014) Invasive species challenge the global response to emerging diseases. *Trends Parasitol* 30(6):267–70. doi: 10.1016/j.pt.2014.03.005
38. Ishaaya I, Horowitz AR (1992) Novel Phenoxy Juvenile Hormone Analog (Pyriproxyfen) Suppresses Embryogenesis and Adult Emergence of Sweetpotato Whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). *J Econ Entomol* 85(6):2113–7. doi: 10.1093/jee/85.6.2113
39. Juliano SA (2009) Species interactions among larval mosquitoes: Context dependence across habitats gradients. *Annu Rev Entomol* 54:37–56. doi: 10.1146/annurev.ento.54.110807.090611
40. Kunzig R (2011) Population 7 billion. *National Geographic* 219:32–69
41. Leakey RE, Lewin R (1995) La sixième extinction. Évolution et catastrophes. Éditions Flammarion, Collection Champs (1997), Paris, 352 p
42. Maciel-de-Freitas R, Louenço-de-Oliveira R (2011) Does targeting key-containers effectively reduce *Aedes aegypti* population density? *Trop Med Intl Health* 16(8):965–73. doi: 10.1111/j.1365-3156.2011.02797.x. Epub 2011 May 23
43. Madigan M, Martinko J (2007) Biologie des micro-organismes. 11e édition, Pearson Education Editions, Paris. 1047 p
44. Matsumura F (2010) Studies on the action mechanism of benzoylurea insecticides to inhibit the process of chitin synthesis in insects: a review on the status of research activities in the past, the present and the future prospects. *Pestic Biochem phys* 97(2):133–9. doi: 10.1016/j.pestbp.2009.10.001
45. Murrell EG, Damal K, Lounibos LP, Juliano SA (2011) Distributions of Competing Container Mosquitoes Depend on Detritus Types, Nutrient Ratios, and Food Availability. *Ann Entomol Soc Am* 104(4):688–698
46. Mwangangi JM, Muturi EJ, Shililu J, et al (2006). Survival of immature *Anopheles arabiensis* (Diptera: Culicidae) in aquatic habitats in Mwea rice irrigation scheme, central Kenya. *Malar J* 5:114



47. Ndione RA, Diop D, Riveau G, Ba CT, et al (2018) Rôle des paramètres environnementaux sur la densité des mollusques hôtes intermédiaires des schistosomes humains au cours de l'année 2014 dans la commune de Richard-Toll, Sénégal. *Méd Santé Trop* 28(2):158–64
48. Reiter P (2010) Yellow fever and dengue: a threat to Europe? *Euro Surveill* 15(10):19509
49. Salem G, Fournet F (2018) Urbanisation et santé en Afrique : défis pour plus d'équité. *Med Santé Trop* 28(3):228–229. doi: 10.1684/mst.2018.0808
50. Salgado VL (1998) Studies on the mode of action of spinosad: insect symptoms and physiological correlates. *Pestic Biochem and Physiol* 60:91–102. doi: 10.1006/pest.1998.2332
51. Shackleton RT, Shackleton CM, Kull CA (2019) The role of invasive alien species in shaping local livelihoods and human well-being: A review. *J Environ Manage* 229:145–157. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.05.007. Epub 2018 Jul 23
52. Taubert M (2007) Politiques environnementales et agriculture in L'agriculture, nouveaux défis, INSEE Références - édition 2007 pp. 207-212
53. Victor TJ, Reuben R (2000) Effects of organic and inorganic fertilizers on mosquito populations in rice fields of southern India. *Med Vet Entomol* 14(4):361–8
54. WHO (2006) Evaluation of the integrated pest and vector management (IPVM) project in Sri Lanka. Mission report, Geneva. 54 p
55. WHO (2008) Diflubenzuron in drinking-water: Use for vector control in drinking-water sources and containers. Document WHO/HSE/AMR/08.03/6, Geneva. 5 p
56. WHO (2008) Pyriproxyfen in drinking-water: Use for vector control in drinking-water sources and containers. Document WHO/HSE/AMR/08.03/9, Geneva. 13 p
57. WHO (2010) Spinosad DT in drinking-water: Use for vector control in drinking-water sources and containers. Document WHO/HSE/WSH/10.01/12, Geneva. 15 p