

# Écosystèmes, entomologie et lutte anti-vectorielle

**L'expérience prouve que le contrôle des maladies à vecteurs est très rarement obtenu par une approche unique, que ce soit la lutte contre les vecteurs, la lutte contre les agents pathogènes ou le contrôle des réservoirs, et que seule une approche intégrée est réaliste. Les nouvelles connaissances et les nouvelles technologies nous offrent des opportunités exceptionnelles de faire un bond en avant vers une lutte anti-vectorielle ciblée, respectueuse de l'environnement, acceptée par la population.**

par Didier FONTENILLE\*

Le monde change. Il a toujours changé, mais les modifications s'accroissent. Les écosystèmes, qui hébergent homme, animaux, agents pathogènes et vecteurs, évoluent. Les médias s'intéressent régulièrement aux conséquences de ces changements, climatiques en premier lieu, sur l'émergence ou l'évolution de maladies transmises par vecteurs, telles que le paludisme, la dengue, le chikungunya, West Nile, et d'autres encore. Qu'en est-il exactement ? Joue-t-on à se faire peur, ou le risque est-il réel ? Peut-on prévoir les conséquences des changements ? Comment prendre en compte la composante environnementale ? Comment anticiper et répondre, en termes de santé publique ? Pour aborder ces questions, cet article insistera plus particulièrement sur quelques maladies dont les vecteurs sont des moustiques.

## Le vecteur, composante de l'écosystème

Un vecteur n'est pas un simple « transporteur » d'agents pathogènes. Il s'infecte en prélevant le virus, la bactérie, la rickettsie, le parasite protozoaire ou helminthe sur un animal porteur, au cours d'un repas de sang. A l'issue d'une période de développement extrinsèque, généralement d'une durée de 5 à 15 jours, au cours de laquelle l'agent pathogène se réplique ou se transforme, le vecteur le transmet à un nouvel hôte vertébré. Les vecteurs ne vont donc transmettre que des parasites sanguins ou dermiques. Seules quelques familles d'invertébrés, parmi les insectes et les acariens hématophages, sont concernées. En revanche, les modes de transmission sont variés, les plus fréquents étant par piqûre (paludisme, chikungunya, maladie du sommeil...), par déjection (maladie de Chagas, rickettsioses) ou régurgitation (peste). L'étude de ces vecteurs constitue l'entomologie médicale et vétérinaire.

Les étudiants en médecine tropicale ou en entomologie apprennent que, pour que la transmission s'opè-

re, il faut faire ménage à trois : l'agent pathogène, l'hôte vertébré et le vecteur. Si cette condition est nécessaire, elle est loin d'être suffisante. En effet, pour qu'un moustique soit un bon vecteur, il doit piquer l'homme, il doit vivre longtemps et les parasites ou virus doivent pouvoir se répliquer dans son organisme. L'anthropophilie d'un moustique va dépendre de facteurs génétiques intrinsèques, certaines espèces préférant se nourrir sur animaux, mais surtout des opportunités de contact avec l'homme (présence de gîtes larvaires près des habitations, maisons peu protégées des moustiques, comportement « à risque » de l'homme, utilisation de répulsifs). La longévité d'un vecteur va également dépendre de facteurs génétiques, mais surtout de l'environnement, y compris climatique (hygrométrie, température) et, bien sûr, d'une éventuelle lutte anti-vectorielle ou de la présence de prédateurs ou parasites de moustiques. L'efficacité de la transmission dépend donc de nombreuses variables environnementales agissant sur les populations de vecteurs, de parasites, d'hôtes, adaptées à un moment donné à leur biotope, lui-même en perpétuel changement. L'étude des insectes vecteurs est ainsi une composante de l'éco-épidémiologie.

Une manière de quantifier la transmission d'un agent pathogène par un vecteur est la mesure du taux de reproduction de base. Celui-ci, initialement défini par MacDonald en 1957 [1], correspond au nombre de cas secondaires issus d'un cas primaire. Il peut être, de manière simplifiée, caractérisé par la formule suivante :  $R_0 = (m \cdot a^2 \cdot p^n) / (-\ln p) \cdot b \cdot c \cdot 1/r$ , où  $m$  est le nombre de moustiques en relation un homme donné,  $a$  le nombre de piqûres sur un homme pour un moustique donné par jour,  $p$  le taux de survie quotidien des moustiques d'une population donnée,  $n$  la durée de développement de l'agent pathogène chez le vecteur,  $b$  la compétence vectorielle (mesurée expérimentalement comme le pourcentage de moustiques qui répliquent et peuvent transmettre l'agent pathogène),  $c$

l'efficacité de la transmission de l'homme au moustique, et  $1/r$  la durée, en jours, de la période infectieuse pour le vecteur chez l'homme.

Les variables  $m$ ,  $a$ ,  $p$ ,  $n$  dépendent toutes de l'environnement et du climat : nature et abondance des gîtes larvaires liés à la pluviométrie, densité de moustiques et vitesse de développement du parasite ou du virus dépendant de la température, contact entre l'homme et la moustique fonction de l'environnement anthropique, etc. On comprend dès lors qu'il est impossible de déconnecter la transmission de son cadre environnemental.

### La lutte anti-vectorielle : une intrusion dans les écosystèmes

Le DDT a été le premier insecticide industriel à être utilisé à grande échelle en santé publique et en agriculture après 1939. On sait que cette molécule organochlorée est toxique, qu'elle s'accumule dans les chaînes alimentaires, et que de nombreux insectes ont sélectionné des résistances à cet insecticide. Bien qu'il reste utilisable dans des situations épidémiques et selon des protocoles évitant son accumulation dans l'environnement, il a été progressivement remplacé par des produits considérés comme moins polluants, tels que les pyréthrinoïdes. Lors de l'épidémie de chikungunya à l'île de La Réunion, les insecticides d'abord utilisés ont été le téméphos contre les larves et le fénitrothion contre les adultes, tous deux de la famille des organophosphorés. Une campagne de presse vigoureuse et une forte mobilisation des habitants et des apiculteurs (qui signalaient une mortalité excessive chez les abeilles) contre ces produits, pourtant recommandés par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a conduit à leur remplacement par d'autres biocides réputés ou espérés moins toxiques : le Bti (*Bacillus thuringiensis israelensis*) et la deltaméthrine. Ces deux exemples montrent qu'il est nécessaire d'envisager des stratégies alternatives aux insecticides actuels ou à leur méthode d'utilisation, soit en raison de leur réel potentiel polluant soit en raison de leur non-acceptabilité par les populations. L'insecticide qui serait spécifique de l'espèce cible, efficace, sans résistance chez les insectes, non polluant, non assimilable dans les chaînes trophiques, bon marché et facilement utilisable n'existe pas, mais les recherches doivent avoir comme objectif ce produit idéal.

### Quelques exemples de maladies environnement-dépendantes transmises par moustiques

**Le paludisme** est dû à un parasite sanguin du genre *Plasmodium*, transmis par des moustiques du genre *Anopheles*. Le paludisme, avec ses 4 espèces de parasites *P. falciparum*, *P. malariae*, *P. vivax* et *P. ovale*, est présent sur tous les continents, mais c'est en Afrique

intertropicale qu'il est le plus abondant, tuant environ un million d'enfants chaque année. Parmi les 3 500 espèces de moustiques décrites dans le monde, environ 500 sont des anophèles et soixante sont considérées comme vecteur de *Plasmodium* à l'homme. Ces espèces sont généralement nocturnes et elles pondent leur œufs dans des gîtes aquatiques très divers, d'origine naturelle ou créés par l'homme : ornières de bord de route, flaques d'eau, bord de rivières, puits d'irrigation, marécages, rizières, etc. Le paludisme était fréquent en Europe jusqu'au début du siècle dernier. Ce sont des mesures combinées d'utilisation de médicaments, d'aménagement de l'environnement, en particulier de drainage, de lutte anti-vectorielle et d'amélioration de l'habitat, qui ont conduit à l'éradication de cette maladie en Europe [2]. Les anophèles vecteurs potentiels restent cependant très abondants dans les zones marécageuses, mais étant maintenant peu en contact avec l'homme, et ayant une aptitude réduite à transmettre les *Plasmodium* importés, le risque de réimplantation du paludisme en Europe est considéré comme nul, même en cas de changement climatique.

**La dengue et le chikungunya** : L'incidence de la dengue, transmise par les moustiques anthropophiles et adaptés à l'environnement urbain *Aedes aegypti* et *Ae. albopictus*, est en augmentation dans le monde. Aucun vaccin ni traitement n'est disponible et la lutte contre les vecteurs reste la seule méthode disponible pour diminuer la transmission. Le virus chikungunya (CHIKV) est connu en Afrique depuis 1953, et des épidémies ayant *Ae. aegypti* comme vecteur ont été observées, dès 1963, en Inde. Comme pour la dengue, il n'y a pas de vaccin et pas de traitement autre que symptomatique. De 2005 à 2007 une vague épidémique de chikungunya a circulé du bloc forestier d'Afrique centrale à l'Asie, avec une incursion en Italie en été 2007, suite à l'arrivée d'un homme porteur du virus. Cette épidémie a été marquée par l'implication majeure d'un nouveau vecteur : *Ae. albopictus*. Depuis trois décennies, ce moustique originaire d'Asie a considérablement étendu son aire de distribution, profitant de l'augmentation des échanges commerciaux et de l'urbanisation croissante et il est désormais présent en Europe, sur les continents américain et africain, où il semble peu à peu remplacer *Ae. aegypti*. Si le rôle respectif d'*Ae. aegypti* et d'*Ae. albopictus* dans la transmission n'a pas été bien documenté en Inde, *Ae. albopictus* a été le vecteur majeur, sinon unique, de la transmission en Italie, en Afrique centrale, à La Réunion et à l'île Maurice, et probablement à Mayotte et à Madagascar. L'une des conséquences de la formation du nouveau couple CHIKV-*Ae. albopictus* aura été la sélection et l'émergence d'un nouveau génotype viral. En effet, une mutation virale (E1 V226A) particulièrement adaptée à la réplication du virus dans *Ae. albopictus* [3] a été sélectionnée indépendamment dans plusieurs foyers d'Afrique Centrale et de l'Océan Indien, où ce moustique est présent. Trois facteurs

contribuent ainsi à l'émergence du virus chikungunya : l'expansion mondiale d'*Ae. albopictus*, la sélection de génotypes viraux particulièrement répliatifs dans cette espèce, et l'augmentation des échanges commerciaux et des flux de passagers dans le monde. L'expansion géographique d'*Ae. albopictus* n'étant pas achevée, en particulier en France métropolitaine où il est actuellement présent dans les Alpes maritimes, le Var et la Corse, on doit s'attendre à une pour-

virus WN est responsable d'épizooties massives chez les oiseaux en Amérique du Nord, où de 3 000 à 4 000 cas humains sont signalés chaque année. Ces observations posent deux questions : pourquoi cette épidémie, aux USA, et pas en Europe ? Quels facteurs pourrait faire évoluer la situation en Europe ? Trois grandes hypothèses ont été émises, concernant l'émergence d'épidémies de WN :



© Jacques Boyer/ROGER VIOLLET

Le DDT a été le premier insecticide industriel à être utilisé à grande échelle en santé publique et en agriculture après 1939 (expérimentation du DDT, USA, 1946).

suite de l'expansion de la fièvre à chikungunya et de la dengue.

**La fièvre à virus West Nile :** Le virus West Nile (WN), d'origine africaine, circule naturellement entre les oiseaux et des moustiques ornithophiles. En Europe, le virus est transmis à l'homme ou aux chevaux par des vecteurs à préférences trophiques larges : *Culex pipiens* et *Cx. modestus*. Le virus WN a été détecté en Camargue dès 1962 et, depuis, il a été signalé dans nombreux pays européens. Des épidémies ont été observées à Bucarest en 1996, à Volgograd en 1999 et des foyers équin ou humains plus limités dans de nombreux autres pays, en particulier en France où les cas restent rares. Depuis 1999 le

- ✓ la sélection de génotypes viraux plus virulents pour les oiseaux et l'homme : les virus WN nord-américains sont génétiquement très proches des virus du bassin méditerranéen, mais une mutation (NS3-T249P) sur le gène de l'hélicase a été récemment mise en évidence et pourrait expliquer la virulence des souches nord-américaines [4] ;
- ✓ un comportement trophique différent des vecteurs : des variations de comportements alimentaires, entre ornithophilie et mammophilie, liées à un polymorphisme génétique, pourraient expliquer le passage du virus des oiseaux à l'homme et aux chevaux. Des populations génétiquement différenciées de *Cx. pipiens* (*Cx. p. pipiens* et *Cx. p. modestus*)

ayant des comportements différents semblent supporter cette hypothèse [5] ; de plus, le comportement trophique peut varier au cours de la saison, en fonction de la disponibilité des oiseaux [6] ;

- ✓ des modifications environnementales rapprochant les moustiques de l'homme : en Roumanie les cas humains sont survenus dans les immeubles insalubres et très peuplés, dont les sous-sols inondés favorisaient la prolifération de *Cx. pipiens*.

### Faut-il lutter contre les vecteurs ?

La réponse à cette question n'est pas si évidente qu'il y paraît, et ce, pour plusieurs raisons :

- ✓ Pour quelques maladies à transmission vectorielle, il existe un vaccin : c'est le cas de la fièvre jaune, essentiellement cantonnée à l'Afrique noire, mais qui sévit de nouveau en Amérique du Sud en 2008. Malheureusement, le vaccin, parfaitement efficace et bon marché, est très insuffisamment utilisé, essentiellement pour des raisons de logistique et de politique de santé publique.
- ✓ Des médicaments existent pour prévenir ou traiter certaines maladies, comme le paludisme. Ces médicaments de nouvelle génération sont efficaces, dans la plupart des contextes, contre les différents *Plasmodium* parasites du paludisme, mais, là encore, le coût, les difficultés logistiques, et parfois la volonté politique, manquent pour mettre en place des politiques de santé publique efficaces. Même en France, en Guyane et à Mayotte, le paludisme continue de sévir localement, alors qu'il n'y a plus que des cas importés en France métropolitaine et à La Réunion (sauf exceptions récentes), malgré la présence de vecteurs potentiels.
- ✓ En dépit d'années de lutte anti-vectorielle contre les vecteurs du paludisme ou de la dengue, ces maladies continuent de sévir, et même de se développer, dans les régions tropicales. La lutte anti-vectorielle ressemble alors au combat d'Hercule contre l'Hydre. Est-il utile de dépenser argent et énergie contre un ennemi perpétuellement renaissant ?
- ✓ Dans l'immense majorité des cas, la lutte anti-vectorielle fait appel à l'utilisation d'insecticides. Même si les pyréthrinoïdes et les insecticides d'origine bactérienne actuellement utilisés sont moins toxiques et polluants, ils restent des pesticides dont l'usage doit être autant que possible restreint.

Cependant, malgré ses imperfections et ses limites, la lutte anti-vectorielle reste, dans un grand nombre de cas, soit l'unique moyen de limiter la transmission, soit un complément indispensable aux autres méthodes de contrôle des maladies pour lesquelles les outils préventifs ou curatifs (vaccin, médicament, aménagement de l'environnement) sont insuffisants. A charge pour les chercheurs, les ingénieurs sanitaires, les décideurs, d'utiliser au mieux les outils disponibles et de développer de nouvelles approches.

### La place de la lutte anti-vectorielle en santé publique

L'histoire de la lutte anti-vectorielle est parsemée de succès et d'échecs, dont on doit tirer les leçons pour imaginer les méthodes de contrôle des années à venir. Un des principaux succès est sans aucun doute le programme de lutte contre l'onchocercose, en Afrique de l'Ouest. Une parfaite connaissance des espèces de mouches simuliées vectrices et de leur biologie, une stratégie de rotation d'insecticides adaptée au débit des cours d'eau, soutenue par des efforts financiers et humains considérables, pendant plus de 30 ans, ont permis de contrôler la transmission et de faire en sorte que la maladie ne soit plus désormais un problème de santé publique. Inversement, la tentative d'éradication mondiale du paludisme, par la lutte anti-vectorielle conduite de 1955 à 1968, s'est soldée par un échec dans les pays tropicaux, ce qui a conduit l'OMS à réajuster sa stratégie vers des objectifs plus réalistes de contrôle de la maladie par différentes méthodes (intégrant la lutte anti-vectorielle). D'autres vastes campagnes de lutte n'ont eu qu'un effet temporaire. *Ae. Aegypti*, le vecteur de la fièvre jaune et de la dengue, avait semble-t-il été éradiqué de la plupart des pays d'Amérique du Sud, lors des campagnes conduites contre la fièvre jaune, entre 1916 et les années 1970, par la fondation Rockefeller, puis par la PAHO (Pan American Health Organization). L'arrêt des campagnes de lutte contre les vecteurs, suite à la généralisation du vaccin anti-amaril, a inexorablement conduit à la recolonisation de tout le continent par cette espèce, maintenant vecteur de dengue. Le contrôle des vecteurs s'est par ailleurs compliqué avec l'apparition et la diffusion des résistances des insectes aux insecticides. Dans le même temps, des considérations de coût, d'acceptabilité, de sécurité, et plus récemment de respect de l'environnement ont conduit les industriels et l'OMS à de nouvelles approches. De nouvelles molécules sont apparues, telles que des insecticides d'origine biologique (*Bacillus thuringiensis*, *B. sphaericus*, Spinosad, etc.), des insecticides régulateurs de croissance, mimétiques d'hormones d'insectes, ou des pyréthrinoïdes, peu toxiques pour les vertébrés homéothermes. De nouvelles formulations et méthodes d'utilisation de ces produits ont progressivement été intégrées dans les programmes de lutte, l'exemple le plus probant étant l'utilisation massive de moustiquaires imprégnées d'insecticides, permettant de transférer la lutte au niveau communautaire. En effet, depuis quelques années, les habitants sont de plus en plus associés à la lutte contre les vecteurs, au niveau familial ou communautaire. Des approches de type COMBI (communication for behavioural impact) se développent et sont particulièrement adaptées aux vecteurs domestiques, tel *Ae. albopictus*, dont la majorité des gîtes larvaires sont de petites collections d'eau créées par l'homme (vases de fleurs, fûts,

soucoupes sous les pots de fleurs, récipients abandonnés, vieux pneus...) dans les maisons, ou tout autour [7].

### Le cas de la France : comment faire mieux ?

La France ne se réduit bien évidemment pas à la métropole. Les Français ont redécouvert, suite à l'épidémie de Chikungunya dans l'Océan indien, que des maladies aussi exotiques que le chikungunya, la dengue, le paludisme, la leishmaniose, la maladie de Chagas, la filariose lymphatique, pour ne parler que des principales maladies transmises à l'homme par des vecteurs, étaient présentes en France tropicale, et que des cas « importés » étaient diagnostiqués en métropole (par exemple, 5 000 cas de paludisme d'importation par an, près de 900 cas de chikungunya en 2005 et 2006). La lutte contre les vecteurs de ces maladies n'est pas l'application d'une simple recette. On ne lutte pas de la même manière contre les anophèles à l'île de Mayotte, *Ae. albopictus* en Corse ou les punaises vecteurs de la maladie de Chagas en Guyane. Les stratégies doivent tenir compte du système vectoriel (dépendant de l'environnement et parfois imparfaitement connu), de l'arsenal technique disponible, des coûts et de l'acceptabilité par les populations. Dans l'avenir, la lutte contre les insectes vecteurs devra non seulement intégrer les progrès récents des techniques et concepts, mais surtout prendre en compte les évolutions de l'environnement planétaire, des modes de vie et des aspirations des sociétés pour des stratégies de contrôle moins polluantes, plus ciblées et durables, moins coûteuses. Les changements globaux récents, climatiques (réchauffement, pluviométrie, saisonnalité), environnementaux (déforestation, urbanisation, agriculture) et sociétaux (démographie, pauvreté, déplacements) influencent des systèmes vectoriels issus d'une lente co-évolution entre les vecteurs, les agents pathogènes transmis et les autres composantes des écosystèmes. Des maladies émergent, et d'autres voient leur aire de distribution se modifier. La revendication des populations d'un monde à risque zéro, l'aspiration à une diminution des pesticides dans le contexte du « Grenelle de l'environnement » et du développement durable doivent conduire à développer les recherches sur les risques, sur les systèmes d'alerte précoces et sur de nouvelles stratégies de contrôle des différents types de vecteurs.

Sans prétendre être exhaustif, plusieurs points critiques peuvent être identifiés, et quelques recommandations proposées.

#### *Évaluer les risques*

On suspecte que les changements globaux modifient la distribution des vecteurs, leur capacité vectorielle et leur contact avec les parasites et les hôtes,

mais, dans le même temps, l'évaluation des risques d'importation, d'installation et de développement de maladies à transmission vectorielle et de nouveaux vecteurs est insuffisamment développée.

Les indicateurs de risques sont souvent mal définis. Faut-il considérer la présence de vecteurs potentiels, leur abondance, l'apparition de cas sporadiques ? L'épidémie de chikungunya à La Réunion relevait de la « chronique d'une épidémie annoncée », de même que celle d'Italie, en juillet 2007 [8], mais des mesures énergiques n'avaient pas été prises, les « voyants » n'étant pas passés au rouge. La surveillance et la lutte contre *Ae. albopictus*, à La Réunion et en métropole, ont depuis été renforcées ; un plan d'action, probablement un modèle du genre, a été mis en place, après consultation des chercheurs, des services de santé, des agences opérationnelles. L'évaluation des risques palustre, West Nile, leishmaniose, en métropole relèvent uniquement (ou très majoritairement) de l'intérêt d'équipes de recherche et de financements internationaux. Le projet européen Eden implique ainsi plusieurs groupes de l'IRD, du CIRAD, de l'EID, du CNRS\*\*, des Universités pour réaliser des études descriptives et explicatives, et développer des modèles de risques. La communication entre les chercheurs et les décideurs est quasi inexistante.

#### *Améliorer les méthodes de lutte actuelles et développer de nouvelles approches*

La lutte contre les vecteurs est confrontée à un double défi : mettre davantage à profit la somme considérable de connaissances accumulées depuis de nombreuses années, et faire preuve d'innovation [9]. L'approche immédiate, pragmatique, et déontologiquement prioritaire est de mieux utiliser et de perfectionner les outils dont on dispose et qui ont déjà fait leurs preuves (association d'insecticides, matériaux imprégnés, etc.). La lutte chimique doit être plus spécifique, moins polluante, plus efficace. La détection et la gestion de la résistance aux insecticides sont des priorités. De nouvelles molécules insecticides pour la santé publique doivent être évaluées et de nouvelles approches utilisant les répulsifs doivent être abordées. Un des freins majeurs à l'efficacité de la lutte anti-vectorielle est l'acceptabilité des méthodes proposées par les populations. Des recherches associant entomologistes et spécialistes en sciences humaines doivent s'intensifier afin de mieux répondre à la demande, aux besoins et aux possibilités financières des habitants. L'éducation sanitaire et la lutte au niveau communautaire doivent être renforcées. Concernant les voyageurs, des solutions simples et efficaces peuvent être proposées associant vêtements imprégnés et répulsifs à longue durée d'action.

Un des objectifs de la recherche sur la lutte anti-vectorielle est de proposer et d'évaluer des méthodes de contrôle non chimiques. Même si dans l'immense

majorité des cas la lutte biologique contre les vecteurs s'est révélée décevante (le succès majeur venant de l'utilisation de toxines d'origine biologique issues de *Bacillus*), il est nécessaire de poursuivre des recherches dans ce domaine (autres bactéries, virus, champignons, parasites, prédateurs). Une meilleure connaissance du choix du partenaire sexuel des vecteurs, du gîte de repos et du gîte larvaire des moustiques, l'identification de gènes impliqués dans ces comportements et la compréhension des mécanismes de leur expression pourraient permettre de développer des leurres olfactifs ou visuels. Les données de terrain de biologie des populations d'insectes et les résultats issus des études de génomique devront être mis à profit pour imaginer de nouvelles méthodes de contrôle, en particulier génétiques. Deux approches sont actuellement poursuivies :

- ✓ La technique de lâcher massif de mâles stériles. Cette méthode a été utilisée avec succès sur la mouche myasigène *Cochliomyia hominivorax*, avec un succès localisé sur les glossines à Zanzibar (alors que les résultats étaient décevants sur le continent africain au Nigeria, en Tanzanie et au Burkina Faso), mais a été un échec sur les anophèles. De nouveaux projets de lâcher de mâles stériles d'*An. arabiensis*, vecteur du paludisme et d'*Ae. albopictus*, vecteur de dengue et chikungunya, sont en cours d'élaboration à l'île de la Réunion, ainsi qu'au Soudan et en Italie.
- ✓ La maîtrise récente de la transgénèse chez les moustiques, l'identification progressive de gènes d'intérêt et le développement de colonies d'insectes génétiquement réfractaires à divers agents pathogènes laissent entrevoir une possible utilisation de moustiques génétiquement modifiés incapables de transmettre des virus ou des parasites à l'Homme. Le développement de techniques de paratransgénèse, mettant à profit la présence de bactéries symbiotiques (par exemple de type *Wolbachia*) est également exploré. Les gènes introduits dans les populations naturelles pourraient concerner le comportement (la zoophilie) ou l'immunité (blocage des cycles extrinsèques des *Plasmodium*, des virus de la dengue, etc.). L'utilisation de moustiques transgéniques nécessite évidemment un nombre considérable de recherches en amont pour s'assurer de la faisabilité de l'approche (capacité reproductive des moustiques modifiés, réponse évolutive des parasites et virus, innocuité, acceptabilité par les populations humaines).

### Renforcer et coordonner les efforts de recherche et d'intervention

Les vecteurs ne connaissent pas les frontières. Les réflexions doivent être conduites au niveau européen, ou méditerranéen, et parfois mondial. L'implication

progressive du récent ECDC (European center for disease prevention and control) est un progrès. A l'échelle de la France il n'y a pas, pour le moment, de véritable coordination nationale. Plusieurs agences, directions, services, instituts, universités participent à l'évaluation des risques et à des propositions de réponses. Par exemple en 2004 la Direction Générale de la Santé (DGS) a coordonné la rédaction d'une circulaire relative aux mesures visant à limiter la circulation du virus West Nile en France métropolitaine, et en 2007 la rédaction du plan « *Aedes albopictus* et chikungunya », l'Afssa réalise une évaluation des risques pour la fièvre de la vallée du Rift à Mayotte (et dans l'Océan Indien), l'Afssset finance des études sur les nouveaux insecticides, l'InVS est en charge de la surveillance des maladies émergentes, l'IRD coordonne une étude sur l'amélioration de la lutte anti-vectorielle en France. Il faut, en France, développer des systèmes d'alerte précoce, se basant sur l'ensemble des outils disponibles (depuis les réseaux de piégeages d'insectes jusqu'à l'analyse d'images satellitaires). La coordination entre les différents opérateurs français en charge de la lutte contre les insectes nuisants ou vecteurs (ententes interdépartementale (EIDs), conseil généraux, direction de la santé et du développement social (DSDS), etc.) est encore insuffisante, malgré l'existence de l'Adège (Agence nationale pour la démoustication et la gestion des espaces naturels démoustiqués). Les relations entre ces opérateurs et les équipes de recherche et les décideurs nationaux sont insuffisantes. La loi de santé publique française et les lois de décentralisation qui délèguent la lutte anti-vectorielle au niveau départemental ne permettent pas à toutes les collectivités de réagir efficacement aux menaces avérées ou attendues.

Les connaissances scientifiques sont parfois insuffisantes pour évaluer correctement les risques et proposer des méthodes de lutte efficaces, acceptées par les populations, durables et financièrement réalistes. Les indicateurs d'efficacité de la lutte anti-vectorielle doivent faire l'objet d'une réflexion de fond. Que souhaite-t-on voir diminuer : les gîtes larvaires, les moustiques adultes hématophages, les cas cliniques, les pathologies sévères... ? Des incitations françaises ou européennes doivent être mises en place pour encourager les chercheurs à développer des recherches dans ce domaine.

Les compétences et les ressources humaines sont notoirement insuffisantes sur le territoire français. Il n'y a pratiquement plus de formation en entomologie médicale en France. Un master international en entomologie médicale et vétérinaire a été mis en place en 2006 par l'Université de Montpellier, l'Université d'Abomey Calavi au Bénin et l'IRD ; l'Institut Pasteur et l'IRD donnent un cours sur les vecteurs tous les deux ans, et quelques universités proposent des modules sur les vecteurs dans les masters ou les écoles

doctorales. Il n'existe aucune formation technique au niveau BTS ou licence pro dédiée ou centrée sur la lutte anti-vectorielle.

Technologie de l'Académie de Sciences de France, RST24 : La maîtrise des maladies infectieuses(RST24):299-314.

## Conclusion

L'expérience prouve que le contrôle des maladies à vecteurs est très rarement obtenu par une approche unique, que ce soit la lutte contre les vecteurs, la lutte contre les agents pathogènes ou le contrôle des réservoirs, et que seule une approche intégrée est réaliste. Les nouvelles connaissances et les nouvelles technologies nous offrent des opportunités exceptionnelles de faire un bon en avant vers une lutte anti-vectorielle ciblée, respectueuse de l'environnement, acceptée par la population. Dans cette optique le concept de développement durable prend alors tout son sens.

## Notes

\* Directeur de recherche, entomologiste médical, IRD, UR 016 Caractérisation et contrôle des populations de vecteurs – Montpellier.

\*\* IRD : Institut de Recherche pour le Développement.

## Bibliographie

- [1] MacDonald G. 1957. The epidemiology and control of malaria, London, Oxford University Press. 201 pp.
- [2] Alten B, Kampen H, Fontenille D. 2007. Malaria in Southern Europe: resurgence from the past?: Emerging Pests and Vector-Borne Diseases in Europe (W Takken and BGJ Knols, Eds.). Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands. p 35-58.
- [3] Vazeille M, Moutailler S, Coudrier D, Rousseaux C, Khun H, Huerre M, *et al.* 2007. Two Chikungunya Isolates from the Outbreak of La Reunion (Indian Ocean) Exhibit Different Patterns of Infection in the Mosquito, *Aedes albopictus*. PLoS ONE;2(11):e1168.
- [4] Brault AC, Huang CY, Langevin SA, Kinney RM, Bowen RA, Ramey WN *et al.* 2007. A single positively selected West Nile viral mutation confers increased virogenesis in American crows. Nat Genet;39:1162-6.
- [5] Fonseca DM, Keyghobadi N, Malcolm CA, Mehmet C, Schaffner F, Mogi M, *et al.* 2004. Emerging vectors in the Culex pipiens complex. Science;303:1535-8.
- [6] Kilpatrick AM, Kramer LD, Jones MJ, Marra PP, Daszak P. 2006. West Nile virus epidemics in North America are driven by shifts in mosquito feeding behavior. PLoS Biol;4(4):e82.
- [7] Parks W and Lloyd L. 2004. Planning social mobilization and communication for dengue fever prevention and control: a step-by-step guide. WHO/TDR/STR/SEB/DEN/04.1, 138 p.
- [8] Fontenille D, Failloux A, Romi R. 2007. Should we expect Chikungunya and Dengue in Southern Europe? : Emerging Pests and Vector-Borne Diseases in Europe (W Takken and BGJ Knols, Eds.). Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands. p 169-184. 169-184 p.
- [9] Fontenille D. 2006. Vers une meilleure connaissance des vecteurs et de leur contrôle. Rapport sur la Science et la

