

Famille ou sous-famille		Stades vecteurs	Principaux agents pathogènes	Maladies associées
<i>Culicidae</i> (moustiques)		Adultes femelles	Virus amaril ; virus de la dengue ; <i>Plasmodium</i> ; filaires	Fièvre jaune ; dengue ; paludisme ; filariose de Bancroft
<i>Simuliidae</i> (simulies)		Adultes femelles	Filaires	Onchocercose
<i>Phlebotominae</i> (phlébotomes)		Adultes femelles	Leishmanies	Leishmaniose
<i>Tabanidae</i> (taons, <i>Chrysops</i>)		Adultes femelles	Filaires ; trypanosomes	Loase ; trypanosomoses animales
<i>Ceratopogonidae</i> (dont <i>Culicoides</i>)		Adultes femelles	Virus bluetongue	Fièvre catarrhale ovine
<i>Glossinidae</i> (mouches tsé-tsé)		Adultes mâles et femelles	Trypanosomes	Maladie du sommeil
Puces (nombreuses familles)		Adultes mâles et femelles	Bactéries <i>Yersinia</i> , <i>Rickettsia</i>	Peste ; typhus murin
Punaises <i>Reduviidae</i> (réduves, triatomes)		Adultes mâles et femelles, et immatures	Trypanosomes	Maladie de Chagas
<i>Pediculidae</i> (poux)		Adultes mâles et femelles, et immatures	Rickettsies	Typhus exanthématique
<i>Ixodidae</i> (tiques dures)		Adultes mâles et femelles, et immatures	Virus <i>Flaviviridae</i> et <i>Bunyaviridae</i> ; bactérie <i>Borrelia</i>	Encéphalite européenne à tiques ; fièvre hémorragique de Crimée- Congo ; borréliose de Lyme
<i>Argasidae</i> (tiques molles)		Adultes mâles et femelles, et immatures	<i>Borrelia</i>	Fièvre récurrente à tiques

2. LES PRINCIPAUX ARTHROPODES NUISANTS OU VECTEURS de maladies pour l'homme. Dans ce tableau, tous les arthropodes sont des insectes, à l'exception des tiques (*deux dernières lignes*), qui sont des

acariens. Et parmi les insectes de cette liste, la plupart sont des diptères (*six premières lignes*), ordre d'insectes dont les membres ont deux ailes au lieu de quatre et qui inclut les mouches et les moustiques.

Le syndrome d'Ekbom

Certains patients attribuent de façon obsessionnelle à des insectes invisibles des troubles de la peau persistants. Ce syndrome d'Ekbom, du nom du neurologue suédois qui l'a décrit en 1938, apparaît à l'âge adulte, principalement chez la femme âgée. Le sujet ressent avec une acuité extrême des démangeaisons ou des fourmillements superficiels, qu'il attribue à de petits animaux piqueurs ou présents dans le derme. Il déploie d'intenses efforts pour apporter des éléments de preuve qui, dans le meilleur des cas, se révèlent être des morceaux d'insectes inoffensifs et répandus dans les maisons (mouches, poissons d'argent, moucherons, etc.).

Dans certains cas extrêmes, l'arthropode nuisant est lui-même un pathogène. Il en est ainsi du sarcopte, acarien responsable d'une gale cutanée, ou de l'asticot de certaines mouches qui se développe aux dépens des tissus de l'hôte. Mais il ne faut pas oublier que la majorité des arthropodes sont inoffensifs pour l'homme (*voir l'encadré page 69 en haut*).

Parmi les nuisants, on inclut parfois les arthropodes venimeux, qui ne sont pas hématophages et qui piquent occasionnellement l'homme, le plus souvent par réaction de défense. Ils relèvent de cinq groupes principaux qui utilisent divers systèmes inoculateurs de venin.

Ceux du premier groupe, comme les araignées et les scolopendres, injectent du venin par deux crochets situés au voisinage de la cavité buccale. Le deuxième comprend les scorpions, dont le dernier segment abdominal est muni d'un dard. Le troisième groupe est celui des hyménoptères tels que bourdons, abeilles, guêpes et frelons, dont les femelles adultes piquent avec un dard rétractile situé à l'extrémité de l'abdomen. Le quatrième groupe inclut de nombreux arthropodes

qui utilisent leurs pièces buccales et leur salive pour se défendre lorsqu'on les saisit, et infligent de douloureuses piqûres ; c'est le cas d'hétéroptères, comme les punaises prédatrices ou suceuses de sève. Enfin, le dernier groupe d'arthropodes venimeux est constitué de chenilles urticantes de papillons, dont certaines soies sont différenciées en micro-harpons contenant un venin allergène ; c'est le cas de la chenille processionnaire du pin, dont l'aire de répartition est aujourd'hui en forte expansion.

Des agents infectieux dangereux

La nuisance ou la pathogénie résultent de l'arthropode lui-même ou de sa piqûre. En revanche, la notion de vecteur implique l'existence d'un acteur supplémentaire : un agent infectieux (un virus, une bactérie ou un parasite, lequel peut être un organisme unicellulaire ou un organisme plus complexe, tel un ver) que le vecteur peut transmettre. L'agent infectieux constitue un problème grave, bien que sa taille soit souvent microscopique.

Le terme de vecteur revêt deux significations en biologie. L'acception la plus large inclut tout organisme qui intervient dans la transmission d'un agent infectieux. Cette définition accepte les pucerons comme vecteurs de virus de plantes, les sangsues comme vecteurs de parasites de poissons, grenouilles ou tortues, et des chauves-souris vampires comme vecteurs de virus de la rage en Amérique. Selon une seconde acception, à visée opérationnelle pour la lutte contre les insectes transmettant des maladies aux humains, on désigne par arthropode vecteur « tout arthropode hématoophage qui assure la transmission biologique active d'un agent pathogène d'un vertébré à un autre vertébré ». En pratique, cela regroupe des insectes et les tiques.

L'hématophagie a un rôle central

Parfois, le statut de vecteur représente un stade chronologiquement postérieur à celui de nuisant. Ainsi, *Aedes albopictus* était un moustique nuisant dans l'île de La Réunion et, lorsque le virus du chikungunya y a été introduit, ce moustique en a assuré la transmission vectorielle, sans rien perdre de son pouvoir de nuisance. Cet exemple illustre qu'un nuisant, en présence d'un agent infectieux, peut devenir vecteur, au moins le temps d'une épidémie.

Dans un petit nombre de cas, la fonction de vecteur peut s'exercer sans aucune nuisance. Ainsi, en Afrique de l'Ouest, la fièvre récurrente à tiques est transmise la nuit, à une personne endormie, par une tique molle dont la piqûre, brève et pratiquement indolore, passe inaperçue. Il y a donc là transmission vectorielle d'un agent infectieux sans nuisance par la piqûre.

L'hématophagie est une notion centrale des infections vectorielles. Ce mode d'alimentation implique que les vecteurs transmettent exclusivement des « parasites » dermiques, hémolymphatiques ou sanguins, la peau et la circulation sanguine ou lymphatique étant les seuls compartiments auxquels ils ont accès. Ainsi, les parasites intestinaux ne sont jamais transmis par voie vectorielle.

La prise du repas sanguin suppose l'identification par l'hématophage de l'hôte à piquer, identification qui fait intervenir de nombreux mécanismes perceptifs (voir l'encadré page 70). Et l'ingestion de

Ils ne piquent pas !

La plupart des insectes (plus d'un million d'espèces) sont inoffensifs pour l'homme et rendent de précieux services écologiques. Certains, tels les syrphes (mouches butineuses), les tipules (ou cousins) ou les chironomes (diptères à antennes plumeuses) ressemblent à des insectes piqueurs, mais n'en sont pas.



© Shutterstock/John van Bellen



© Shutterstock/abjola



Carlo Monari

sang, liquide riche en eau et en nutriments, impose nombre de contraintes, dont la coagulation. Et, de fait, toutes les salives d'hématophages sont anticoagulantes. Ensuite, des pompes aspirantes fonctionnent pour ingérer le bol alimentaire, et des sortes de valves empêchent le reflux du liquide ingéré. Aussitôt, le bol alimentaire est concentré, ce qui permet d'augmenter le volume ingéré.

La transmission par un animal vecteur est souvent obligatoire pour les agents infectieux. C'est le cas pour les *Plasmodium*, agents unicellulaires du paludisme, qui sont uniquement transmis par la piqûre d'un moustique anophèle femelle (mise à part leur transmission non naturelle lors de transfusions de sang contaminé). Il en va de même pour les trypanosomes, agents de la maladie du sommeil, transmis en Afrique par la piqûre des mouches tsé-tsé (ou glossines).

Parfois, la transmission vectorielle n'est pas le seul mode de transmission possible. Il en est ainsi de l'encéphalite européenne à tiques, pour laquelle coexistent deux modalités de passage du virus à l'homme : une transmission vectorielle par piqûre de la tique et une transmission orale par ingestion de lait non pasteurisé. Cette grave maladie due à un arbovirus sévit principalement en Europe de l'Est, jusqu'à l'Est de

		MOUSTIQUES VECTEURS	<i>Anopheles</i> et <i>Culex</i> (piquent du coucher au lever du soleil)	<i>Aedes</i> (piquent surtout le jour)
		MALADIES TRANSMISES	Paludisme, encéphalite japonaise, filariose...	Dengue, chikungunya, fièvre jaune...
MOYENS DE PROTECTION	Moustiquaire (imprégnée d'insecticide)		+	+
	Pulvérisation dans le domicile d'insecticides rémanents		+	+
	Diffuseur électrique d'insecticide (intérieur)		+	+
	Moustiquaires de fenêtres et de portes		+	+
	Climatisation		+	+
	Ventilation		+	+
	Répulsifs cutanés		+	+
	Vêtements imprégnés d'insecticide		+	+
	Serpentins fumigènes (extérieur)		+	+

D'après G. Duvallet et L. de Gennille, Protection personnelle antivectorielle, IRD Éditions, 2012, p. 306

3. EFFICACITÉ RELATIVE DES MOYENS DE PRÉVENTION disponibles contre les piqûres de moustiques. Certaines mesures d'appoint, tels les appareils à ultrasons ou les comprimés de vitamine B₁, dont l'inefficacité a été prouvée, ne figurent pas ici.

Comment les moustiques détectent leurs victimes

Les moustiques choisissent leurs hôtes à piquer en fonction de la chaleur, du gaz carbonique et des odeurs qu'elles émettent. Savoir ce qui les attire ou les éloigne est essentiel pour les inciter à s'approcher (pour les piéger) ou pour les repousser (et éviter ainsi des piqûres).

Des recherches actives sont en cours sur l'olfaction des insectes. Plusieurs familles de récepteurs olfactifs localisés sur les

antennes du moustique ont été identifiées. Ces récepteurs sont reliés à des nerfs sensoriels qui réagissent quand une molécule attractive s'y fixe.

Il existe des dizaines de molécules attractives, notamment des odeurs caractéristiques des humains comme l'ammoniac, l'acide lactique ou l'aminobutane. Selon les espèces de moustiques, ce sont les composés volatils émis dans la respi-

ration qui sont attractifs (CO_2 notamment), ou dans la sueur avec une forte participation de la microflore cutanée. En fonction du cocktail olfactif et des espèces de piqueurs présentes, certains individus ou types d'individus (femmes enceintes, personnes ayant bu de l'alcool...) sont davantage piqués que d'autres (voir « Y a-t-il des "peaux à moustiques" ? », *Pour la Science*, juillet 2012).

la France. Le vecteur est une tique du genre *Ixodes*. Le réservoir de virus est constitué de nombreux animaux (rongeurs et oiseaux, notamment). Le bétail est aussi susceptible d'héberger le virus, qui survit longtemps dans le lait des animaux, d'où la possibilité d'une transmission par voie orale.

La distinction entre nuisants et vecteurs est, comme on l'a vu, parfois malaisée. Mais ce n'est pas qu'une question de biologie théorique : elle a, au moins en France, des implications réglementaires pour les insectes vecteurs de pathogènes pour l'homme. Le texte législatif de référence mentionne en effet que là où « l'existence de conditions entraînant un risque de développement de maladies humaines transmises par l'intermédiaire d'insectes et constituant une menace pour la santé de la population [...], la définition des mesures de lutte nécessaires relève de la compétence de l'État ». À l'égard des arthropodes nuisants qui ne sont pas vecteurs, la définition de la responsabilité des actions de contrôle relève d'autres réglementations désignant, selon les cas, d'autres acteurs (Conseils généraux, communes, particuliers...).

Prévention collective ou personnelle

En pratique, le contrôle des arthropodes nuisants ou vecteurs fait l'objet de deux approches complémentaires.

La première est la « lutte antivectorielle », qui désigne comme cible le vecteur et comme bénéficiaire la collectivité. Elle vise à réduire localement la densité d'arthropodes vecteurs, en mettant en jeu de grands moyens dans des actions dirigées contre les populations de vecteurs ou les milieux où ils se développent (par exemple,

■ L'AUTEUR



Vincent ROBERT est directeur de recherche à l'IRD (Institut de recherche pour le développement), et travaille au Laboratoire MIGEVIC (unité mixte IRD-CNRS-Université Montpellier 1 et 2) du Centre IRD France-Sud, à Montpellier.



4. QUELQUES MOYENS D'APPOINT vendus dans le commerce : appareil à ultrasons, essence de citronnelle, bracelet anti-moustique, comprimés de vitamine B_1 . L'efficacité de ces dispositifs est soit faible (huiles essentielles, bracelets), soit nulle (appareils à ultrasons, vitamine B_1).

la lutte contre les simuliés en Afrique de l'Ouest pour enrayer la transmission de l'onchocercose, la lutte contre les moustiques à Mayotte qui transmettent le paludisme et des arboviroses, le contrôle des populations de moustiques sur le littoral méditerranéen ou atlantique pour réduire les piqûres, etc.).

La seconde approche est la protection personnelle antivectorielle (PPAV), qui vise plus modestement à protéger la maison, la famille ou l'individu en recourant à des dispositifs ou produits plus simples que ceux mis en œuvre dans la lutte antivectorielle. Abordons cette question de la prévention au quotidien.

Allier efficacité, simplicité, bas coût et absence d'effets négatifs

Idéalement, la protection personnelle antivectorielle doit à la fois être efficace, présenter le moins possible d'effets indésirables, être bon marché et suffisamment simple pour être suivie sur une longue période. Le domicile constitue un cadre privilégié pour envisager une désinsectisation. Encore faut-il respecter quelques principes de base, rappelés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), et qui relèvent du bon sens.

Tout d'abord, une utilisation d'insecticide « à l'aveugle » contre un insecte inconnu est presque toujours inefficace. Il faut la cibler sur un ou des insectes bien identifiés et localisés. Ensuite, toute lutte est d'abord mécanique, c'est-à-dire effectuée sans produit insecticide. Hygiène et propreté en constituent le socle : usage de l'aspirateur, lavage du linge à des températures supérieures à 40 °C, entretien des papiers peints, moquettes et tapis, bouchage des fentes dans les murs, pose de grillage moustiquaire aux portes et fenêtres, etc. L'usage d'insecticide chimique, lui-même optionnel, doit toujours être accompagné ou précédé par une lutte mécanique. Enfin, tuer les insectes adultes sans éliminer les larves et les œufs est généralement inefficace à court ou moyen terme.

Du côté des produits chimiques, l'utilisation de répulsifs cutanés (lotions ou crèmes appliquées sur la peau) est l'un des principaux moyens de protection individuelle. Sur le plan réglementaire, ils relèvent des produits biocides. On a longtemps pensé

que l'effet de ces lotions sur les insectes était strictement répulsif; il apparaît maintenant qu'ils sont également insecticides, puisqu'ils tuent l'insecte lorsqu'ils sont en contact avec lui. Les molécules actives ayant fait l'objet de l'évaluation prescrite au niveau européen (et également retenues aux États-Unis et au Canada) sont au nombre de quatre: le DEET, l'IR3535, le PMD (connu sous le nom de marque *Citriodiol*) et la picaridine (autres noms: icaridine, KBR 3023).

Les nombreux produits répulsifs commercialisés procurent des durées de protection très variables contre les piqûres, selon la substance active, sa concentration et sa formulation. Les durées maximales de protection sont d'une dizaine d'heures, mais certains facteurs les diminuent, par exemple la forte sudation, inévitable en zone chaude et humide.

Des précautions s'imposent pour l'usage des répulsifs sur les femmes enceintes, les nouveau-nés et les jeunes enfants. Ainsi, selon le Haut conseil de la santé publique, le seul répulsif utilisable chez la femme enceinte est l'IR3535, mais d'autres sources, telle l'OMS, sont plus tolérantes et admettent le DEET et la picaridine. Des recommandations de concentration minimale (pour assurer l'efficacité) et maximale (pour assurer l'innocuité) ont été émises, en particulier dans les zones impaludées, pour prévenir les piqûres d'anophèles vecteurs et dans les contextes d'épidémie d'arbovirus transmises par moustiques. Ces concentrations recom-

mandées sont légèrement plus faibles pour la femme enceinte ou les jeunes enfants; en contrepartie, la durée de protection est diminuée et il faut associer d'autres moyens personnels de prévention.

Parallèlement à ces répulsifs chimiques, l'offre en matière de substances « naturelles » reste soutenue, en particulier des substances à base d'huiles essentielles. Mais la durée de protection conférée par ces produits est en général inférieure à 20 minutes, c'est-à-dire très insuffisante. De plus, les risques d'allergie et de phototoxicité sont avérés. L'expertise collective récemment réalisée déconseille

plusieurs années, même après plusieurs lavages, sans nécessiter de réimprégnation manuelle d'insecticide.

Dans des conditions normales d'utilisation, une moustiquaire apporte une protection à la fois physique et chimique. Les insecticides utilisés sont toujours des pyréthrinoides (perméthrine ou deltaméthrine, le plus souvent), qui présentent pour l'insecte un effet létal quasi immédiat et, pour les mammifères, une faible toxicité. Sur ce point, des inquiétudes se font jour avec l'apparition de plus en plus fréquente de résistances des anophèles aux pyréthrinoides, notamment en Afrique.

Ce phénomène de résistance a été favorisé par l'utilisation agricole de ces insecticides, afin de protéger les récoltes.

En zone tropicale, les moustiquaires de lit et de berceau sont irremplaçables pour protéger les dormeurs ainsi que les jeunes enfants ne marchant pas encore contre nombre de maladies à transmission nocturne telles que le paludisme, des arboviroses, la maladie de Chagas, les leishmanioses et contre les piqûres de puces et de punaises de lit. L'OMS est particulièrement vigilante pour accorder son homologation à certaines moustiquaires du commerce, gage de qualité pour l'usager (concentration adéquate d'insecticide, répartition homogène, biodisponibilité pendant au moins 20 lavages, résistance au déchirement, etc).

L'efficacité du port de vêtements amples et couvrants pour faire écran aux

LES NOMBREUX PRODUITS RÉPULSIFS commercialisés procurent des durées de protection très variables selon la substance active, sa concentration et sa formulation.

explicitement l'utilisation d'huiles essentielles comme répulsifs cutanés.

Un autre moyen important de protection personnelle est la moustiquaire imprégnée d'insecticide. Ces dernières années, de grands progrès ont été réalisés et ont augmenté la durée de protection conférée par de telles moustiquaires, avec une imprégnation effectuée dès le stade de la fabrication. Les procédés industriels réalisent l'incorporation de l'insecticide soit par fusion dans la fibre, soit en mélange dans une résine déposée autour de la fibre. On dispose maintenant de moustiquaires imprégnées qui restent efficaces pendant

Principe actif	Durée d'action	Inconvénients	Avantages	Cibles
DEET < 10 %	1-3 heures	Huileux, odeur importante, altère le plastique, irrite les yeux, efficacité discutable contre les tiques, les réduves et les anophèles	Bon marché, bon recul sur l'utilisation, large spectre de protection, toxicologie bien connue	Moustiques <i>Aedes</i> , <i>Culex</i> , <i>Anopheles</i> , <i>Mansonia</i> ; phlébotomes; simulies; acariens trombiculidés; tiques dures et molles; punaises <i>Cimex</i> ; puces
DEET 20-33 %	6-12 heures			
Picaridine 7 %	3-4 heures	Cher, peu de recul sur l'utilisation, non actif sur certains moustiques, tiques et culicoïdes	Large spectre, n'altère pas les plastiques, faible odeur, non huileux, actif à faible concentration. Répulsif de choix de l'OMS pour le paludisme	Tiques; gale; acariens piqueurs; moustiques; culicoïdes; stomoxes; puces
Picaridine 15 %	6-8 heures			
IR3535®		Efficacité insuffisante à faible concentration (moins de 20 %), irrite les yeux et la peau	Large marge de sécurité, utilisation depuis plusieurs années, faible odeur, non huileux, n'altère pas les plastiques, large spectre	Tiques; sarcopte de la gale; acariens piqueurs; moustiques; culicoïdes; taons; phlébotomes
PMD 10 %	1-2 heures	Peu d'études d'évaluation, parfois odeur forte, irrite les yeux	Actif contre les anophèles et les tiques, dérivé naturel de plante	Moustiques; stomoxes; tiques; culicoïdes; mouches piqueuses

5. QUATRE RÉPULSIFS CUTANÉS ONT UNE EFFICACITÉ internationalement reconnue. Il s'agit du DEET [N,N-diéthyl-3-méthylbenzamide], de la picaridine [carboxylate de sec-butyl-2-(2-hydroxyéthyl)]-

1-pipéridine, ou KBR 3023, ou encore icaridine], de l'IR3535® [N-acétyl-N-butyl-β-alaninate d'éthyle] et du PMD [mélange de cis- et trans-menthane-3,8-diol, ou Citriodiol®].

Quelles sont les préférences des moustiques ?

Une multitude d'idées reçues circulent à propos des moustiques. Qui n'a pas entendu, assénées de façon péremptoire, les affirmations selon lesquelles la lumière attire les moustiques, les femmes sont plus piquées que les hommes, la couleur bleue repousse les moustiques, ils piquent surtout à l'aube ou au crépuscule, etc. ?

Une réponse simple pour confirmer ou réfuter ces affirmations est en fait impossible, pour la simple raison que leur véracité dépend d'une myriade de paramètres annexes. Les moustiques représentent une famille d'insectes de plus de 3 500 espèces dont les préférences alimentaires et les comportements sont divers, résultant à la fois de

caractéristiques génétiques propres à la population considérée et de la densité des hôtes à piquer, de leur accessibilité, des caractéristiques de l'environnement, etc.

La plupart des espèces de moustiques sont opportunistes quant à l'hôte à piquer, alors qu'une minorité exprime une nette préférence pour une espèce ou un petit groupe d'espèces (les passereaux, les primates, l'homme, les bovidés, les grenouilles, etc.).

Dans des expériences de choix dual, laissant la possibilité à un moustique en quête d'un repas de sang de se diriger vers une personne ou vers une autre, une préférence se manifeste souvent pour l'une d'elles, probablement pour des raisons de plus

grande attractivité olfactive. Les communautés bactériennes vivant sur la peau varient beaucoup d'un individu à l'autre, d'où des variations importantes de cocktails olfactifs qui entraîneraient, du moins vis-à-vis des moustiques, des variations d'attractivité plus importantes entre individus qu'entre hommes et femmes.

Les moustiques ont un sens de la vision très performant. Il est vrai que la lumière est attractive, au moins pour certaines espèces de moustiques nocturnes, puisque des pièges fonctionnent justement avec la lumière comme appât. Mais les moustiques n'ont pas de perception nette des couleurs, ce qui ne les empêche pas de distinguer les variations d'intensité lumineuse ou de chaleur. On

estime que la couleur proprement dite ne joue pas de rôle significatif dans la succession de comportements qui aboutit à la prise d'un repas de sang.

Enfin, il est exact que certains moustiques (tels *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus*) ont des pics d'activité de piqure en fin d'après-midi et à l'aube. D'autres (tel *Culex pipiens*) piquent toute la nuit, mais principalement durant la seconde moitié de nuit, quand le sommeil du dormeur est *a priori* le plus profond. Encore une fois, il est impossible de généraliser à l'ensemble du vaste groupe des moustiques.

W. Takken et N. O. Verhulst, Host preferences of blood-feeding mosquitoes, *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 58, pp. 433-453, 2013.

insectes en quête d'un repas de sang est prouvée depuis longtemps. Dans cet esprit, divers tissus imprégnés de substances insecticides ou répulsives sont apparus et permettent de confectionner vêtements, rideaux, couvertures, bâches murales ou toiles de tentes.

Les vêtements imprégnés de perméthrine confèrent une réelle protection, en particulier lorsque le tissu est imprégné au cours même de sa fabrication. Des kits d'imprégnation (ou de réimprégnation) de vêtements sont en vente dans le commerce ; ils apportent une aide appréciable, mais offrent une protection plus courte qu'avec une imprégnation faite par le fabricant. De plus, la manipulation de produits concentrés exige de l'utilisateur d'importantes précautions.

Le port de vêtements imprégnés n'exclut pas l'application de répulsifs cutanés, bien au contraire ; l'association de ces deux mesures a donné des résultats spectaculaires pour la prévention de piqûres d'insectes, en particulier en forêt guyanaise. Toutefois, la moustiquaire à imprégnation de longue durée reste le dispositif considéré comme le plus efficace pour protéger le dormeur.

Aux moyens de protection mentionnés jusqu'ici s'ajoutent des mesures dites d'appoint constituées d'un vaste ensemble de dispositifs disparates. Certains sont considérés comme d'emploi possible si on les utilise en complément d'autres mesures à efficacité démontrée. Il en va ainsi des

insecticides en aérosol, pour une utilisation ponctuelle, et des insecticides à diffusion lente sous forme de plaquette chauffante ou de liquide, la diffusion étant assurée par une résistance électrique. Les serpentins fumigènes ont quelque efficacité, mais ils doivent être réservés à un usage en extérieur et de courte durée, en raison de la toxicité des fumées. En revanche, l'usage de bracelets anti-insectes, souvent à base de DEET ou d'huiles essentielles à des concentrations non précisées, est fortement déconseillé, leur efficacité étant médiocre ou non prouvée et en raison des risques de réactions cutanées qu'ils font courir.

Inefficacité prouvée...

Il est également déconseillé d'utiliser les appareils à ultrasons, supposés reproduire la fréquence sonore du moustique mâle en vol, lequel ferait fuir les femelles en quête de sang (certains fabricants indiquent que leur appareil reproduit la fréquence sonore de la femelle !), ainsi que les comprimés de vitamine B₁ (supposée induire, après plusieurs prises orales à forte dose, une odeur cutanée répulsive pour les insectes). La non-efficacité de ces procédés a été prouvée par plusieurs études scientifiques.

Pour d'autres dispositifs, tels les supports gluants sans insecticide (sur lesquels les insectes se font piéger) ainsi que les coûteux pièges lumineux ou à dioxyde de carbone, les études sont encore peu

nombreuses, mais elles ne semblent pas indiquer d'efficacité significative.

Au-delà des informations concrètes sur l'efficacité de tel ou tel moyen de prévention des piqûres, quelques remarques s'imposent. La biodiversité impliquée dans les aspects de nuisance et de transmission vectorielle regroupe une large part de l'ensemble du vivant. Elle englobe hôtes vertébrés, arthropodes vecteurs et agents infectieux (bactéries, virus, parasites), et concerne de nombreuses maladies. Mais la complexité de cet ensemble ne s'arrête pas là.

Cette diversité est elle-même changeante en raison des variations de la répartition des espèces vectrices (certaines disparaissent, d'autres sont invasives), de l'apparition de nouvelles espèces (par découverte récente, ou par la spéciation en cours), de la structure génétique des agents infectieux (avec, au premier rang, celle des virus), des comportements des hôtes (en particulier l'homme), de l'environnement (changements globaux, aménagement du territoire, pratiques agricoles...). Les systèmes vectoriels, quoique de mieux en mieux compris, restent en perpétuelle évolution.

Ce foisonnement du vivant suggère que, en matière de prévention de la piqure, il faut une réponse résolument pragmatique. On a vu que l'arsenal des moyens et méthodes disponibles offre des solutions, mais leur nombre et leur efficacité sont limités. L'acceptabilité de certaines mesures évolue également. Tout comme

le risque zéro, la protection totale n'est jamais atteinte. La conduite à tenir n'est pas la même en situation normale et en situation à haut risque infectieux, par exemple lors d'une épidémie de dengue ou en zone impaludée. Une approche bénéfice-risque est ainsi nécessaire pour définir la meilleure stratégie préventive. L'existence ou non d'un traitement des maladies mises en jeu est également à considérer. Par exemple, un recours thérapeutique est presque toujours possible en cas de maladies bactériennes, alors que ce n'est pas le cas pour les encéphalites ou les fièvres hémorragiques virales. Et des vaccins existent pour certaines maladies (fièvre jaune, encéphalite à tiques).

Face à ce constat, les scientifiques s'efforcent d'améliorer la connaissance des mécanismes d'identification et de reconnaissance de l'hôte par l'arthropode vecteur, pour mieux les contrarier, et imaginent des procédés novateurs pour pallier les limitations actuelles. En l'état actuel des recherches, on espère disposer d'ici quelques années de nouvelles familles de composés

actifs contre les arthropodes, composés notamment issus du fantastique réservoir de molécules que constitue l'ensemble des plantes et des micro-organismes.

■ BIBLIOGRAPHIE

Haut conseil de la santé publique, **Recommandations sanitaires pour les voyageurs 2013** (à l'attention des professionnels de santé), *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, n° 22-23, 4 juin 2013 (téléchargeable sur <http://www.invs.sante.fr>).

G. Duvallet et L. de Gentile, **Protection personnelle antivectérielle**, IRD Éditions, 2012.

P. Carnevale, V. Robert *et al.*, **Les anophèles – Biologie, transmission du *Plasmodium* et lutte antivectérielle**, IRD Éditions, 2009.

D. Fontenille *et al.*, **La lutte antivectérielle en France – Disease control in France**, IRD Éditions, 2009.

Logiciels d'identification (identiciels) disponibles sur www.mivegec.ird.fr.

Quels sont les effets à long terme ?

Les scientifiques s'intéressent aussi à l'effet à long terme des mesures de protection individuelle sur la santé. La difficulté est d'évaluer l'impact de faibles expositions pendant une longue période. Cette difficulté est accrue lors d'exposition à des cocktails de substances actives, ce qui est le cas en pratique. Les chercheurs étudient aussi l'effet des moyens de protection personnelle sur l'environnement : leur utilisation peut conduire à une accumulation de substances toxiques dans les chaînes alimentaires, à des déséquilibres écologiques, à l'apparition de résistances aux produits insecticides. Autant de questions qui restent à éclaircir et qui rappellent que toute action contre certains organismes vivants peut avoir des effets indésirables sur d'autres. ■

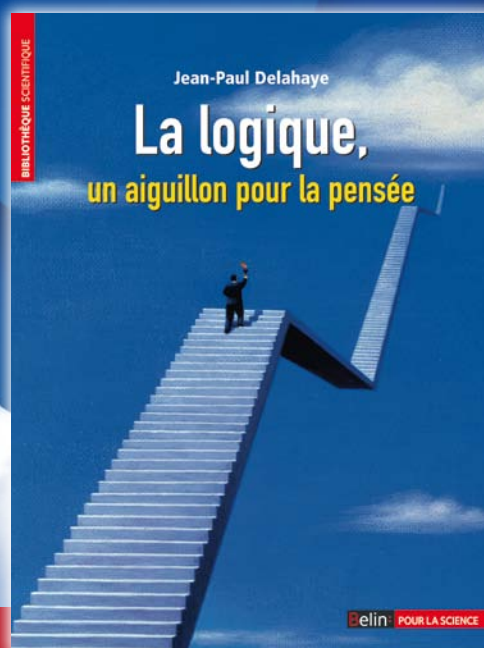
La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

La logique – prise au sens large – a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'infinie variété des infinis, les étranges hyperensembles, l'indécidabilité de Turing, les déconcertants paradoxes probabilistes... Cet ouvrage sur la logique moderne des sciences intéressera autant mathématiciens que philosophes et curieux, intrigués par le monde abstrait des raisonnements !

Éditions Belin / Pour la Science 2012
200 pages – 27 euros – ISBN 978-2-8424-5115-8

Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr



HISTOIRE DES SCIENCES

Erreurs fécondes

En 1982, l'Américain Nick Herbert imagine un télégraphe plus rapide que la lumière. Dans les années 1940, l'Allemand Max Delbrück explore la nature des gènes en étudiant des virus. Bien qu'erronées, leurs hypothèses ont entraîné des avancées majeures.

David Kaiser et Angela Creager

Comme la majorité des êtres humains, la plupart des scientifiques font nombre d'erreurs au long de leur parcours. Toutes, cependant, ne revêtent pas la même importance. Parmi les innombrables erreurs insignifiantes, les historiens ont découvert plusieurs exemples d'idées fausses qui se sont révélées fécondes. Ces erreurs, ayant trait à des caractéristiques fondamentales du monde, ont entraîné de nouvelles recherches qui ont débouché sur des percées majeures.

Le modèle atomique conçu par le physicien danois Niels Bohr en 1913, par exemple, s'est révélé faux, mais a ouvert la voie à la mécanique quantique. En 1912, le météorologue allemand Alfred Wegener exposait sa théorie de la dérive des continents, expliquant ces mouvements par des forces centrifuges. Le mécanisme d'action était erroné, mais le phénomène, alors décrié, a été confirmé, et ses travaux ont conduit à la théorie de la tectonique des plaques. Deux autres exemples, l'un en physique dans les années 1970, l'autre en biologie dans les années 1940, illustrent particulièrement bien l'impulsion que certaines erreurs peuvent donner aux sciences.

Les auteurs de ces erreurs – Nick Herbert et Max Delbrück –, tous deux chercheurs, avaient chacun tenté de répondre à des questions profondes et peu traitées. En combinant des idées qui n'avaient alors été examinées que par de rares scientifiques, ils ont réalisé des travaux préparatoires essentiels pour les domaines aujourd'hui prolifiques de l'information quantique et des biotechnologies.

La première erreur a contribué à éclairer un désaccord né aux premiers jours de la mécanique quantique, en 1927, lorsque Einstein et Bohr ont engagé une série de débats sur la nature et les implications de la théorie quantique. Einstein s'était attaqué à plusieurs étrangetés de la théorie. Les équations de la mécanique quantique, par exemple, ne donnaient que des probabilités de présence d'une particule et non des résultats définitifs. Comment pouvaient-elles suffire à décrire le monde ? Dieu ne joue pas aux dés, disait Einstein. La question en était restée là pendant 30 ans. Aucun des deux hommes n'avait pu convaincre son opposant.

Le commutateur supraluminique FLASH

Des décennies plus tard, un jeune physicien d'Irlande du Nord, John Bell, revient sur les échanges entre Einstein et Bohr. Bell revisite une expérience de pensée publiée en 1935 par Einstein et deux collègues, Boris Podolsky et Nathan Rosen. Souhaitant montrer que la mécanique quantique ne décrivait pas toute la réalité physique d'un système, les trois physiciens avaient imaginé une source projetant des paires de particules quantiques couplées – des photons, par exemple – dans des directions opposées. Leur expérience de pensée illustrait une étrange conséquence de la mécanique quantique : lorsque deux particules sont couplées d'une certaine façon (on dit aujourd'hui qu'elles sont « intriquées »), leurs propriétés restent corrélées. Dans l'expé-

rience de pensée, il suffisait ainsi de mesurer une grandeur physique de l'une pour connaître la valeur de la même grandeur pour l'autre. Pour les trois physiciens, cette corrélation était telle qu'elle impliquait l'existence d'une propriété commune aux deux particules, non décrite par la mécanique quantique. Mais Bell conçoit une variante de l'expérience de pensée où la mécanique quantique elle-même contredit cette idée.

En 1964, dans un article bref et élégant, il démontre qu'il existe certaines corrélations partielles qui ne s'expliquent que par la mécanique quantique. Il suffirait de les observer expérimentalement pour mettre en défaut la thèse d'Einstein, Podolsky et Rosen. De plus, conclut Bell, la corrélation entre les deux mesures étant instantanée, toute théorie capable de reproduire les corrélations quantiques à l'aide de « paramètres supplémentaires » impliquerait que le signal responsable de cette corrélation se propage instantanément d'une particule à l'autre.

L'article de Bell reçoit un accueil mitigé. Plusieurs physiciens remarquent que la propagation instantanée de signaux violerait les lois de la relativité restreinte d'Einstein, solidement étayées, qui énoncent qu'aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière. Nick Herbert est de ceux-là. Physicien dans le secteur industriel de la baie de San Francisco, il participe à un groupe de discussion informel, le Groupe de physique fondamentale. Les participants, pour la plupart de jeunes physiciens ayant obtenu leur doctorat dans des universités prestigieuses,