

L'ÉCOLOGIE DES SYSTÈMES VECTORIELS : UNE SOMME DE COMPLEXITÉS

Rodhain F

*Institut Pasteur, 25-28 rue du Docteur Roux, Paris.**Med Trop 2008 ; 68 : 226-230*

RÉSUMÉ • C'est à la faveur d'une très longue co-évolution qu'apparurent des associations, de types très variés, entre arthropodes et micro-organismes. En particulier, des groupes entiers d'agents infectieux (virus, bactéries, protozoaires, helminthes) ont acquis la faculté d'être transmis d'un vertébré à un autre par des arthropodes hématophages (insectes et acariens) ; ainsi se sont constitués des systèmes biologiques comportant trois composants : le micro-organisme, son ou ses vecteurs, son ou ses hôtes vertébrés. Le fonctionnement de ces systèmes vectoriels s'avère extrêmement complexe dans les conditions de la nature, la circulation du germe nécessitant que soient réunies de nombreuses de conditions liées à la bio-écologie et à la génétique des populations de chacun des trois éléments impliqués. L'arthropode ne joue d'ailleurs pas seulement un rôle de transmetteur ; il peut aussi, selon les cas, servir de réservoir ou de disséminateur par exemple. Par ailleurs, les modifications subies par l'environnement, qu'elles soient d'origine naturelle ou qu'elles résultent des activités humaines (altérations des milieux naturels, évolution des pratiques agro-pastorales, urbanisation, développement des moyens de transport, changement climatique, ...), ont pour conséquences des évolutions, souvent profondes et rapides, des modalités de fonctionnement de ces systèmes. Au total, l'expression « écologie des systèmes vectoriels » reflète bien la grande complexité d'une épidémiologie liée à un mode original de transmission d'agents infectieux. Dès lors, la prévision des risques infectieux et l'élaboration des actions de prévention en sont rendues particulièrement délicates. A l'évidence, une bonne compréhension des systèmes vectoriels dans leur contexte naturel ne saurait être envisagée sans une véritable approche écologique de ces maladies pour lesquelles il est indispensable de développer une surveillance épidémiologique extrêmement attentive. Ces actions ne relèvent pas seulement de la compétence des médecins ou des vétérinaires ; elles supposent la coopération de nombreux spécialistes oeuvrant dans domaines très variés comme la microbiologie, l'entomologie, la systématique, la climatologie, l'écologie, l'urbanisme, les sciences sociales, le développement économique et bien d'autres.

MOTS-CLÉS • Arthropodes vecteurs, entomologie médicale, systèmes vectoriels, capacité vectorielle, compétence vectorielle, écologie, épidémiologie.

ECOLOGY OF VECTOR SYSTEMS: A TANGLE OF COMPLEXITY

ABSTRACT • The long co-evolutionary process between arthropods and microorganisms has resulted in a wide variety of relationships. One such relationship involves a wide range of infectious agents (virus, bacteria, protozoa, helminthes) that use blood-feeding arthropods (insects and mites) as vectors for transmission from one vertebrate to another. Transmission involves three components, i.e., microorganism, vector(s), and vertebrate host(s). Study under natural conditions has shown that the underlying mechanisms are extremely complex with circulation of the infectious agents depending on numerous conditions linked not only to bioecology but also to genetic factors in all three component populations. The role of arthropods sometimes goes beyond that of a transmitter of disease. In some cases they also serve as reservoirs or disseminators. In addition changes in the environment whether due to natural causes or human activities (e.g. pollution, agropastoralism, urbanization, transportation network development, and climate change) can have profound and rapid effects on the mechanisms underlying these vector systems. In short the ecology of vector systems closely reflects the extreme complexity of epidemiological studies on diseases caused by infectious agents depending on this type of transmission. As a result prediction of infectious risks and planning of preventive action are difficult. It appears obvious that a good understanding of vector systems in their natural context will require a truly ecological approach to the diseases that must be the focus of extremely close epidemiologic surveillance. Achieving this goal will necessitate more than the skills of physicians and veterinarians. It will require the contribution of specialists from a variety of fields such as microbiology, entomology, systematics, climatology, ecology, urbanism, social sciences, economic development, and many others.

KEY WORDS • Arthropod vectors – Medical entomology – Vector systems – Vector capacity – Vector competence – Ecology – Epidemiology.

**Les systèmes vectoriels :
des associations très anciennes****Les agents infectieux sont très anciens**

Les virus seraient aussi vieux que l'ADN. De plus, leur nombre, certainement considérable, nous est inconnu ; nous ne pouvons même pas en avoir une idée, ne serait-ce qu'approximative (1). Les bactéries sont bien vieilles elles aussi. On aurait décrit à ce jour quelque 10 000 « eubactéries » mais, bien entendu, elles sont certainement beaucoup plus nombreuses. Quant aux parasites (au sens traditionnel du terme), uni- ou pluricellulaires, ils existent depuis qu'existe la cellule eucaryote (2). Ils sont si nombreux que certains ont estimé qu'ils représenteraient 50% (voire davantage) des formes animales vivantes actuelles (3).

De leur côté, au nombre d'au moins 1 million, les arthropodes, eux aussi, sont très anciens. Leurs ancêtres remonteraient au Cambrien (vers 540 millions d'années), voire peut-être au Précambrien (vers 600 millions d'années). Au sein de cet énorme ensemble, les Insectes (plutôt appelés aujourd'hui Hexapodes), dateraient du Dévonien (400 millions d'années), et les premières formes ailées du Carbonifère (290 millions d'années). Parmi les Arthropodes, quelque 14 500 espèces actuelles seraient hématophages. Les agents infectieux avaient donc tout à la fois l'embaras du choix et le temps de choisir !

Une si longue cohabitation, portant sur des centaines de millions d'années, rendait inévitables les rencontres, et donc les échanges et les ajustements qui ont abouti à des associations très variées, les unes assez lâches et temporaires, d'autres très étroites, au point de devenir, parfois, obligatoires pour la survie de l'un au moins des partenaires.

C'est ainsi qu'avec une certaine habileté, des groupes entiers d'agents infectieux ont choisi de se faire transmettre d'un vertébré à un autre par un arthropode vecteur (ce terme étant ici utilisé dans une acception classique, sans doute quelque peu restrictive, c'est-à-dire un arthropode hématophage assurant une transmission biologique active à ce « parasite », mot employé au contraire ici dans un sens très large).

Malheureusement, pour le moment, les paléontologues ne nous fournissent guère de traces probantes de ces unions passées. Certes, nous pensons que des acariens hématophages auraient vécu aux dépens des reptiles dès le Permien (environ 250 millions d'années) et on a tout de même repéré, chez des Cératopogonides piégés, il y a 100 millions d'années, dans l'ambre de Birmanie, des restes de protozoaires sanguicoles Plasmodiids (du genre *Paleohaemoproteus*) vraisemblablement parasites de reptiles et transmis par ces Diptères (4). Nous sommes

Correspondance : f.rodhain@noos.fr

là dans le domaine de la paléo-épidémiologie, celui des schémas de co-évolution des différents groupes biologiques.

Le fonctionnement des systèmes vectoriels

Quoi qu'il en soit, le résultat est que nous trouvons aujourd'hui devant un grand nombre de « systèmes vectoriels », ces ménages à 3 constitués d'un agent infectieux (le « parasite »), d'un ou plusieurs hôtes vertébrés et d'un ou plusieurs arthropodes vecteurs.

Comment fonctionnent ces systèmes dans la nature ?

Examinons, tout d'abord, le fonctionnement d'un système vectoriel théorique en le supposant isolé de son environnement. On peut le décomposer en 4 systèmes biologiques élémentaires intervenant successivement :

- un système vertébré-parasite, avec les éventuels phénomènes pathologiques et immunologiques qui l'accompagnent parfois; le bon fonctionnement de ce système permet le développement du parasite jusqu'à un stade infectant pour le vecteur ;

- un système vertébré-arthropode, qui représente le contact entre un vertébré infectant et un arthropode réceptif, vecteur potentiel, ceci étant étroitement lié aux particularités écologiques de l'un et de l'autre et à la dynamique de leurs populations ;

- un système parasite-vecteur, qui doit permettre le bon développement du parasite et l'amener ainsi au stade infectant pour l'hôte vertébré. Cette phase ne peut se dérouler que si l'arthropode en question appartient à une espèce capable d'assurer le développement du parasite (n'importe qui ne transmet pas n'importe quoi !). Si tel est le cas, après infection de l'arthropode, le parasite pourra subir, selon les cas, une (ou des) multiplication(s), un (ou des) changement(s) de stade, tous phénomènes se déroulant en des sites particuliers de l'organisme de l'arthropode et selon une séquence précise, variable en fonction du système considéré. La durée nécessaire à la réalisation de cette phase constitue l'« incubation extrinsèque », une donnée qui revêt une très grande importance pour les épidémiologistes.

- un autre système vecteur-vertébré, mettant en contact l'arthropode devenu infectant et un vertébré réceptif, c'est-à-dire susceptible d'être infecté par le parasite en question et non immun vis-à-vis de lui.

Bien entendu, la complexité des phénomènes mis en jeu dans ce mode de transmission est telle que, le plus souvent, un tel système ne fonctionne pas. Le déroulement des événements se trouve bloqué à une phase ou une autre. Les échecs sont ici la règle et les transmissions réussies, l'exception.

A chacune de ces étapes, en effet, inter-

viennent des processus complexes, assurant un contrôle qualitatif et quantitatif de l'infection; leur action s'exerce au niveau de différentes « barrières » dont le mécanisme et le siège sont variables. Au niveau du système parasite-vecteur, en particulier, ces barrières déterminent la « compétence vectorielle », un élément qu'il est essentiel de pouvoir apprécier pour comprendre l'épidémiologie de la maladie correspondante (5). De plus, les arthropodes mettent en jeu des défenses immunitaires selon des mécanismes qui leur sont propres. Il arrive aussi parfois que les arthropodes souffrent de leur infection, et ces effets pathogènes ne sont pas sans conséquence épidémiologique.

Si, maintenant, nous replaçons ce système vectoriel dans les conditions de la nature, nous allons observer, sur chaque élément et sur chaque étape, l'action des facteurs environnementaux. Ainsi, interviendront des particularités tenant à la bio-écologie, notamment la dynamique des populations, de chacun des organismes impliqués, ce qui conditionnera les contacts entre leurs populations. Par exemple, pour ce qui est du vecteur, il doit non seulement être compétent, mais encore il faut que sa population soit suffisamment abondante, que sa longévité soit suffisante, que ses préférences trophiques permettent des contacts étroits avec les vertébrés réservoirs et les vertébrés réceptifs, etc. Tout ceci conditionne sa « capacité vectorielle » qui, bien entendu, pourra varier non seulement d'un site à un autre, mais aussi, dans un même lieu, avec la saison puisque chacun des facteurs qui la composent varie lui-même dans le temps (5). De la même façon, pour comprendre le fonctionnement du système, il convient aussi de bien connaître la bio-écologie de chacun des vertébrés impliqués, qu'il s'agisse des réservoirs naturels, des amplificateurs, des disséminateurs, des détecteurs ; le volume de leur populations, leur vitesse de reproduction, leurs territoires et leurs migrations, leur état immunitaire, etc., sont autant d'éléments variables, eux aussi, en fonction de la saison. On comprend bien que les lieux, les moments, l'intensité des contacts entre ces éléments du système en dépendent directement. Et les modalités de la circulation des agents infectieux sont évidemment conditionnées par ces contacts (6). On saisit là toute la complexité du travail de l'épidémiologiste.

Mais ces considérations ne sont pas suffisantes. Les choses sont rendues plus complexes encore quand on réalise que ce ne sont pas les espèces des uns et des autres qu'il convient de prendre en compte, mais bien leurs populations naturelles. C'est, en effet, au niveau des populations en présence que tout se joue: populations du parasite, populations de ses vecteurs, populations de ses hôtes. Ainsi, pour ne considérer que le vecteur, il est fréquent que les différentes popu-

lations qui représentent une espèce dans l'ensemble de son aire de répartition ne présentent pas la même compétence vis-à-vis d'un agent infectieux donné. Cela signifie notamment qu'un résultat établi en un lieu n'est pas nécessairement applicable ailleurs, là où prévaut une autre population de l'arthropode. L'approche fournie par la génétique des populations de vecteurs prend ici toute son importance.

Il en est de même, bien entendu, pour ce qui est des vertébrés impliqués à des titres divers dans la circulation du germe, qui présentent leur propre polymorphisme génétique. Ainsi, on sait depuis longtemps qu'existe, une « prédisposition » génétique, ce qu'autrefois on appelait, chez l'homme, le « terrain ». Cette prédisposition peut, en premier lieu, s'exprimer au niveau de la « réceptivité », c'est-à-dire l'aptitude à s'infecter avec un micro-organisme donné; elle peut encore s'exprimer au niveau de la « sensibilité », c'est-à-dire l'aptitude à développer ou non une maladie une fois que l'on est infecté. Parmi les infectés, certains vont présenter une maladie sévère, d'autres encore ne présenteront aucun signe de maladie. Pratiquement jamais détectées, ces infections cliniquement inapparentes peuvent avoir une importance épidémiologique considérable car ces sujets peuvent néanmoins, dans certains cas, être à l'origine de l'infection de vecteurs. Peut-être, en outre, certains individus sont-ils de « super-transmetteurs » (même si cela ne semble pas encore clairement démontré dans le domaine des maladies à vecteurs). En revanche, des sujets bel et bien malades peuvent s'avérer incapables d'infecter des vecteurs potentiels se gorgeant sur eux. Tous ces phénomènes sont sous la dépendance de facteurs d'ordre génétique; ils concernent tous les vertébrés, y compris bien sûr l'espèce humaine. Nous sommes décidément tous parents, mais tous différents. Et nous ne sommes pas égaux devant la maladie.

Il convient maintenant d'examiner les différents rôles joués par les arthropodes dans le fonctionnement des systèmes vectoriels. Le plus souvent, c'est le rôle de vecteur qui est le seul retenu. Ce rôle est déjà, en lui-même, complexe : il permet au parasite de trouver un hôte, de pénétrer dans cet hôte, de le quitter ensuite. Par ailleurs, pour un même agent infectieux, les différentes espèces de vecteurs ne jouent pas le même rôle: certaines espèces assurent la circulation du parasite parmi les hôtes vertébrés réservoirs, au sein de cycles selvatiques, canopéens pour les uns, au niveau du sol pour d'autres, avec quelques espèces assurant le passage d'un type de cycle à un autre; d'autres sont à l'origine de l'infection d'hôtes inhabituels ou accidentels; d'autres encore, prenant le relais des précédents, sont responsables de la transmission à l'homme, ou à des animaux domestiques, parfois même en milieu urbain

pour peu que leur écologie péri-domestique s'y prête.

Cependant, le plus souvent, les arthropodes ne se contentent pas d'être des vecteurs, c'est-à-dire d'assurer la transmission biologique du parasite parmi des populations de vertébrés (7). Leur intervention permet aussi d'éviter une perte de parasites dans le milieu extérieur. Elle permet également leur propagation en dépit de l'immobilisation de l'hôte par une maladie aiguë. Ce sont les vecteurs qui, par le jeu de leurs préférences trophiques, aident à franchir les barrières d'espèce. D'autres encore, effectuant régulièrement ou épisodiquement des déplacements importants, vont jouer un rôle de disséminateur de parasites. Par leur longévité et, parfois, par l'existence d'une transmission verticale, ils peuvent constituer un réservoir naturel efficace, souvent même plus efficace que le vertébré. En cas de co-infection par des agents proches mais différents, ils permettent enfin aux parasites (au moins aux virus) d'évoluer par recombinaisons ou réassortiments.

A titre d'exemple, il peut être important de distinguer ici ce qui, sur le plan épidémiologique, distingue les modalités de la transmission par les tiques d'une part, par les insectes ailés d'autre part (8). Les différences tiennent à leur dispersion active (généralement forte chez les insectes, faible chez les tiques), le nombre et la fréquence des repas sanguins (repas répétés et fréquents chez les insectes, moins nombreux et plus espacés chez les tiques, notamment les Ixodidés), le nombre de leurs hôtes (grand chez les insectes, beaucoup plus restreint chez les tiques), leur longévité (faible chez les insectes, prolongée chez les tiques), leur reproduction (souvent forte chez les tiques Ixodidés, mais avec une survie plus aléatoire). Il faut encore mentionner ici la transmission possible par co-repas chez les tiques.

Ceci illustre bien l'importance de la biologie du vecteur. On comprend pourquoi beaucoup de maladies à tiques sont des maladies «à foyers naturels», confinées à un milieu écologique particulier (encéphalites à tiques, fièvres récurrentes), alors que d'autres affections deviennent cosmotropicales comme celles que transmet *Aedes aegypti*, ou même potentiellement cosmopolites, comme les maladies à poux puisque cet ectoparasite a maintenant été disséminé par l'homme sur la Terre entière.

D'une manière générale, l'écologie d'un virus, d'un parasite, peut se lire à deux niveaux:

- lorsqu'il est à l'intérieur de son hôte, vertébré ou arthropode : c'est un problème de biologie cellulaire,

- dans l'environnement : c'est alors l'écologie de l'hôte, vertébré ou arthropode qui est à considérer ; c'est ainsi qu'un virus peut être qualifié d'«urbain» ou de «forestier».

L'environnement se modifie

En outre, comme s'il fallait encore compliquer les choses, tout ceci évolue en permanence avec le temps. Nous travaillons sur du vivant et c'est une caractéristique du vivant que d'évoluer en permanence. Il en résulte des changements épidémiologiques dont certains, assez brusques, sont appelés aujourd'hui des «émergences». Sans nous étendre ici sur les phénomènes évolutifs subis par les agents infectieux, les champions en la matière étant sans doute les virus à ARN, examinons la question sur le terrain de l'écologie.

Notre monde change. C'est un fait certain. C'est même une loi générale. Héraclite d'Ephèse nous l'avait bien dit, il y a quelque 25 siècles de cela : «Rien n'est permanent, hormis le changement».

Ceci n'est pas nouveau : le début du phénomène date du moment où, il y a quelque 10000 ans, l'homme a décidé de prendre en charge l'organisation de la nature. Ce fut un événement majeur pour l'écologie de notre planète qui, petit à petit, en fut bouleversée. Nous entrons ici dans le domaine de l'archéo-épidémiologie.

Les paysages que nous contemplons aujourd'hui ont été modelés ou créés par l'homme. Aucun écosystème n'a été épargné. Les altérations des milieux naturels, qu'il s'agisse de déforestations, de reforestations, d'assèchement de zones humides, de nouvelles pratiques de gestion des eaux de surface, etc. sont autant de bouleversements qui ont des conséquences majeures sur les systèmes vectoriels.

L'homme a domestiqué des végétaux, selon des modalités très diverses dont un exemple, la pratique de l'irrigation, nous concerne tout particulièrement. Il a domestiqué des animaux, selon des modalités très diverses également, allant de la ferme familiale ou du troupeau transhumant à l'élevage industriel, en batterie, d'individus tous génétiquement semblables. Alors qu'autrefois, les contacts entre les hommes et les vecteurs associés aux animaux sauvages demeuraient rares, les zoonoses, ces maladies des animaux susceptibles de «passer» sur l'homme, n'étaient guère fréquentes. Progressivement, cette cohabitation instaurée par le développement de l'élevage a entraîné des contacts à la fois très étroits et très fréquents et beaucoup de vecteurs zoonanthropophiles se sont mis à proliférer ; ce cheptel constituant des réservoirs pour nombre de micro-organismes, des sources de sang pour les hématophages, des disséminateurs par les transhumances et le transport international d'animaux sur pied, d'autres zoonoses sont apparues et sont rapidement devenues fréquentes. Ainsi, de nouvelles associations se sont créées, de nouveaux cycles se sont mis à fonctionner.

Un exemple peut nous permettre de nous rendre compte de l'importance de l'action conjuguée de ces diverses modifications : celui de l'évolution de l'encéphalite japonaise (JE) dans les trois derniers siècles qui illustre bien le rôle déterminant joué par l'homme dans l'émergence de cette maladie en Asie orientale (9).

Parmi les arbovirus, au sein du genre Flavivirus, la lignée conduisant au séro-complexe JE semble avoir divergé il y a 1000 à 2000 ans, un phénomène qui aurait pu avoir lieu en Afrique ou déjà en Asie occidentale. Au sein de cette lignée, le virus JE lui-même se serait différencié encore plus récemment. Selon des travaux récents, sa divergence à partir d'un ancêtre commun ne remonterait guère au-delà de 300 ans, et la plupart des souches actuelles auraient émergé dans les 130 dernières années. Est-ce seulement une question de pression démographique ? Est-ce le résultat des modifications de l'environnement liées aux innovations technologiques dans le domaine agro-pastoral qui auraient pu faire émerger de nouvelles souches virales ?

La poussée démographique remarquable qu'accuse la plupart des pays d'Asie, quel que soit leur niveau de développement, a rendu nécessaires un accroissement de l'élevage porcin et une augmentation des surfaces consacrées à la riziculture, souvent au travers de grands programmes d'irrigation. Plus de 80 % des rizières du monde, dont le total est aujourd'hui compris entre 150 et 180 millions d'hectares, sont situés en Asie (dont un peu plus de 100 millions d'hectares en région d'endémie d'encéphalite japonaise).

C'est bien l'homme qui, par ses activités agro-pastorales, a assuré la réussite de l'encéphalite japonaise :

- ses rizières et ses animaux domestiques ont considérablement favorisé les populations de *Culex* vecteurs,

- ses canards, ses porcs surtout, sont d'excellents amplificateurs pour le virus,

- ses propres populations rurales, directement exposées, assurent au virus la disposition constante de jeunes enfants réceptifs.

L'intensité et la saisonnalité de la transmission sont liées au climat bien sûr, mais aussi aux activités humaines. C'est l'homme en effet qui influe directement sur l'existence et l'abondance des vecteurs majeurs, comme sur celles des amplificateurs du virus : canards souvent, porcs partout ou presque. La sérologie de ces derniers traduit bien les variations saisonnières de la circulation du virus. Les pics de densité des moustiques coïncident généralement avec la moisson du riz ; ils sont suivis par les pics épidémiques, qui, eux coïncident avec le maximum d'infection chez les vecteurs. Enfin, on conçoit que l'encéphalite japonaise soit une maladie rurale, liée à la proximité, dans le cadre des fermes familiales traditionnelles, des habitations, des porcheries et des rizières avec

leurs moustiques et leurs canards, tous les facteurs favorables à la circulation du virus se trouvant ainsi réunis dans les villages mêmes.

Mais, bien sûr, c'est bien le développement de l'agriculture et de l'élevage qui a permis à l'espèce humaine d'accroître dans des proportions extraordinaires ses populations ; la progression démographique exponentielle a fini par amener la population mondiale à dépasser 6,5 milliards d'individus. Individus qu'il faut bien tenter de loger et de nourrir, et c'est l'amorce d'un cercle vicieux qui n'est pas encore près de s'arrêter de tourner. On parle de 10 milliards en 2100 comme d'une estimation raisonnable.

A cela, il convient d'ajouter trois impacts majeurs :

• *L'urbanisation*

Nous ne nous étendrons pas sur ce phénomène qui n'est rien d'autre qu'une modification écologique particulière. Adaptant son habitat pour tenir compte des contraintes climatiques, de l'exode rural et de l'augmentation de la population, l'homme a petit à petit créé ces écosystèmes urbains et périurbains (10). En principe pour lui seul, mais des astucieux en ont profité : des vertébrés extrêmes (rats, pigeons, ...) et des insectes ou acariens (moustiques, triatomés, ornithodores, ...) s'y sont adaptés et prolifèrent, au point qu'aujourd'hui, un nombre sans cesse croissant de maladies à vecteurs (que l'on a souvent tendance, à tort, à considérer comme des maladies uniquement rurales) s'observe désormais en ville, parfois avec une particulière fréquence : filariose lymphatique, paludisme, dengue et fièvre jaune, infections à virus West Nile, maladie de Lyme, maladie de Chagas, fièvre récurrente, ... et bien d'autres (11). Ce qui caractérise le milieu urbain, c'est avant tout la densité de population qui est un facteur très favorable à la transmission des agents infectieux. Mais une ville et, a fortiori, une mégapole du Tiers Monde, est un milieu très hétérogène ; au sein d'une même agglomération, les situations varient grandement d'un quartier à un autre, en raison, par exemple, des différences dans l'approvisionnement en eau, dans l'évacuation des déchets, la qualité de l'habitat, la répartition des espaces verts ou la surpopulation, etc., tous facteurs dont l'importance est très grande en termes de contacts homme-vecteurs.

• *Les déplacements*

Qu'il s'agisse d'hommes voyageurs, de déplacements d'animaux, de transports de marchandises. Les progrès technologiques ont aboli les distances et fait tomber les barrières géographiques et écologiques qui, autrefois, nous protégeaient ; ils ont ainsi contribué à bouleverser l'écologie d'une planète qui paraît se rétrécir. La rapidité et la fréquence des déplacements sont à l'origine d'un nombre sans cesse croissant de bio-

invasions dont certaines peuvent entraîner des émergences à plus ou moins long terme (12). Chacun en a des exemples en mémoire : nous pouvons nous rappeler des émergences anciennes, comme l'installation en Amérique de la fièvre jaune, de l'onchocercose, de la peste, celle d'*Amblyomma variegatum* dans les Caraïbes, et d'autres plus récentes, comme l'expansion d'*Aedes albopictus*, celles du virus West Nile en Amérique, du virus Chikungunya dans l'Océan Indien, ... et bien d'autres.

Tous ces aspects de l'épidémiologie ne sont pas des conséquences de la « mondialisation » ; ils font partie intégrante de cette mondialisation. Chaque jour, on nous signale de nouvelles bio-invasions. La biogéographie n'existe plus ! Il faut reconnaître que, l'homme étant le principal responsable de cet état de choses, nous ne sommes pas les mieux placés pour contrôler les bio-invasions de vecteurs ou de virus.

• *Le changement climatique*

La réalité du phénomène n'est plus guère contestable. Encore faut-il s'entendre sur les termes et savoir de quoi l'on parle.

En premier lieu, il convient de distinguer d'une part les phénomènes météorologiques extrêmes, soudains, ponctuels et localisés, comme les cyclones, les inondations et les vagues de sécheresse, les canicules, ... d'une part, et le « changement climatique » d'autre part. Même si, bien entendu, ces phénomènes ont entre eux des liens importants.

Ces événements ponctuels peuvent sans doute avoir des effets sur les populations de vecteurs. Certains vecteurs peuvent se trouver temporairement favorisés par des inondations ou encore transportés au loin par des vents violents, mais aussi des effets plus subtils pourraient bien se produire ; ainsi, à la suite du passage d'un cyclone sur une île, une population de moustique peut se trouver remplacée par une autre, de la même espèce certes, mais génétiquement un peu différente et dotée, par exemple, d'une autre compétence vectorielle vis-à-vis d'un micro-organisme donné.

Pour ce qui est du changement climatique proprement dit, il faut se rendre compte de la complexité du problème dans la mesure où la température n'est pas le seul facteur en cause ; il nous faut considérer un ensemble de facteurs climatiques, tous interdépendants, qui varient en même temps. Il est donc préférable de parler de « changement climatique » plutôt que de « réchauffement de la planète ».

Enfin, si l'on considère précisément l'évolution de la température, de quelle température parle-t-on ? S'agit-il de la température moyenne annuelle, les minima, les maxima ? Si oui, où, à quelle vitesse, pour combien de temps ? S'agit-il de la température d'été, entraînant des canicules, ou celle des hivers qui seront de plus en plus doux ?

Ou encore est-ce la température moyenne diurne, ou celle de la nuit ? Y a-t-il des régions où le phénomène ne se manifestera pas ? Voir des zones où la température s'abaissera ? Qu'en sera-t-il en milieu urbain ? Les mêmes interrogations peuvent être émises à propos des précipitations, de l'humidité atmosphérique, etc. Assurément, la question n'est pas aussi simple que certains veulent bien le dire, ou le faire croire. Or, suivant ces différentes possibilités, les conséquences sur le fonctionnement des systèmes vectoriels pourront s'avérer bien différentes (13, 10).

On conçoit facilement que les systèmes vectoriels sont sensibles au climat et à ses variations. Au sein d'un de ces systèmes, chacun des éléments qui le composent va devoir s'adapter pour son propre compte ; les relations qu'ils ont tissées entre eux, qui sont à la base même du fonctionnement du système, vont s'en trouver changées ; le système vectoriel lui-même va donc devoir co-évoluer avec tous les autres facteurs de l'écosystème au sein duquel il fonctionne.

Considérons seulement un facteur, le plus fréquemment évoqué : la température. Et imaginons les effets possibles sur le vecteur uniquement : modification de sa distribution et/ou de sa densité, modification de sa longévité, de la durée de son cycle de développement, modification de la durée de l'incubation extrinsèque, modification du taux d'une éventuelle transmission verticale, etc. (14).

Dès lors, les conséquences sur la transmission des maladies pourraient être :

- des modifications de répartition des zones d'endémie et/ou de la dissémination d'épidémies ;
- des variations des saisons de transmission, avec des conséquences sur les niveaux d'immunité dans les populations ;
- des variations des intensités de transmission, avec des conséquences sur les incidences et aussi sur l'immunité.

Il est clair que tous ces effets ne se manifesteront pas avec la même intensité suivant l'évolution présentée par l'humidité (un facteur sans doute plus important que la température pour nos vecteurs), ou bien suivant que l'on se trouve en zone rurale ou en zone urbaine. Ces évolutions, ces adaptations, ne se feront pas selon les mêmes modalités suivant les lieux et les saisons. Pour de multiples raisons, les effets ne seront donc pas les mêmes partout.

De plus, et ceci est fondamental, les conséquences finales en termes de santé et de prévention varieront grandement selon les capacités de détection, de préparation et de réaction du pays concerné. A cet égard également, nous ne sommes pas égaux devant la maladie, ou du moins devant le risque de maladie. Et, comme à l'habitude, ce seront les pays les moins développés qui souffriront le plus.

Indiscutablement, bien des choses vont donc se trouver changées, de manière durable, dans le fonctionnement des sys-

tèmes à vecteurs. Ce n'est pas une raison pour accuser à tort, ou du moins sans preuve, le changement climatique lors de l'observation de tout phénomène inhabituel. Nous devons faire preuve de beaucoup de prudence et de discernement dans nos approches et nos prévisions, en évitant les raisonnements simplistes du genre: «augmentation de la température -> introduction d'un vecteur -> introduction de maladies». Même s'il est le plus souvent indispensable, le vecteur n'est généralement pas suffisant. Il est rare qu'il soit le seul facteur limitant.

Il faut, en outre, rappeler que les émergences de maladies à vecteurs (et même, plus généralement, des maladies infectieuses) ne sont généralement pas dues à un évènement unique. Ces émergences sont toujours pluri-factorielles ; elles sont le résultat des effets conjoints d'un certain nombre de facteurs intervenant à un moment donné en un même lieu, la température, ou l'humidité, n'étant qu'un de ces facteurs. Elles sont le résultat d'un concours de circonstances.

Par ailleurs, si, en effet, le monde change, notre perception du monde évolue également, et les spécialistes de santé publique doivent bien en tenir compte.

Cela signifie que, devant une situation donnée, les réactions des populations ne sont pas nécessairement les mêmes. Le niveau économique intervient bien sûr, mais pas seulement lui. L'organisation sociale, la psychologie des populations, la politique, ont aussi leur mot à dire. Nous ne nous situons pas seulement dans un contexte climato-biologique, mais également dans un contexte économique, social et politique. Pour différentes raisons, les réponses apportées à un phénomène nouveau ne seront pas les mêmes ici et là.

Une somme de complexités

Au total, l'expression «écologie des systèmes vectoriels» est bien le reflet de la grande complexité d'une épidémiologie liée avant tout à mode original de transmission d'agents infectieux. On s'aperçoit vite, à la lumière de ce qui vient d'être dit, de l'énorme quantité de facteurs qu'il convient de prendre en considération pour comprendre l'éco-épidémiologie d'une maladie à transmission vectorielle. Les modèles mathématiques demeurent, pour le moment, incapables de prendre en compte tous ces facteurs. Dans ces ménages à 3, toute la stratégie des rendez-vous dépend des préférences écologiques des uns et des autres et des dynamiques de leurs populations.

Comment, dès lors, concevoir la prévention ? Comment prévoir avec quelques chances raisonnables de succès les évolutions des situations, les risques infectieux ? Comment faire pour éviter de nous trouver du jour au lendemain confrontés, comme c'est si souvent le cas aujourd'hui, à une évo-

lution imprévue, à une émergence inattendue, et d'avoir à réagir dans l'urgence, a posteriori, c'est-à-dire trop tard ?

A l'évidence une approche écologique de l'épidémiologie s'impose. Les maladies infectieuses, et pas seulement à transmission vectorielle, doivent être replacées dans leur contexte naturel. Il est clair que l'approche médicale traditionnelle, limitée à la détection des cas cliniques et au traitement individuel des malades, aux campagnes de vaccination et aux épandages d'insecticides, ne saurait, à elle seule, résoudre de tels problèmes ; l'expérience montre que nous ne pouvons nous satisfaire de cette attitude, certes indispensable, mais manifestement insuffisante. La véritable compréhension des systèmes vectoriels nécessite de se placer beaucoup plus en amont. Il est indispensable de se trouver sur place pour approcher la biologie et les inter-relations des hôtes et des vecteurs, pour regarder vivre les gens, en fonction des milieux et des saisons. Il nous faut revenir sur le terrain, ce laboratoire qui n'aurait jamais du être délaissé comme il le fût. Malheureusement, les médecins, et même les épidémiologistes, ne sont plus des naturalistes.

Conclusion

En conclusion, il convient de se souvenir que le fonctionnement d'un système vectoriel n'est rien d'autre qu'une lutte incessante entre nos trois partenaires : le microbe, le vecteur, le vertébré. Bien souvent, ces ménages à trois, qui évoluent sans arrêt, ne font pas parler d'eux ; mais, parfois aussi, ils croient bon d'attirer l'attention et de défrayer la chronique. Dans ces affaires, les hommes, sont parfois partie prenante et se trouvent, de ce fait, engagés dans le jeu complexe de ces relations tantôt calmes, tantôt conflictuelles. Nous avons pu parfois gagner des batailles, mais l'issue de la guerre demeure incertaine. En tous cas, même si cela a pu réussir dans quelques cas, il n'est guère réaliste d'espérer gagner la guerre par l'élimination définitive de tel micro-organisme ou tel insecte. Il nous faudra plutôt nous adapter, c'est-à-dire apprendre à être en avance sur eux, nous montrer plus intelligents qu'eux.

Pour faire face aux risques que nous font courir, et continueront de nous faire courir, les maladies à vecteurs dans cet environnement que nous modifions en permanence, il est indispensable de surveiller, beaucoup mieux que nous ne l'avons fait jusqu'à présent, les populations des uns et des autres et les évolutions de leurs relations. Les microbes, leurs vecteurs, leurs réservoirs constituent, pour nous, autant d'associations de malfaiteurs que nous devons nous efforcer d'arrêter avant qu'ils ne commettent leurs mauvais coups. Pour ce faire, nous ne manquons pas d'armes que nous perfectionnons chaque jour un peu plus : la biologie molé-

culaire permet des diagnostics précis et rapides, encore loin d'être parfaits les modèles mathématiques s'affinent, les techniques de télédétection progressent rapidement, etc. Mais tout ceci ne doit pas, du moins pas encore, nous faire perdre de vue l'absolue nécessité des études sur le terrain, ne serait-ce que pour valider ces outils.

Il est clair également que ces questions dépassent de loin les seules compétences des médecins et qu'il est indispensable, même si cette tendance s'amorce de plus en plus clairement, de faire tomber les barrières traditionnelles encore bien trop fortes qui persistent entre les disciplines, pour laisser place à une véritable coopération entre les spécialistes oeuvrant dans des domaines aussi différents que la microbiologie, l'entomologie, la systématique, la climatologie, l'écologie, ... mais aussi les techniques d'agriculture et d'élevage, l'urbanisme, les sciences de la communication, l'économie politique et le développement, etc. Ce n'est donc pas le moment d'abandonner des disciplines qui, comme l'entomologie (15), la systématique ou l'écologie, se trouvent aujourd'hui fort négligées, mais bien plutôt de les promouvoir, notamment en améliorant la formation de bons spécialistes dans ces domaines qui apparaissent déterminants pour notre avenir ■

RÉFÉRENCES

- 1 - Forterre P. Quand les évolutionnistes découvrent l'importance des virus. *Virologie* 2007 ; 11 : 5-12.
- 2 - Combes C. Les associations du vivant. L'art d'être parasite. Flammarion, Paris, 2001 ; 348 p.
- 3 - Windsor DA. Most of the species on Earth are parasites. *Int J Parasitol* 1998 ; 28 : 1939-41.
- 4 - Poinar G, Telford SR. *Paleohaemoproteus burmascis* gen. n., sp. n. (*Haemospororida: Plasmodiidae*) from an early Cretaceous biting midge (*Diptera: Ceratopogonidae*). *Parasitology* 2005 ; 131 : 79-84.
- 5 - Rodhain F. Les relations arbovirus-vecteurs. *Bull Soc Pathol Exot* 1985 ; 78 : 763-68.
- 6 - Rodhain F. Les maladies à vecteurs. collect. « Que sais-je ? » PUF ed. 1999 ; 1 : 127 p.
- 7 - Rodhain F. Virus et insectes : relations multiples et variées. *Virologie* 2007 ; 11 : 91-5.
- 8 - Randolph SE. Ticks are not insects : Consequences of contrasting vector biology for transmission potential. *Parasitol Today* 1998 ; 14 : 186-92.
- 9 - Rodhain F. Epidémiologie évolutive d'une maladie à vecteurs : l'encéphalite japonaise. *Arts et Biologie* 2003 ; 16 : 3-10.
- 10 - Rodhain F, Saluzzo JF. Le mystère des épidémies Grippe, rage, méningite, sras. Editions Pasteur, Paris, 2005, 430 p.
- 11 - Knudsen AB, Slooff R. Problèmes dus aux maladies à transmission vectorielle et urbanisation accélérée : nouvelles approches de la lutte antivectorielle. *Bull World Health Org* 1992 ; 70 : 165-71.
- 12 - Tatem AJ, Rogers DJ, Hay SI. Global transport networks and infectious disease spread. *Adv Parasitol* 2006 ; 62 : 293-343.
- 13 - Amat-Roze JM. Variations climatiques et maladies transmissibles. *Med Trop* 1998 ; 58 : 42-7.
- 14 - Rogers DJ, Randolph SE. Climate change and vector-borne diseases. *Adv Parasitol* 2006 ; 62 : 345-81.
- 15 - Cuisance D, Antoine Rioux J. Current status of medical and veterinary entomology in France: endangered discipline or promising science? *Comp Immunol Microbiol Infect Dis* 2004 ; 27 : 377-92.