

lution des conditions naturelles, mais plutôt à l'oubli ou à la non prise en compte des données du milieu physique lors des aménagements. Tout au long de son histoire, la géographie de la France s'est largement construite à proximité des cours d'eau, nécessaires pour la défense, pour l'approvisionnement en eau, pour les transports des hommes et des marchandises. L'eau a aussi été utilisée comme source d'énergie pour diverses activités artisanales et industrielles. Les vallées elles-mêmes offrent des terres fertiles qui ont très tôt fixé les cultures et les pâturages. Dans le passé toutefois, les villes ont surtout été établies sur des hauteurs échappant aux inondations et la question des risques ne se posait guère. La croissance urbaine du XX^e siècle qui s'est partiellement au moins effectuée dans les lits d'inondation explique l'attention actuelle accordée aux risques et aux catastrophes.

Faut-il donc exclure tout aménagement des secteurs inondables? Pas de façon systématique, à condition de bien connaître le risque, par le retour aux événements passés, par l'étude détaillée des lits des rivières et de leurs différents tracés. La prise de conscience de l'existence et de l'ampleur des risques par les autorités locales et par les populations permet alors l'adaptation des aménagements, pour une protection qui évite tout discours excessivement catastrophiste.

Yvette VEYRET est professeur de géographie à l'Université Denis Diderot à Paris. Gérard GARRY est chargé des risques naturels au Ministère de l'équipement, des transports et du logement.

Gérard GARRY, *Le risque d'inondation en France. Recherche d'une approche globale du risque d'inondation et de sa traduction cartographique dans une perspective de prévention*, Thèse de doctorat de l'Université Paris I, 1993.

Yvette VEYRET et Pierre PECH, *L'homme et l'environnement*, PUF, 1993.

Gérard GARRY, *Évolution et rôle de la cartographie dans la gestion des zones inondables en France*, Mappemonde, vol. 4, p. 1016, 1994.

Les Français dans leur environnement, sous la direction de René Neboit-Guilhot et Lucette Davy, Comité national français de géographie, éditions Nathan, Paris, 1996.

Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), Guide général, La documentation française, Paris, 1997.



La science, nous dit-on, est «objective» et «neutre». Un fossé pratiquement infranchissable séparerait la rationalité scientifique du domaine maudit de «l'irrationnel».

Le puritanisme rationaliste, pourtant, risque fort de dissimuler la profondeur et la multiplicité des relations qui unissent le monde de la science à celui de la religion, pis encore à celui de la magie. Maints exemples, dont le plus fameux est sans doute fourni par Newton, sont là pour le confirmer : la science expérimentale a une dette envers les sciences dites «occultes».

Pierre Thuillier est philosophe et historien des sciences. Il enseigne à l'université Paris VII.

code 2110 – 160 pages

Prix : 132 F

Voir bon de commande p. 98

Les armes secrètes des guêpes parasitoïdes

NANCY BECKAGE

Les guêpes parasitoïdes se développent à l'intérieur de chenilles vivantes. Pour survivre dans cet environnement hostile, elles introduisent dans les chenilles parasitées des virus qui en inhibent le système immunitaire.

La chenille ci-contre ne deviendra jamais un papillon. Elle est tapie au cœur d'un plant de tomates, bien cachée des prédateurs, mais un ennemi l'a dénichée : à la recherche d'une pouponnière, une guêpe parasitoïde a repéré sa victime, guidée par l'odeur du lépidoptère et de son repas. La guêpe perce la cuticule protectrice de la chenille et y injecte quelques œufs : les larves se développeront en mangeant la chenille de l'intérieur. Puis elles sortiront des flancs de la chenille et tisseront leur cocon à sa surface. Leur métamorphose terminée, les guêpes adultes s'envolent, abandonnant la chenille.

Si la bataille interspécifique se jouait à un contre un, la chenille aurait ses chances : son système immunitaire détruirait les œufs de guêpes avant qu'ils ne créent des dommages irréversibles. Toutefois, la guêpe injecte, en même temps que ses œufs, d'innombrables particules virales qui annihilent le système immunitaire de la chenille. Doublement parasitée, cette dernière cesse progressivement de se nourrir, ne se métamorphose pas et meurt prématurément.

Les relations qui s'établissent entre la guêpe, le virus et la chenille condamnée sont parmi les plus complexes de la nature. La guêpe est un endoparasite : elle se développe à l'intérieur de l'organisme qu'elle parasite. Quand la chenille meurt avant que les larves de guêpe aient reçu suffisamment de nour-

riture, celles-ci meurent également. La chenille ne doit donc pas mourir prématurément, elle ne doit pas non plus gagner la partie grâce à ses défenses immunitaires ; c'est à son complice viral que la guêpe doit l'équilibre précaire qui permet le développement de ses œufs. Comme cette guêpe, de nombreux parasites d'insectes se sont associés à des bactéries et à des virus qui les aident à perpétrer leurs forfaits.

Armes biologiques

Une telle association existe également entre certains vers parasites d'insectes dont le tube digestif abrite une bactérie virulente qui colonise leur tube digestif. Ces vers régurgitent les bactéries dans les organismes qu'ils parasitent et qui meurent quelques jours après l'infection. Les bactéries, qui prolifèrent rapidement, sont une source de nourriture pour les vers en croissance ; de surcroît, elles sécrètent des enzymes digestives qui transforment le cadavre de l'hôte en une soupe que les vers peuvent consommer. En contrepartie, les bactéries profitent des vers pour se déplacer et envahir d'autres hôtes. Les partenaires sont dits indépendants, parce qu'ils n'ont aucun gène commun.

En revanche, l'interaction entre les guêpes parasitoïdes et les virus qu'elles hébergent est plus étroite : le sort de la guêpe est étroitement lié à celui du virus, et leurs matériels géné-

tiques se mêlent en permanence ; ils ont même des gènes qui se ressemblent. D'où la question : la guêpe et son virus forment-ils une même entité ou deux entités distinctes ?

La découverte de cette étrange association date de 1965, quand George Salt, de l'Université de Cambridge, soupçonna que les guêpes parasitoïdes du genre *Venturia* avaient, dans leur arsenal, une arme inhabituelle : au cours de l'oviposition (l'injection des œufs), les femelles transmettraient également des substances qui assureraient le bon développement de leur progéniture. G. Salt observa notamment que les ovaires des guêpes contiennent des substances qui empêchent les cellules immunitaires de la chenille de détruire les œufs de guêpe.

1. LES GUÊPES ET LES CHENILLES sont les David et Goliath du monde des insectes. La guêpe pond ses œufs dans la chenille, qui doit rester vivante tant que les parasites ne sont pas parvenus à maturité. Toutefois, le système immunitaire de la chenille menace les œufs. Pour l'inhiber, les guêpes utilisent une arme mortelle : un virus.



Normalement, les œufs injectés flottent dans un liquide semblable à du sang, l'hémolymph, qui emplit la cavité interne de la chenille. Lorsque G. Salt lava les œufs de guêpe avant de les injecter, ils furent rapidement attaqués et détruits par les cellules immunitaires de la chenille parasitée : le lavage avait éliminé un facteur protecteur inconnu. En 1973, des photographies prises au microscope électronique ont montré qu'au cours de l'oviposition, lors de leur passage à travers l'oviducte, les œufs de *Venturia* s'imprègnent de particules qui ressemblent à des virus.

Près d'une dizaine d'années plus tard, une vaste étude taxonomique des guêpes parasitoïdes montra que certaines espèces de guêpes qui se développent sous la forme de parasites internes de lépidoptères contiennent toujours des particules virales. Ces virus se répliquent seulement dans le tissu ovarien des guêpes femelles. Au cours de l'oviposition, la guêpe en injecte des milliers dans la chenille, en même temps qu'un ou plusieurs œufs.

Ces virus étaient-ils les substances d'origine ovarienne que la guêpe injecte en même temps que ses œufs et qui bloquent les réactions immu-

nitaires de l'animal parasité? L'hypothèse fut confirmée, en 1981, par des expériences où l'on injectait des œufs lavés, ainsi que des virus isolés. Restait une question : comment ces virus, aujourd'hui nommés virus à ADN multiple, désactivent-ils le système immunitaire des chenilles parasitées?

Déficit immunitaire

Pour le savoir, nous avons étudié la guêpe parasitoïde *Cotesia congregata*, qui dépose des centaines d'œufs par chenille. Ces œufs deviennent des larves qui se nourrissent de l'hémolymph de la chenille, et non de ses tissus, permettant ainsi à la chenille infectée de survivre longtemps après l'éclosion des œufs de la guêpe. Nous avons mis en présence ces guêpes et les chenilles du tabac *Manduca sexta* : quiconque cultive des tomates a probablement dû lutter contre ces grosses chenilles vertes qui ravagent les tomates, le tabac et le *Datura stramonium* (le *Datura* est une mauvaise herbe de la même famille que le tabac, qui pousse souvent à proximité des plantations de tabac). Ces chenilles sont pratiques pour les études en laboratoire, parce qu'elles sont à peu près de la taille d'un auriculaire : on pré-

lève leur sang aussi aisément que sur une souris.

Nous avons d'abord observé la transformation rapide des hémocytes de la chenille (des cellules qui circulent dans son sang), quelques heures après une oviposition de la guêpe *Cotesia* : les hémocytes s'arrondissent et n'adhèrent plus aux œufs de parasites ni au verre ; ils se boursoufflent et perdent des lambeaux de membrane, ainsi que du matériau intracellulaire. Puis, les hémocytes endommagés s'agglutinent et sont éliminés de la circulation sanguine. Ces modifications ressemblent beaucoup à celles qui accompagnent le suicide cellulaire, ou apoptose, des cellules de mammifères.

Les granulocytes et les plasmocytes sont les hémocytes de chenille les plus perturbés par le parasitisme. Les granulocytes, notamment, meurent par apoptose. Or, ce sont précisément les cellules immunitaires qui réagissent aux intrus, tels les œufs de *Cotesia*. Lors d'une réaction immunitaire normale, les granulocytes libèrent d'abord des granules qui recouvrent l'œuf ; puis les plasmocytes adhèrent à la surface des œufs, s'empilant en une capsule épaisse qui finit par tuer l'œuf. Le retrait sélectif des granulocytes et des plasmocytes de la circulation sanguine supprime les premières défenses de la chenille. Chez l'homme, un phénomène de même nature se produit lors d'une infection par le virus de l'immuno-déficience humaine (VIH) : les virus infectent les lymphocytes, qui s'agglutinent et meurent par apoptose. Divers agents infectieux opportunistes envahissent alors les malades, créant des ravages, tout comme la progéniture de la guêpe qui se développe au détriment de la chenille.

Lorsque nous injectons des virus à ADN multiple dans des chenilles saines, leurs hémocytes se modifient, comme lors du parasitisme. Quand le virus est inactivé chimiquement avant son injection, les hémocytes ne sont pas lésés : seuls des virus produisant des particules virales inhibent les réactions immunitaires.

Les protéines virales sont rapidement produites dans la chenille hôte : les gènes viraux sont activés dans la demi-heure qui suit l'oviposition. Au cours de cette demi-heure, les particules virales envahissent tout l'organisme parasité et pénètrent dans

Des insectes contre les mauvaises herbes

Les guêpes et les virus ne sont pas les seuls organismes utilisant des tactiques violentes : les hommes sont passés maîtres en la matière. Récemment, des biologistes ont transformé des chenilles et leurs parasites en armes fatales contre des mauvaises herbes, notamment contre le *Pueraria lobata*, ou kudzu, une plante grimpante à croissance rapide, qui couvre près de trois millions d'hectares, au Sud des États-Unis. Le kudzu est une plante originaire du Japon, qui a été introduite aux États-Unis comme plante ornementale, mais qui est envahissante. Elle n'existe pas en Europe.

David Orr et ses collègues de l'Université de Caroline du Nord ont utilisé des chenilles du soja contre le kudzu. Dans des champs expérimentaux, les chenilles mangent les feuilles de la mauvaise herbe, et D. Orr pense que les efforts fournis par la plante pour remplacer ses feuilles finiront par épuiser l'énorme réseau de racines (les racines d'une seule plante

pèsent parfois jusqu'à 150 kilogrammes). Comme les chenilles du soja se nourrissent de cultures aussi bien que de kudzu, elles sont toutes équipées d'un système de sécurité qui les empêche de s'échapper : des guêpes parasitoïdes qui exécutent la chenille tandis qu'elle tisse son cocon (on n'a ainsi aucun risque qu'un papillon naisse et aille se reproduire sur les cultures). De surcroît, les chenilles parasitées dévorent davantage de kudzu : les guêpes augmentent la durée de la période d'alimentation des chenilles et leur appétit !

Comment les œufs de la guêpe *Copidosoma truncatellum* résistent-ils au système immunitaire de la chenille ? On l'ignore, car cette guêpe n'a pas de virus à ADN multiple. Différentes guêpes portant des virus à ADN multiple ont également été utilisées dans des stratégies de lutte biologique, souvent contre des populations d'insectes nuisibles, tels des drosophiles, des papillons et des pucerons.