

aussi bien chez les grenouilles que chez les salamandres, divers types de difformités morphologiques.

Jusqu'à la fin des années 1990, on ignorait si les rayonnements ultraviolets avaient vraiment un effet sur le développement des pattes des amphibiens. Puis, Gary Ankley et ses collègues, de l'Agence pour la protection de l'environnement du Minnesota, ont mené une étude expérimentale pour apporter une réponse à cette question. Ils ont montré que, lorsque les grenouilles se développent à l'abri de tout rayonnement ultraviolet, leurs membres se développent normalement. Au contraire, quand les têtards sont exposés aux niveaux ambiants de rayonnements ultraviolets, les pattes sont incomplètes et des doigts manquent au terme de leur développement. Certaines difformités ressemblent à celles observées sur les grenouilles en milieu naturel.

Cependant, les rayonnements ultraviolets n'expliquent pas toutes les difformités observées en milieu naturel, notamment la croissance de pattes surnuméraires, l'une des anomalies les plus couramment observées depuis 1995. De nombreuses expériences en laboratoire et sur le terrain ont abouti à la même conclusion. D'autres biologistes ont aussi fait remarquer que, dans leur milieu naturel, beaucoup d'amphibiens se protègent d'une exposition continue aux rayonnements : qu'ils soient jeunes ou adultes, les amphibiens ne restent pas sans arrêt au Soleil. Ils vivent souvent dans des eaux boueuses et sortent parfois seulement la nuit.

Le rôle de la pollution

Pendant que certains biologistes étudiaient le déclenchement des difformités par les rayonnements ultraviolets, d'autres examinaient le rôle de la pollution de l'eau, notamment l'effet des pesticides. Ils se sont intéressés à la pollution, car parmi les premiers cas de difformités signalés, un grand nombre vivaient dans des régions où les insecticides et les engrais étaient utilisés en grande quantité. Au milieu des années 1990, de nombreux travaux de laboratoire avaient confirmé que des myriades de substances polluantes tuent les amphibiens, sans pour autant préciser s'ils pouvaient entraîner la formation de pattes surnuméraires ou incomplètes.

Les toxicologues étaient confrontés à une difficulté notable : comment isoler, parmi toutes les substances contenues dans l'eau analysée, un produit chimique unique ou, du moins, un groupe de produits potentiellement responsable des difformités morphologiques des grenouilles ? Des centaines de produits polluants sont déversés chaque année par millions de tonnes dans les régions où des amphibiens difformes ont été observés. Pourtant, un de ces produits a été immédiatement incriminé : le méthoprène. Ce pesticide, mis sur le marché en 1975, est supposé être moins dangereux que le DDT.

Le méthoprène fut d'abord suspecté parce que sa structure chimique ressemble à celle des rétinoïdes, qui jouent un rôle important dans le développement des vertébrés. C'est notamment le cas de l'acide rétinique. Leur pénurie ou leur excès entraînent parfois des difformités chez l'embryon. De nombreuses fausses couches et des anomalies morphologiques ont été attribuées à l'utilisation, par des femmes enceintes, de médicaments contre l'acné, contenant une substance dérivée de l'acide rétinique.

Quelques biologistes pensèrent que le méthoprène avait peut-être un effet similaire sur les grenouilles. Dans une série d'expériences faites à la fin des années 1990, les bio-

logistes de l'Agence pour la protection de l'environnement du Minnesota montrèrent que de grandes quantités d'acide rétinique perturbent la formation des pattes arrière chez les grenouilles, mais que ce n'est pas le cas du méthoprène. D'autres études de terrain montrèrent également que ce pesticide ne pouvait pas être l'unique responsable. Le méthoprène se dégrade rapidement dans l'environnement, et les biologistes n'ont pas réussi à prouver sa persistance dans les zones où les difformités sont nombreuses. On aboutit aux mêmes conclusions pour les 61 autres produits chimiques utilisés en agriculture – et pour leurs produits de dégradation – dont les concentrations ont été mesurées dans diverses régions de l'Ouest américain, où les animaux sont atteints de nombreuses malformations. Pour autant, les pesticides ne sont pas considérés comme inoffensifs. Des centaines de produits n'ont pas été testés, et certains pesticides sont toujours soupçonnés de causer des anomalies morphologiques, autres que la formation de pattes surnuméraires.

Aujourd'hui, on admet que la pollution de l'eau et l'exposition aux rayonnements ultraviolets causent des difformités, mais une menace plus grande encore semble planer sur les batraciens.

Des parasites prolifiques

Cette menace, qui semble être la cause des fréquentes anomalies morphologiques constatées, s'est manifestée au milieu des années 1980. Stephen Ruth, à l'époque à l'Université de Monterey, explorait des étangs dans le Nord de la Californie lorsqu'il découvrit des centaines de grenouilles arboricoles du Pacifique et de salamandres à longs doigts auxquelles il manquait des pattes, ou qui, au contraire, avaient des pattes surnuméraires ou qui présentaient des anomalies morphologiques. Il ne tira cependant pas de signal d'alarme, car il était persuadé que le phénomène était isolé.

En 1986, S. Ruth demanda à Stanley Sessions, à l'Université Hartwick, dans l'État de New York, d'examiner ces étranges amphibiens. Ce dernier constata que les animaux étaient tous infectés par un parasite trématode, communément nommé douve. Les trématodes de Californie, dont on ignorait encore l'identité précise, ne semblaient pas être mortels pour leurs hôtes. S. Sessions soupçonna que, chez les têtards, ces parasites perturbaient le développement partout où ils formaient des kystes, le plus souvent près des pattes postérieures. Pour vérifier cette hypothèse, il implanta de petites billes de verre dans des embryons de grenouilles et de salamandres en développement. Ces deux espèces présentent l'intérêt de se reproduire facilement en captivité ; ce sont, en quelque sorte, les « souris blanches » de la biologie des amphibiens. On a observé des pattes surnuméraires apparaître, ainsi que d'autres difformités, exactement comme si elles avaient été parasitées.

Toutefois, ces résultats expérimentaux ne prouvaient pas que les trématodes étaient responsables des difformités observées, d'autant que les espèces de grenouilles et de salamandres étudiées ne présentent généralement pas d'anomalies morphologiques dans leur milieu naturel. Il fallut attendre encore quelques années pour que cette corrélation soit établie. Entre 1996 et 1998, l'un d'entre nous, (Pieter Johnson) inspecta, avec ses collègues, les milieux humides de Californie de façon systématique et il constata que les étangs où les grenouilles arboricoles présentaient des anomalies des pattes contenaient beaucoup de *Planorbella tenuis*,

un escargot aquatique qui fait partie des hôtes colonisés par le trématode identifié par S. Sessions et aujourd'hui connu sous le nom de *Ribeiroia ondatrae*.

Kystes perturbateurs

Pensant qu'ils avaient peut-être découvert une relation directe entre les difformités observées chez les amphibiens dans leur milieu naturel et une épidémie liée à un parasite, P. Johnson et son équipe prélevèrent dans les étangs étudiés des grenouilles difformes et les disséquèrent. À chaque fois, ils trouvèrent une importante concentration de kystes formés par le parasite, juste sous la peau, à la base de chaque patte postérieure. Pour tester l'hypothèse selon laquelle les trématodes seraient responsables de l'apparition de pattes surnuméraires, des têtards de grenouilles arboricoles du Pacifique ont été exposés, en laboratoire, au parasite *Ribeiroia ondatrae*. Comme prévu, des difformités identiques à celles observées en milieu naturel apparurent sur les grenouilles infectées. En outre, plus la concentration en parasites était élevée, plus les malformations étaient importantes, alors que les grenouilles non infectées se développaient normalement.

Cette étude représenta une étape décisive de cette recherche. Des expériences ultérieures, dont celle que nous avons menée en 2001 sur des crapauds de l'Ouest, ont prouvé le rôle essentiel joué par *Ribeiroia ondatrae* dans l'apparition de difformités chez des amphibiens autres que les grenouilles arboricoles du Pacifique. Deux études, effectuées en 2002 par Joseph Kiesecker, de l'Université de Pennsylvanie, et par S. Sessions, Geoffrey Stopper et leurs collègues, de l'Université Yale, ont montré que *Ribeiroia ondatrae* peut entraîner des difformités au niveau des pattes, dans diverses espèces.

D'autres études ont confirmé que l'on trouve des amphibiens difformes à peu près partout où le parasite *Ribeiroia ondatrae* est présent, tandis que ce n'est pas systématique en présence de polluants chimiques. De plus, au cours des dernières années, l'infection due à ce parasite semble s'être développée à un rythme croissant, atteignant quasiment le stade d'une épidémie. En 2001, une étude bibliographique exhaustive avait montré qu'avant 1990, seules sept populations d'amphibiens infectées par *Ribeiroia ondatrae* et présentant des malformations avaient été observées. En revanche, d'après les résultats de l'étude de terrain que nous avons publiés en 2002, nous avons identifié 25 zones d'habitats d'amphibiens concernées, uniquement dans l'Ouest des États-Unis. Sur ces sites, six espèces présentaient des difformités, et la proportion des animaux atteints dans chaque population variait de 5 à 90 pour cent. Au cours des deux dernières années, des difformités dues à *Ribeiroia ondatrae* ont été observées dans de nombreuses régions.

Aujourd'hui, les biologistes comprennent comment le cycle de vie de *Ribeiroia ondatrae* entretient le développement de difformités, génération après génération, chez les amphibiens qui vivent dans la même zone que des escargots infectés par le parasite (voir la figure 1). Lorsque le parasite quitte l'escargot qui l'hébergeait et s'installe dans un têtard, il se fixe généralement près de l'ébauche d'une patte postérieure. Il prolifère et forme un kyste qui représente un obstacle au développement correct des pattes. Que la grenouille ait des pattes surnuméraires ou qu'au contraire, il lui en manque, elle ne se déplace pas correctement et devient une proie facile pour l'hôte final du parasite, en général

un héron ou une aigrette. Le parasite se développe et se reproduit dans l'oiseau dont les déjections libèrent des œufs de trématodes dans l'eau. Lorsque les larves éclosent, elles colonisent un escargot, et le cycle recommence.

Si l'extension d'une épidémie provoquée par *Ribeiroia ondatrae* est en partie, ou même essentiellement, responsable de l'augmentation du nombre de difformités observées récemment chez les grenouilles, quelle est la cause de cette épidémie ? Vraisemblablement la perturbation, par l'homme, des zones d'habitat des grenouilles. Dans les populations humaines, comme chez les animaux sauvages, les maladies infectieuses émergent ou se répandent lorsque les caractéristiques de l'environnement se modifient favorisant la prolifération des organismes responsables de ces maladies. Le reboisement du Nord-Est des États-Unis, par exemple, a entraîné l'apparition de la maladie de Lyme, car il a favorisé la prolifération d'un cerf dont les tiques hébergent la bactérie de Lyme. La domestication des fleuves africains a contribué à une diffusion des douves présentes



2. LES DIFFORMITÉS des grenouilles ont des causes diverses. Les parasites trématodes peuvent provoquer la croissance de pattes postérieures surnuméraires (en haut). Ils peuvent aussi être responsables de pattes postérieures mal formées, voire d'une absence de pattes ; l'exposition excessive aux rayonnements ultraviolets, la pollution chimique ou les blessures infligées par des prédateurs peuvent également être incriminées. Les rayonnements ultraviolets sont souvent responsables d'anomalies des yeux (en bas) et de la peau.