

Penser coopération plutôt que compétition... (Yves Sciama pour Sciences et Vie - avril 2013)

Article scanné depuis le magazine papier et remis en forme par S.Salanove

Désormais couvert d'honneurs, membre des Académies des sciences américaine et néerlandaise, celui qui est devenu le pape de la primatologie mondiale et plus largement de tout le passionnant champ de l'éthologie, Frans de Waal se souvient du grand virage. " Il y a 30 ans, au début de ma carrière, l'agression, le conflit et la guerre étaient les seuls domaines de recherche possibles, pour un primatologue. Ensuite, on a commencé à s'intéresser à l'altruisme, mais d'une façon très étroite, dominée par les références aux insectes sociaux. Finalement, aujourd'hui, tout ce qui sort d'intéressant et d'excitant, **ce dont tout le monde parle, concerne l'empathie, le sens de l'équité, la coopération.** . . et l'agression est devenue un sujet mineur. "Un cas particulier, ce retournement décrit par de Waal? Spécifique à un domaine relativement restreint? Loin s'en faut! Car ce sont non seulement toutes les grandes catégories d'espèces, des animaux aux microbes en passant par les plantes, qui sont l'objet de ce même changement de perspective, **mais aussi toutes les disciplines des sciences du vivant, de la génétique à la microbiologie en passant par l'écologie.** Chacune à son rythme, et avec ses spécificités, est en train de rompre avec une interprétation individualiste et belliqueuse de la théorie de Charles Darwin, inspirée de sa célèbre phrase: " Partout, la nature entière est en guerre, chaque organisme avec un autre, ou avec la nature extérieure "

(Suite de l'article commencé sur le site du CEA) ↓

UNE BIOLOGIE SANS ŒILLERES

Le lion qui mange la gazelle, la bactérie qui infecte un organisme, la plante qui se bat pour une place au soleil... Depuis Darwin, et durant tout le XXème siècle, les spécialistes de la théorie de l'évolution ont dessiné le monde vivant comme une jungle dont la lutte pour la survie est la seule loi. Une vision qui s'est même exacerbée avec le succès des idées de Richard Dawkins, auteur en 1976 d'un ouvrage, le *Gène égoïste*, dans lequel il décrit les organismes comme "des robots programmés à l'aveugle pour préserver les molécules égoïstes connues sous le nom de « gènes », lesquels sont devenus la principale unité de sélection dans l'évolution. **Cohérente et convaincante, cette vision du vivant centrée sur la notion de lutte est devenue une sorte de dogme incontestable, qui a envahi aussi bien le café du commerce que les cénacles académiques, en passant par nombre de discours politiques. Le seul problème... c'est qu'elle est fausse.**

Car non, il n'y a pas que la lutte dans la vie ! En ce début du XXIème siècle, une nouvelle biologie, rééquilibrée, est en train de fissurer cette façon exclusive de considérer l'évolution du vivant, en accordant au concept de coopération une importance au moins égale à celle du concept de compétition.

Une biologie pour qui la nécessité de survivre - que personne ne conteste - ne se réduit plus à celle de combattre et d'éliminer ses rivaux, mais aussi à celle de coopérer et de trouver des alliés. Là où tout n'était que guerre et concurrence - et sans nier cette dernière -, cette nouvelle biologie élargit le regard, lui ôte ses

œillères, pour s'intéresser enfin à toute la gamme des interactions et considérer l'entraide, et pas seulement l'égoïsme, considérer les alliances autant que les conflits, les réseaux par-delà les individus. Allant de surprise en surprise, voici qu'elle dévoile une autre histoire de la vie.

Une histoire beaucoup plus apaisée que celle racontée jusqu'ici, où l'on voit des espèces de tout ordre tisser les unes avec les autres d'incroyables réseaux d'alliances secrètes et insoupçonnées, que l'on serait presque tenté de qualifier de "contre-nature" si l'on ne voulait pas, justement, emprunter des expressions forgées à partir de l'ancien paradigme.

Car telle est cette première grande leçon pour le XXIème siècle: face au grand spectacle de la nature, il nous faut maintenant nous habituer à ne plus y voir seulement la violence de la compétition féroce entre individus, mais aussi les équilibres beaucoup plus subtils d'une vaste coopération, à tous les niveaux des écosystèmes.

UNE AUTRE LOI DE LA JUNGLE

Des exemples ? Grâce à Frans de Waas, on sait donc à présent qu'il existe chez les singes un système extraordinairement complexe de relations et d'émotions, impliquant l'empathie, un sens de l'équité, des prémices de la morale, un sens de la politique...

Des découvertes qui ont inspiré une avalanche d'études éthologiques - le sens de l'équité chez les corneilles a par exemple été mis en évidence il y a quelques mois ! Et ces coopérations au sein d'une même espèce ne sont pas propres aux vertébrés doués d'un gros cerveau. Ne parlons pas des insectes sociaux, déjà observés par Darwin, mais depuis toujours considérés comme un cas particulier impossible à généraliser. Regardez donc les bactéries: depuis dix ans, on n'en finit plus de mettre au jour de surprenants phénomènes coopératifs. Au premier rang desquels leur capacité individuelle à percevoir la taille de la population à laquelle elles appartiennent. Ce qui leur permet des dizaines de comportements coordonnés, allant de la reproduction jusqu'à l'émission de signaux ou de molécules de défense. Autre surprise, l'entraide entre végétaux. La Canadienne Suzanne Simard a ainsi découvert d'importants transferts de nutriments depuis de vieux arbres vers leur progéniture poussant à leurs pieds, ce qui permet aux jeunes de se développer normalement en dépit de l'ombrage au-dessus de leur tête. Autant de comportements qui ont été sélectionnés par l'évolution comme les caractères les plus à même d'assurer la survie de ces espèces.

Ce ne sont pourtant pas ces comportements sociaux entre individus d'une même espèce qui ont le plus stupéfié les évolutionnistes, mais l'exploration des relations entre espèces différentes. Et la plupart tournent autour d'une notion appelée sans

aucun doute à bouleverser la biologie du XXI^{ème} siècle: **la symbiose**. A l'opposé de la lutte, cette relation d'étroite proximité entre des organismes partenaires d'espèces différentes se fait au bénéfice de chacun - une relation gagnant-gagnant donc, et non gagnant-perdant. Un exemple classique en est l'omniprésent lichen, alliance entre un champignon et une algue hébergée dans ses tissus, qui produit des sucres pour le champignon en échange de sa protection contre le dessèchement.

Découverte en 1877, du vivant de Darwin, la symbiose n'est certes pas une nouveauté. Cependant, elle est longtemps passée pour un phénomène marginal, une sympathique curiosité faite de crevettes nettoyant les dents des murènes, on d'arbres hébergeant des fourmis, autant de phénomènes intéressants mais sans signification biologique particulière. Les choses ont un peu changé lorsque la biologiste américaine Lynn Margulis a révélé, dans les années 1970, que la symbiose se retrouve au cœur même des cellules qui nous composent: tous les animaux hébergent dans leurs propres cellules de petits organites énergétiques, les mitochondries, qui étaient à l'origine des bactéries symbiotiques. Les petits organites qui permettent aux plantes de faire leur photosynthèse ont une origine analogue. **Mais la chercheuse fut confrontée à quinze refus avant de pouvoir publier cette découverte, enseignée depuis dès la première année en faculté de biologie.** Mais c'est avec la découverte des sources hydrothermales sous-marines, dans les années 1980, que la prise de conscience a véritablement commencé. Ces milieux hostiles, situés au niveau du plancher océanique par plusieurs centaines, voire milliers de mètres de profondeur, où règnent ténèbres, pressions écrasantes, températures et acidité extrêmes, se sont en effet avérés être de véritables mines de métabolismes inconnus et bizarres... et d'associations multiples ! Dans ces sources obscures, la seule énergie disponible est chimique; elle se cache dans un certain nombre de composés (soufrés, notamment). Or, seules quelques espèces de bactéries sont capables de l'extraire. Qu'à cela ne tienne: une cohorte d'organismes, mollusques, crabes, vers... ont incorporé ces bactéries dans leurs tissus, allant jusqu'à créer parfois des organes pour les accueillir. La palme de l'excellence symbiotique revient sans conteste à l'immense ver *Riftia*, qui peut faire jusqu'à 2 m de longueur.

UNE SYMBIOSE ESSENTIELLE À LA VIE

Omniprésent dans ce milieu, *Riftia* a stupéfié les chercheurs qui l'ont découvert par son absence de tube digestif et de bouche. Il a fallu des années pour comprendre qu'il s'en passait grâce à son trophosome, une sorte de "sac à bactéries" qui occupe 15 % de la masse de son corps et qui héberge les symbioses qui le font vivre. " *Un tissu spongieux très irrigué, si optimisé au niveau du métabolisme que l'on y trouve 10 milliards de bactéries par gramme de tissu, 100 fois Plus que dans les réacteurs industriels construits par l'homme !*", s'émerveille encore François Lallier, professeur à Paris-M et chercheur à la station biologique de Roscoff. Au final, *Riftia* illustre à

merveille ce nouveau paradigme de la biologie: plutôt que de manger les bactéries, il a "choisi" de les héberger et s'est assuré ainsi un succès biologique inespéré dans cet environnement infernal !

Cette découverte a permis de réaliser l'atout majeur des symbioses et autres coopérations en termes de survie: elles sont la réponse logique de la vie aux conditions difficiles. Regardez ainsi les lichens: ces organismes mi-algue mi-champignon font partie des pionniers, aussi bien dans les déserts que dans les environnements glacés ou en altitude. Selon Tim Lenton, professeur à l'université d'East Anglia (Angleterre), ils seraient même les premières formes de vie à avoir conquis les continents, bien avant les plantes.

L'alliance, meilleur atout pour survivre en pays hostile? Mieux que ça! Beaucoup de chercheurs pensent à présent que les sources hydrothermales pourraient avoir été de parfaits berceaux de la vie, éloignées des perturbations de la surface et disposant d'une abondante source d'énergie chimique. **La confirmation de cette hypothèse ferait donc de la symbiose un des actes originels de l'apparition de la vie:** tout serait parti d'une sorte d'alliance en enfer...

Dès lors, les œillères tombées, les chercheurs étaient prêts à voir l'omniprésence de la symbiose dans le monde du vivant. Ils ont par exemple réalisé que, dans les sous-bois, la loi de la jungle n'est pas celle que l'on croit... " *On sait à présent que dans une forêt, chaque arbre est en symbiose avec quelque 200 espèces de champignons, eux-mêmes connectés à un grand nombre d'arbres, raconte Marc-André Selosse, du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive de Montpellier. Tout cet ensemble échange des myriades de nutriments et de sucres parfois sur de longues distances. Nous avons découvert des végétaux de sous-bois dépourvus de chlorophylle, et alimentés en sucres par des champignons issus d'arbres situés plus loin! Il faut donc voir un tel écosystème comme un réseau, et non plus comme une juxtaposition d'individus.* "

A cette description, il convient d'ajouter les bactéries symbiotiques (au moins 100 espèces dans les tissus de chaque plante), ainsi que les mutualistes que sont les pollinisateurs, les oiseaux et mammifères qui dispersent les graines; sans oublier le recyclage de la matière par les invertébrés du sous-sol, etc. Une vertigineuse constellation d'interactions, donc. Au sein de laquelle il y a, bien sûr, des prédateurs et des proies, des parasites et de la compétition. Mais où l'on trouve, au plan biologique, beaucoup plus de négociations (éventuellement musclées) et d'échanges (pas toujours équitables) que de "guerres", pour reprendre le mot de Darwin. La forêt, de ce point de vue, ne constitue pas une exception écologique, mais la norme. Même le plancton, a-t-on appris l'an dernier, est le siège de symbioses étroites qui alimentent en azote les algues unicellulaires et jouent donc un rôle planétaire dans le cycle du carbone!

" *A partir de ces découvertes, on s'est aperçu peu à peu que la symbiose s'est généralisée comme stratégie de nutrition, note François Lallier. Dès qu'un animal*

est incapable de synthétiser un composé, et c'est fréquent, il incorpore un microbe qui sait le faire." Et le chercheur d'expliquer comment les insectes, généralement multicarencés, notamment en acides aminés, s'associent à une ou plusieurs bactéries qui fabriquent les composés manquants, moyennant gîte et protection.

Ce qui est particulièrement remarquable, c'est à quel point la symbiose n'est pas une simple cohabitation, mais une véritable interpénétration biologique des partenaires. Et notamment dans ce qu'ils ont de plus intime, les gènes. "*On voit des milliers de gènes des bactéries symbiotiques migrer vers le noyau de leurs hôtes*", indique François Lallier; et à mesure que l'on déchiffre les labyrinthes du métabolisme, il s'avère que les composés, lors des chaînes de transformations qu'ils subissent, entrent puis ressortent de la bactérie ou de l'hôte selon leurs besoins respectifs! **Loin du chacun pour soi que l'on croyait autrefois de mise, les acteurs de ces alliances se "parlent" chimiquement, coopèrent, s'ajustent, se régulent...**Bref, interagissent en continu avec une complexité dont seul un superficiel aperçu nous est encore accessible. Une autre révolution au sein d'une biologie pour qui, depuis Pasteur, la présence d'un microbe dans un animal ou une plante était à *priori* pathologique.

RÉSEAUX ET POUPÉES RUSSES

Pour couronner le tout, cela fait profondément écho à l'une des découvertes les plus spectaculaires de la décennie qui vient de s'écouler: **l'importance biologique du "microbiome" humain, cette colossale communauté microbienne installée dans notre tube digestif, qui compte dix fois plus de cellules que notre corps.** Aucun d'entre nous, sait-on à présent, ne pourrait survivre sans cette flore microbienne intestinale. Et il ne se passe plus une semaine sans que soit publié un nouvel article sur l'influence de cette flore sur le diabète, les allergies, le développement cérébral, le système immunitaire, etc. Témoignant là encore d'un extraordinaire dialogue entre nos hôtes et notre organisme. Ce microbiome a été en partie séquencé en 2010. Si le génome humain, avec seulement 25 000 gènes, avait déçu les chercheurs qui espéraient y trouver la clé de notre complexité, en revanche, les différents microbiomes humains analysés affichent près de 3,3 millions de gènes supplémentaires ! De quoi se demander si notre boîte à outils biochimiques n'est pas située, pour l'essentiel, chez nos alliés bactériens. **La réalité est que les êtres vivants se révèlent de véritables "poupées russes" de mutualismes emboîtés,** certains symbiotes unicellulaires intestinaux, par exemple, étant eux-mêmes en symbiose avec des bactéries. L'on pourrait se perdre encore longuement dans ce dédale de ramifications et d'interactions entre êtres vivants: même les virus, jusqu'ici considérés comme l'incarnation même de la maladie, se révèlent être dans leur majorité utiles à de nombreuses espèces, dont la nôtre.

Mais arrêtons-nous ici, puisque l'important est désormais clair: la vie ne se réduit pas à la lutte pour s'assurer la plus grande part de ressources limitées; toute son histoire montre qu'en s'associant judicieusement, les organismes parviennent à accroître considérablement les ressources. Et si la biologie du XXe siècle s'est focalisée sur la lutte entre les espèces, gageons que celle du XXIe siècle aura vocation à se passionner pour ces alliances. **Certes, coopération et concurrence sont souvent deux faces de la même réalité, deux stratégies complémentaires de survie.** Qui peuvent se changer l'une en l'autre, tant leur frontière est parfois ténue: pas facile de dire à partir de quand un parasite, qui donne un coup de main métabolique à son hôte pour favoriser sa propre survie, devient un coopérateur! Mais ce qui est certain, c'est que la notion d'individu égoïste et insulaire, muni uniquement de ses gènes propres et en guerre contre tous pour les faire triompher a vécu.

Pourquoi cette évolution a-t-elle été si lente à émerger? D'abord parce que ces coopérations sont beaucoup plus discrètes que les luttes frontales - il n'y a plus de cadavres dans les placards. Pour prendre la mesure de l'omniprésence des symbioses, il a fallu attendre les progrès récents et ultrarapides du séquençage, puis les possibilités d'analyse des cascades moléculaires, la puissance de calcul pour faire tourner les modèles. "Dans les années 1990, rappelle Thierry Doré, directeur de recherche à l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) et professeur à AgroParitech, la microbiologie était capable de connaître environ 1 % des microbes du sol, c'est-à-dire ceux qui consentaient à pousser sur un milieu de culture. Désormais, grâce à la biologie moléculaire, nous avons accès à la flore complète du sol. Et c'est la même chose avec les microbes du tube digestif. "Un autre facteur est **la montée en puissance de l'écologie scientifique, véritable science des systèmes, en contrepoint aux déceptions suscitées par l'ère du tout ADN', centrée sur l'individu**", estime Samuel Alizon, du CNRS, qui étudie la coopération entre microbes lors de l'infection. Le fait de penser "réseau" a également pesé. "Isoler un individu et tout expliquer à travers sa perspective individuelle est une façon étroite de voir les choses; **l'approche holistique, qui s'efforce de voir les ensembles, est désormais une tendance puissante de la biologie**", résume Frans de Waal.

Autre frein: alors qu'elle est beaucoup mieux acceptée dans les autres disciplines....disciplines, de la microbiologie à la botanique, la coopération a toujours posé un problème aux théoriciens de l'évolution, chez qui elle suscite débats et tensions depuis Darwin lui-même, Pourquoi? Simplement parce qu'ils ont longtemps peiné à l'expliquer! La théorie classique voudrait en effet, qu'à terme, les organismes coopérateurs soient éliminés par l'apparition de "tricheurs" qui empochent les "rétributions" sans rien céder en échange, et qui prolifèrent. L'entraide biologique, selon ce raisonnement, serait par nature éphémère. L'histoire des sciences l'a prouvé, les scientifiques ont une propension à ne pas voir (ou à qualifier d'insignifiants) ce que leurs théories n'arrivent pas à expliquer...

Or, ce mystère de la stabilité des symbioses, peu à peu, se dissipe. Plusieurs mécanismes théoriques ont été identifiés permettant d'expliquer "évolutivement" la

persistance du mutualisme. **Le plus intéressant est la capacité de certains organismes à sanctionner un partenaire qui refuse de coopérer.** Dans certaines symbioses, l'hôte peut littéralement affamer le symbiote si celui-ci ne remplit pas sa part de la coopération - et parfois la réciproque est aussi vraie. Ce qui offre enfin, une explication darwinienne à la stabilité du mutualisme: le symbiote a intérêt à ne pas tricher, sous peine de réduire ses chances de survie.

Reste que pour les théoriciens de l'évolution, il ne sera pas facile de s'accommoder de cette révolution d'un vivant à la fois en réseau et en poupées russes. Car les frontières de l'individu s'y brouillent, et des questions émergent: comment et sur qui au juste s'exerce la sélection naturelle... La survie du plus apte s'applique-t-elle à l'arbre isolé? A l'arbre et à ses champignons? A un peuplement d'arbres, avec ses champignons et ses insectes? Le débat s'anime depuis quelques années. *"La biologie s'est construite dans l'illusion que les organismes qu'elle étudie, plantes, animaux... étaient des individus, résume Russel Rodriguez, biologiste à l'université de Washington (Etats-Unis), et président de la Société internationale pour la symbiose. Mais, en réalité, il n'y a pas sur cette planète un seul être que l'on puisse appeler un individu."* Pas d'individus en biologie? Volontairement provocante, cette réflexion a le mérite d'exprimer la profondeur de la révolution en cours...

En 2008, Eugène et Ilana Rosenberg, de l'université de Tel Aviv (Israël), ont proposé un nouveau cadre théorique pour prendre en compte ces découvertes, qu'ils appellent **"la théorie de l'hologénome"**. Le concept vient du virologue marin Forest Rohwer, de l'université de San Diego (Etats-Unis), qui travaillait sur le corail, symbiose bien connue entre un animal (le polype) et une algue (la xanthelle). En 2005, ce biologiste a proposé d'appeler "holobionte" (c'est-à-dire "organisme entier") non seulement le corail et l'algue, mais tous les organismes qui vivent associés à eux, champignons, archées, protozoaires... Et "hologénome" l'ensemble des gènes de ces organismes. Une idée que les époux Rosenberg ont extrapolée pour considérer qu'en termes d'évolution, l'unité de sélection n'était pas l'organisme seul, mais l'holobionte entier. *"En fait, il n'existe aucun animal ni aucune plante qui soit stérile, dans le sens de "sans microbes", rappelle Eugène Rosenberg. Et ces microbes sont très importants dans leur évolution, non seulement ils leur permettent d'assurer beaucoup de leurs fonctions, mais ils sont transmis à leur descendance; le génome sur lequel agit la sélection naturelle n'est donc pas seulement son génome d'hôte, mais bien son "hologénome".*

DÉJÀ LES PREMIERS RÉSULTATS

Pour l'instant, ce sont surtout les microbiologistes et les spécialistes des symbioses qui prêtent l'oreille à cette théorie encore peu connue. Pourtant, elle ne s'oppose en rien à la pensée darwinienne, se contentant de la ré éclairer et d'en élargir la compréhension: *"L'évolution vue par Darwin, c'est primo des variations, dont*

il avoue ne rien savoir, et de plus une sélection par l'environnement, argumente Eugène Rosenberg. Ces variations ont jusqu'ici été réduites aux mutations des gènes de l'hôte, alors que la symbiose ajoute un moteur très puissant à la capacité d'innovation. Mais le schéma général reste le même, et il est darwinien."

Si la théorie de l'hologénome émerge, l'avenir dira comment elle gèrera ses points faibles, par exemple les limites floues entre "l'intérieur" et "l'extérieur" de l'holobionte, et si elle sera finalement dépassée ou pas par d'autres constructions théoriques prenant mieux en compte toutes ces interactions émergentes. En tout cas, avertit François Lallier, **"il va falloir modifier la perspective : un écosystème ne sera plus un ensemble d'espèces, mais un ensemble de réseaux d'espèces"**. Le chercheur se veut cependant optimiste : " C'est un schéma plus compliqué, mais les progrès parallèles faits en biologie cellulaire et en écologie, en s'appuyant sur des ordinateurs plus puissants, vont nous permettre de complexifier les modèles d'évolution et de prendre cela en compte..."

Cette prise en compte de la coopération ne pose pas seulement des questions théoriques fascinantes sur les moteurs de l'évolution et du vivant. Elle débouche déjà sur des recherches et même des découvertes essentielles. **En agronomie, l'utilisation des symbioses, éclipsée au cours des dernières décennies par l'abondance des engrais bon marché et des pesticides, revient en force comme stratégie de maintien de la productivité et de la résistance aux ravageurs.** En médecine, le bactériome humain apparaît désormais comme une porte d'entrée capitale dans l'équilibre métabolique de l'organisme. En écologie, la connaissance des réseaux de coopération devient cruciale pour protéger les espèces menacées de disparition.

" Reconnaître l'importance du mutualisme sous toutes ses formes, puis en décrypter et en contrôler les ressorts: les principaux enjeux de la biologie du XXIème siècle sont là", estime Russel Rodriguez. Il y faudra de la ténacité. Et, serait-on tenté d'ajouter pour le clin d'œil, **le sens de la coopération.**