

Le constat principal de votre livre est qu'à toutes les échelles, le monde vivant est complexe et interconnecté – «entrelacé». Ses composants interagissent tous, qu'il s'agisse de protéines associées, d'organismes en symbiose, de transfert de gènes, de cycles géochimiques... Quelles conséquences en tirez-vous?

La première question que pose ce constat est: pourquoi tout est collectif? Sans doute parce qu'il ne peut en être autrement, parce que rien dans le monde biologique n'est vraiment capable de se reproduire ni de persister seul. Et si tout est collectif, alors comment les composants entrent-ils en interaction? Comment s'entègrent-ils, s'appuient-ils les uns sur les autres?

Je crois que l'objet de la biologie est de comprendre les interactions par lesquelles se déploient les processus dans le temps. Il existe plusieurs définitions d'un processus, mais on peut retenir qu'il modifie un état initial et arrive à un état transformé. Des patrons d'interactions décrivent donc des processus. Certains processus sont remarquables, car ils se répètent. Par exemple, presque toutes les cellules emploient une machine moléculaire, l'ATP synthase, pour produire de l'énergie. Elle utilise l'énergie potentielle engendrée par un gradient de concentration de protons pour transformer une molécule (ADP) en une autre (ATP) que la cellule exploite. Mais avant d'utiliser ce gradient, les cellules dépensent de l'énergie pour le créer en faisant sortir les protons à l'extérieur de leur membrane. Certains y voient les vestiges d'un processus passé, à une époque où les cheminées hydrothermales des grands fonds sous-marins produisaient un gradient naturel de protons, autour duquel les premières structures biologiques se seraient développées. Cette organisation autour de tels gradients serait devenue un élément structural de l'évolution.

Les processus de la biologie prolongeraient les processus géologiques. Le défi à mon sens est donc d'étendre la théorie de l'évolution pour en faire non pas la science de l'évolution des espèces, mais celle de l'évolution des processus.

Comment analyser ces entités collectives et suivre leurs modifications?

À toutes les échelles de la biologie, on peut modéliser les processus par des réseaux: entre les gènes, les protéines, les gènes et les protéines, les cellules, etc. Nous disposons d'un concept, le réseau, d'une méthode, la théorie des graphes, et des objets décrits par la biologie. À partir de ces éléments, nous pouvons construire des réseaux, les analyser, les comparer. Dans un premier temps, on identifie les composants essentiels au processus étudié, qui constituent les nœuds du réseau. Puis on caractérise les relations entre les éléments – les arêtes du réseau. Ces liens sont de diverses natures, d'ordre chimique, électrique, métabolique, une relation de parenté, etc.

On code chaque type d'interaction par une représentation spécifique dans le réseau et on détermine le moment où chacune intervient.

Auparavant, pour étudier l'évolution, on dessinait des arbres de lignées. Aujourd'hui, les réseaux les englobent dans un ensemble plus large, car les arbres montrent des parentés, alors que les réseaux représentent des organisations et des fonctionnements. On trouve d'ailleurs des réseaux dans chaque ramification de l'arbre du vivant puisqu'il en existe dans chaque individu: réseaux métaboliques, de régulation, de coexpression (expression simultanée de gènes), etc. Le défi maintenant est de développer une science des réseaux qui permettra de penser les processus et les interactions. Elle se heurte à des défis méthodologiques considérables, notamment dans la comparaison des graphes entre eux.

Si le collectif est au centre de la biologie, pourquoi a-t-on si longtemps négligé les formes d'association du vivant comme l'endosymbiose, suggérée dès 1890 pour les mitochondries?

Les mitochondries – les centrales énergétiques des cellules eucaryotes – sont les descendantes captives d'anciennes bactéries. Mais il a fallu presque un siècle pour que cette idée s'impose. Une raison est que dans une approche réductionniste, on étudie les objets partie par partie. Dans une culture pure de bactéries, on ne peut observer ni les interactions ni les constructions collaboratives, ni même les soupçonner. Mais il existe une difficulté pratique à analyser un objet complexe pour ce qu'il est: comment cultiver une diversité de partenaires en laboratoire? Par ailleurs, nous avons l'habitude de penser en termes de lignées divergentes et séparées. Le modèle central de l'évolution est celui de l'arbre sur lequel s'organisent les lignées, et les propriétés des organismes qui sont le fruit d'associations n'ont pas leur place dans cette représentation.

Votre conception de l'évolution va-t-elle à l'encontre de l'existence d'un objet unique sur lequel l'évolution s'appliquerait, comme le gène pour le biologiste britannique Richard Dawkins?

Je suis un évolutionniste, je m'intéresse à ce qui se transforme, je n'ai pas un objet d'étude privilégié. Molécules, organismes, langages... tous ces objets susceptibles de se modifier m'intéressent, mais il n'existe pas un modèle unique qui s'applique à l'ensemble. Si l'on considère une définition de l'espèce fondée sur l'interfécondité, le mécanisme qui cause la variabilité s'appuie sur la méiose. Il n'est donc pas applicable à l'évolution des organismes qui se reproduisent par mitoses, comme les bactéries.

De plus, les processus responsables de l'évolution changent. Ceux observés chez les animaux ne sont sans doute pas les plus ➤

► pertinents pour chercher les traces des débuts de l'évolution de la vie unicellulaire. Enfin, ils ne sont pas tous strictement biologiques : il existe des processus géologiques ou géochimiques, comme les gradients d'énergie utilisés par le vivant dans les cheminées hydrothermales. L'environnement n'est pas juste un filtre qui contraint les lignées de microbes, de plantes ou d'animaux. Il contribue à produire certaines propriétés du monde vivant, comme dans le cas des métalloprotéases, ces enzymes qui utilisent des métaux pour fonctionner. Et à l'autre bout du spectre, on trouve des langages de programmation informatique, qui n'existeraient pas sans nous, mais qui sont aussi un résultat de l'évolution. Les différents processus et objets qui constituent l'histoire du vivant se rattachent les uns aux autres, mais ne s'expliquent pas d'une manière univoque.

Depuis Darwin, on explique souvent l'évolution par la sélection naturelle, qui favorise les plus aptes. Pourquoi affirmez-vous que, de plus en plus, le hasard concurrencera ces explications ?

Nos modèles pour penser la sélection s'appliquent à l'intérieur d'une lignée. Dans les collectifs composés de multiples espèces, nous avons besoin de modèles étendus pour comprendre la pérennité des associations, leurs transformations et leur succession dans le temps. Une façon plus mécanique d'expliquer des collectifs est de recourir à la théorie de la présuppression. Imaginez que deux entités, par exemple des protéines, interagissent par hasard et que, au gré d'une mutation, l'une d'elles se mette à dépendre de l'autre : elle perd ses capacités, mais l'autre les compense. Bien que désavantageuse pour la protéine seule, la mutation sera transmise à la descendance, comme si la seconde protéine avait supprimé par avance le handicap de la première.

Cette théorie offre une vision de l'évolution aux antipodes de la sélection des meilleurs. Elle décrit un monde où « les handicapés » qui s'épaient sont nombreux parmi les systèmes complexes. Certains proposent d'appliquer ce modèle aux ribosomes, des structures cellulaires formées de l'agrégation de nombreuses protéines. Dans cette perspective neutraliste, la complexité émerge d'une succession d'interactions loin d'être optimales pour la survie, mais qui interdisent le retour à l'état initial par un effet cliquet : la probabilité d'un retour à un état indépendant est beaucoup plus faible que celle de s'en éloigner. Cette interprétation diverge de celle selon laquelle lors de la complexification d'un assemblage de protéines, la sélection optimise les fonctions de cet assemblage.

Un autre paramètre intervient, la taille des populations. Lorsqu'elles sont grandes, la sélection peut agir, lorsqu'elles sont petites, le hasard prend une place prépondérante. Pour

de nombreuses associations, comme l'acquisition de la mitochondrie dans une cellule pré-eucaryote, on peut imaginer qu'au début, les populations étaient petites.



Cette vision de l'évolution est aux antipodes de la sélection des meilleurs



Si on prolonge votre constat d'entrelacement en incluant, comme vous le faites, les éléments abiotiques des écosystèmes, ne rejoint-on pas l'hypothèse Gaïa ?

Dans l'hypothèse Gaïa, les écosystèmes de la planète sont intégrés, de telle sorte qu'une entité supérieure émerge. Je pense non seulement que cette fascinante question se pose, mais aussi qu'elle entre dans le cahier des charges des évolutionnistes. Existe-t-il un tel collectif et, si oui, comment parler de ses évolutions et de ses transformations ? Il est encore trop tôt pour répondre à ces questions, mais on peut prendre des modèles à une échelle plus petite. On sait que différents microbes dans un environnement peuvent réaliser une fonction, par exemple une voie métabolique qui a un impact sur la fixation du carbone ou sur des cycles géochimiques. Lorsqu'une telle voie est installée, un découplage peut survenir entre sa fonction et l'évolution des composants qui la produisent. La fonction a été sélectionnée, elle perdure, mais les microbes et leurs génomes se transforment. En serait-il de même pour une fonction attribuée à Gaïa ?

Pensez-vous qu'une réorganisation de la profession soit nécessaire pour élargir le cadre conceptuel de l'évolution ?

La multidisciplinarité me paraît la meilleure façon d'y parvenir. À partir du moment où l'on pense que des associations sont sélectionnées et qu'elles sont composées d'éléments n'ayant pas toujours la même origine, la même manière de se transformer ni le même tempo d'évolution, on comprend qu'il est nécessaire de solliciter les compétences de certains collègues, ce qui conduit à une modification des pratiques. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR GÉRARD LAMBERT