

La liberté sémiotique : une force émergente

Jesper HOFFMEYER

Cygne noir, no 4, 2016 : « Sémiotique et liberté »

Résumé

Cet article présente des arguments en vue d'une résolution des problèmes liés à la question de l'intentionnalité naturelle dans une perspective biosémiotique. En confrontant les théories de l'information au modèle évolutionniste dominant en biologie, l'auteur montre les insuffisances du réductionnisme néodarwinien dans les cas d'adaptation sans évolution au sens strict de la sélection naturelle. Ainsi est-ce l'agentivité qui se retrouve au cœur de l'interrogation : comment a-t-elle pu émerger au sein de la nature? Est-elle suffisante pour définir le vivant? Le modèle biosémiotique permet d'envisager un continuum évolutif au sein du vivant, dont le facteur de croissance, et l'effet, serait l'accroissement de la liberté sémiotique, c'est-à-dire l'amélioration, pour les organismes vivants, de leurs compétences interprétatives, liberté dont l'effet bénéfique sur la valeur sélective s'observe à travers une sophistication des modes de communication inhérents à leur organisation.

Pour citer cet article

HOFFMEYER, Jesper, « La liberté sémiotique : une force émergente », trad. de l'anglais par Simon Levesque, *Cygne noir*, no 4, 2016. En ligne : <<http://www.revuecygnoir.org/numero/article/liberte-semiotique-force-emergente>> (consulté le xx/xx/xxxx).



Cet article de *Revue Cygne noir* est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 2.5 Canada.

LA LIBERTÉ SÉMIOTIQUE : UNE FORCE ÉMERGENTE *

Le terme « information » est devenu quasi omniprésent en biologie (et en médecine) moderne. Il ne serait sans doute pas exagéré, aujourd'hui, de reformuler le célèbre adage du biologiste de l'évolution Theodosius Dobzhansky, selon lequel « rien, en biologie, n'a de sens, sauf à se placer sous l'éclairage de l'évolution », par : « rien, en biologie, n'a de sens, sauf à se placer sous l'éclairage de l'information. » Mais ces deux concepts, évolution et information, sont-ils intrinsèquement reliés? Et si oui, comment?

1. L'information dans l'évolution

Dans les manuels, les journaux, et même dans les articles scientifiques, le sens des termes « évolution » et « information » est généralement tenu pour acquis et rarement expliqué. Et pourtant, il n'existe aucun consensus en science, ou même en biologie, quant à leur signification exacte. Ainsi, l'exemple privilégié (au sens kuhnien) pour illustrer l'évolution par la sélection naturelle est celui du mélanisme industriel. Dans les régions boisées, où la pollution industrielle a tué le lichen, ce qui a eu pour effet de révéler l'écorce d'un brun sombre des arbres, des phalènes du bouleau de teinte foncée – mélaniques – sont censées être mieux camouflées contre la prédation des oiseaux que ne le sont celles affichant un gris pâle, prédominantes avant la Révolution industrielle. L'observation, vers 1950, que les formes sombres avaient largement remplacé les formes claires était ainsi prise comme une preuve de l'action de la sélection naturelle. Il est vrai que cet exemple illustre l'effet de la sélection naturelle, mais de là à dire qu'il montre ce qu'est l'évolution, cela dépend en fait de l'idée qu'on s'en fait. Si, par le terme « évolution », on veut dire quelque chose comme « l'origine des espèces », alors il faut bien remarquer qu'aucune spéciation n'a proprement eu lieu dans ce cas, et il n'est pas évident qu'une spéciation pourrait effectivement avoir lieu dans un cas pareil. Certes, les populations changent sous l'effet de la sélection naturelle, mais peut-on supposer que le même mécanisme se trouve à la fois derrière la spéciation et l'évolution au sens large? La majorité des biologistes est certainement confiante que la macroévolution – c'est-à-dire l'évolution au-dessus du niveau des espèces – est en fait le résultat délayé d'une microévolution infiniment en cours (l'adaptation au sein des populations), mais des désaccords importants persistent à cet égard¹.

Pareillement, le terme « information » est bourré d'ambiguïtés. Il se peut que des théoriciens parviennent à éradiquer de telles ambiguïtés par des définitions rigoureuses, mais, le plus souvent, on voit mal comment des concepts d'information, même bien définis, se rapportent

* Publication originale anglaise : « Semiotic freedom: an emerging force », dans P. C. W. Davies & N. H. Gregersen (dir.), *Information and the Nature of Reality. From Physics to Metaphysics*, Cambridge (G.-B.)/New York, Cambridge University Press, 2010, p. 185-204. Traduction : Simon Levesque.

à un usage concret de l'information comme outil explicatif en biologie. Lorsqu'il est question d'information, la plupart des biologistes ont probablement à l'esprit le genre d'information exprimé par le soi-disant « dogme central », tel qu'énoncé par Francis Crick : « Une fois que l'information est passée dans la protéine, elle ne peut en ressortir » ; ce qui revient à dire que le flux d'information dans la cellule est unidirectionnel : il a son origine dans le gène et trouve sa fin dans la protéine (voir figure 1).



Figure 1. Selon le « dogme central », le flux d'information dans une cellule est unidirectionnel. L'information est transportée de l'ADN vers l'ARN, puis vers la protéine, mais ne circule jamais dans la direction inverse.

Les auteurs de manuels scolaires insistent sur le fait que le genre d'information dont il s'agit ici est de l'« information séquentielle » qui est « reproduite » quand la cellule se divise, « transcrite » en ARNm et exprimée par les gènes. Suivant la transcription en ARNm, on dit de l'information qu'elle est le « résultat d'un processus » ou qu'elle a été « éditée », sur quoi elle migre du noyau au cytoplasme, où elle est enfin « lue » par un ribosome qui la « traduit » en protéine. Toutefois, comme l'a montré Sahotra Sarkar, rien ne se passe là qui ne pourrait être exprimé par des processus biochimiques adéquats montrant qu'une causalité traditionnelle est à l'œuvre². Pourquoi les biologistes moléculaires préfèrent-ils donc parler d'« information » ?

À n'en pas douter, la métaphore de l'information possède une valeur heuristique certaine ; quelque chose s'ajoute à notre compréhension lorsqu'on parle d'information plutôt que de chimie seulement. En fait, sans la métaphore de l'information, il serait difficile de comprendre quoi que ce soit à la biochimie moderne³. Mais quelle que soit cette compréhension ajoutée, d'après les biologistes moléculaires, elle ne fait pas partie de la réalité cellulaire : la chimie épuise ce qui se passe au niveau cellulaire. À mon avis, la raison d'une telle insistance sur la réductibilité de l'information à la chimie tient à ce que la valeur heuristique du concept d'information est reliée au rôle que joue l'histoire (l'évolution) dans la vie des organismes cellulaires. Ce qui se passe, c'est que « l'histoire parle », mais l'histoire n'est pas considérée comme faisant partie de la biochimie ou de la biologie moléculaire. Comme l'a montré Terrence Deacon⁴, l'aspect contextuel (historique) de l'information tient, en dernière analyse, au fait que tout signal informatif est nécessairement causé par des perturbations externes manifestées par les disparités qu'un milieu présente par rapport à son état attendu. La réception d'un signal informatif fournit, *ipso facto*, la preuve de l'influence matérielle de quelque chose d'autre que le signal lui-même, liant sa forme résultante à cette « cause absente » : l'objet de référence immédiat ou médiateur. Certes, l'histoire ne « fait » rien, et, plus certainement encore, ne « dit » rien, mais la forme observable du substrat informatif – par exemple, telle séquence de nucléotides observée dans une section d'un brin d'ADN – n'en réfère pas moins à des causes absentes, c'est-à-dire

à des causes relatives au passé évolutif de l'espèce. Cet aspect référentiel de l'information sert l'intentionnalité inhérente à l'information biologique dans la mesure où il reflète l'œuvre de la sélection naturelle. Comme le dirait Deacon, les représentations génétiques et phénotypiques qui montrent le moins de corrélations avec les régularités environnementales ne seront pas transmises (reproduites).

L'effet (inconscient?) du « débat sur l'information », apparemment inévitable en biologie moléculaire, pourrait bien être de faire passer en douce, par la porte arrière, pour ainsi dire, l'aspect intentionnel (sémiotique) de l'information. À la surface, l'information génétique est traitée comme s'il ne s'agissait que d'un simple facteur causal, mais le charme profond qu'elle exerce sur notre entendement tient à l'intentionnalité taboue qu'elle connote secrètement. Au niveau de la biologie moléculaire elle-même, l'exclusion de l'histoire peut s'avérer relativement innocente, mais lorsqu'on reconnaît la biologie moléculaire comme base pour la génétique et l'évolution, cette conception anhistorique en vient à servir la réification de processus qui, dans les faits, sont intimement liés à des contraintes contextuelles qui devraient être prises en compte dans nos théories. Les gènes sont censés spécifier des traits particuliers ou des caractères tels que l'absence d'yeux chez une mouche à fruit ou la chorée de Huntingdon chez les humains. La question est donc la suivante : qu'est-ce que cela signifie que les gènes transportent de l'information sur de telles propriétés?

L'identification de l'information génétique à « l'information séquentielle » renforce, et est renforcée par, la croyance en des versions génocentriques du darwinisme. Si l'information n'est rien qu'une propriété moléculaire de l'ADN, alors elle peut être reproduite et transportée à travers les générations en des unités bien définies et non ambiguës, sujettes aux modifications par le processus combiné de la mutation et de la sélection. Et la sélection naturelle optimisera à son tour l'ensemble des unités d'instruction transportées dans le bassin génétique d'une population donnée. Mais à nouveau se trouve éludé, dans cette vue simplifiée du fonctionnement des gènes, le fardeau du contexte. Le fonctionnement concret des gènes est dépendant non seulement du fond génétique dans lequel ils se trouvent placés, mais aussi d'une foule de circonstances normalement décrites collectivement par le milieu⁵. Même les maladies monogénétiques qui, jadis, ont servi de modèle à nos idées sur le fonctionnement des gènes ne permettent plus de valider cette conception selon laquelle les gènes seraient des unités fonctionnelles non ambiguës et autonomes. Ainsi en va-t-il de la phénylcétonurie, une maladie monogénétique dont on a montré qu'elle pouvait produire des variations phénotypiques assez inattendues⁶. Les porteurs du « gène de la maladie » non traités ne manifestent pas tous des perturbations du développement cognitif, probablement parce que l'accroissement de la concentration toxique de l'acide aminé phénylalanine dans le cerveau est influencé par des facteurs inconnus. L'information génétique ne « cause » pas simplement les événements.

Il est inutile de rappeler que les défenseurs du « dessein intelligent » utilisent ce genre de critique pour attaquer la légitimité de la théorie de l'évolution. Et les darwiniens, de leur côté, réagissent avec la plus grande suspicion à toute critique du schéma général de la théorie de l'évolution. Une troisième possibilité existe cependant, et c'est cette possibilité que je vais présenter et commenter dans la suite de ce texte : nommément, l'approche dite *biosémiotique*.

2. La sémiologie et la vie

La biosémiotique propose d'étudier les systèmes vivants en tant que systèmes sémiotiques⁷ à part entière. Cette idée est fondée sur la croyance selon laquelle la pauvreté du discours sur l'information dans les sciences biologiques résulterait de la négligence, dans la réduction, de l'aspect interprétatif de l'information biologique. En introduisant le concept de signe, tel que développé par le chimiste et philosophe américain Charles Sanders Peirce (1839-1914) comme substitut à l'information, on s'assure de ne pas négliger le côté interprétatif de l'information. Dans le langage de tous les jours, un signe est simplement « quelque chose qui réfère à quelque chose d'autre », comme la fumée réfère à un feu. Toutefois, cette référence ne peut se faire sans qu'un processus d'interprétation n'entre en jeu. Ainsi, un bébé ne saura pas que la fumée signifie qu'un feu a lieu. Un chevreuil, en revanche, ne saura peut-être pas que la fumée réfère au feu, mais il prendra assurément le feu comme un signe de danger. Et les adultes humains, bien sûr, tournent habituellement la tête pour voir où pourrait se trouver le feu⁸. Un « interprétant » est construit par des processus cérébraux qui opèrent une médiation connective entre l'impression sensible de la fumée et l'existence présumée de quelque chose qui brûle. On obtient ainsi le concept peircien de signe triadique, tel que donné dans la figure 2.

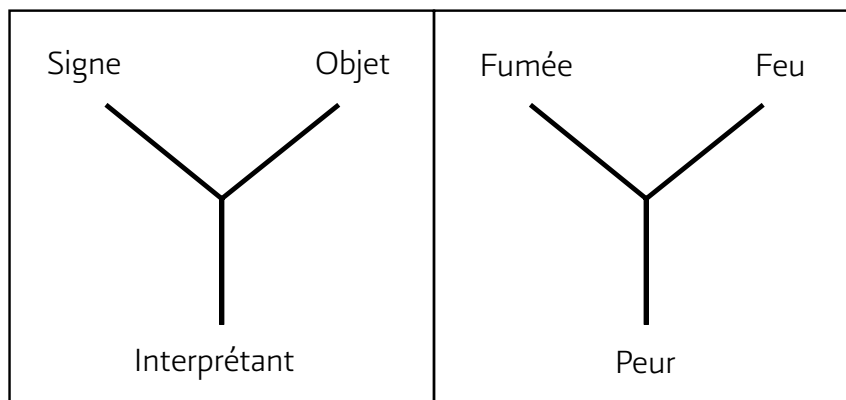


Figure 2. L'action des signes. À gauche : une illustration graphique de la conception du signe de Charles Sanders Peirce en tant que relation triadique connectant le signe primaire à son objet à travers la production d'un interprétant. À droite : la fumée provoque la formation d'un interprétant dans le cerveau d'un animal, ce qui le pousse à fuir. L'animal est effarouché, et cet effarouchement est l'interprétant. Dans cette figure, les trois instances de la relation-signe sont connectées par un tripode, plutôt que par un triangle, pour mettre l'accent sur la logique interne de la relation-signe, laquelle ne devrait jamais être confondue avec une simple addition des trois relations entre les coins d'un triangle.

Les signes ne sont toutefois pas des causes au sens traditionnel (aristotélicien) de l'efficacité causale, car l'effet du signe n'est pas immédiat, mais dépend d'un processus d'interprétation, et cette interprétation peut très bien être – et l'est probablement le plus souvent – « erronée ». Ceci s'observe par exemple lorsqu'un prédateur est attiré loin d'un nid d'oiseau

parce qu'il mésinterprète le comportement pataud de l'oiseau comme le signe d'une proie facile. L'oiseau, cependant, ne faisait que prétendre qu'une de ses ailes était brisée et s'est enfui dès que le prédateur est passé outre le nid sans le voir. Dans ce cas, intéressant d'un point de vue sémiotique, l'oiseau profite de sa « connaissance » de l'habitude prévisible du prédateur qui consiste à se laisser tenter par les proies faciles. Que le « savoir » de l'oiseau dans ce cas soit phylogénétiquement (inné) ou ontogénétiquement (acquis) fondé ne change pas la logique générale de la situation – la différence ne tient qu'au mécanisme implicite et à la durée de l'acte interprétatif. D'une part, si le comportement de l'oiseau repose sur l'instinct, alors il est le résultat d'une interprétation évolutive, et nous parlons alors de temporalités s'étendant peut-être sur des millions d'années durant lesquelles cette habitude particulière s'est développée chez l'oiseau comme une réponse interprétative au comportement prévisible du prédateur. Si, d'autre part, le comportement repose sur l'apprentissage, alors l'acte interprétatif est le produit de processus cérébraux qui ne sont pas très éloignés des processus cérébraux impliqués dans notre propre activité interprétative humaine.

J'ai dit plus haut que la valeur heuristique du concept d'information découlait de la nature historique des systèmes vivants. Bien que personne en science ne nie que les créatures vivantes soient le résultat d'un processus évolutif, ce processus n'est normalement pas conçu comme historique au sens usuel du terme parce qu'on suppose qu'il obéit à la règle déterministe des lois naturelles. Toutefois, la métaphysique du déterminisme paraît de moins en moins soutenue par les observations de la science moderne. On ne peut, bien entendu, l'exclure d'emblée, mais il ne semble plus y avoir de raisons fortes de l'adopter. Dans le livre de Stuart Kauffman, *Investigations* (2000), une part importante de l'analyse tourne autour de la question de la non-ergodicité de l'univers, autrement dit du fait que l'univers n'aurait en fait jamais disposé du temps qui lui aurait été nécessaire si l'on s'accorde à dire que son état de fait présent est, de quelque manière que ce soit, représentatif de ses possibilités intrinsèques. Le mouvement persistant de l'univers vers le « possible adjacent » l'empêche à jamais d'atteindre un état qui soit dépendant d'une probabilité statistique. L'univers serait plutôt historique, puisque « l'histoire s'amorce quand l'espace du possible qui aurait pu être exploré est plus large, ou vastement plus large, que ce qui est effectivement advenu⁹ ».

La nature historique du monde a de profondes conséquences sur l'étude de la vie, parce qu'elle nous confronte au problème de l'organisation sous un nouvel angle. Si les formes complexes d'organisation manifestées par les systèmes vivants – de la cellule à l'écosystème – ne sont pas le résultat indéniable de la régularité prévisible, alors elles doivent avoir émergé de processus qui attendent toujours d'être découverts. Le principe de la sélection naturelle, bien sûr, nous aide grandement à expliquer l'étendue de l'adaptabilité des biosystèmes, mais nous avons besoin d'un principe supplémentaire qui nous permettrait de résoudre la question fondamentale de la « directionnalité » (*aboutness*) de la vie, de la chaîne infinie de tentatives, par les systèmes vivants, d'en venir à une adéquation par rapport à leurs conditions de vie. Comme l'ont formulé Stuart Kauffman et Philip Clayton : « il est stupéfiant que l'univers ait donné naissance à des entités qui, quotidiennement, modifient l'univers à leurs propres fins. Nous appellerons cette capacité l'*agentivité*¹⁰. » Cette « agentivité » implique nécessairement une

sorte de processus de mesure en vertu duquel un agent peut modifier son environnement de manière sélective, poursuivant ses propres fins, et ce processus de mesure est au cœur de cette « directionnalité » si remarquable qui caractérise les systèmes vivants. Ainsi la « directionnalité » ne peut-elle pas être dérivée du principe de la sélection naturelle, puisqu'elle est requise, en premier lieu, par l'opération de la sélection naturelle elle-même¹¹. Si les organismes ne manifestaient pas cette directionnalité, s'ils ne « s'intéressaient » pas au monde qui les entoure (s'ils ne « s'efforçaient » (*strive*) pas – pour utiliser le terme de Darwin lui-même¹²), il n'y aurait aucune « compétition pour la survie », mais seulement de l'activité désorganisée ne menant nulle part.

Mais si la sélection naturelle n'est pas responsable de cette directionnalité, qu'est-ce qui, dès lors, en est au fondement? Kauffman et Clayton tentent une définition en cinq parties :

un agent moléculaire minimal : un tel système devrait être capable de se reproduire avec variation héréditaire, devrait réaliser au moins un cycle d'activité complet, devrait avoir des frontières telles qu'il peut être naturellement individué, devrait s'engager dans un travail d'autopropagation et de construction contrainte, et devrait être en mesure de choisir entre au moins deux possibilités¹³.

Terrence Deacon a suggéré un système encore plus simple à titre de candidat pour l'émergence prébiotique de la vie et de l'agentivité, un système qu'il appelle l'« autocellule »¹⁴. Les autocellules sont des structures moléculaires qui s'assemblent d'elles-mêmes et dont l'individualité, est, à l'origine, le résultat d'une relation synergetique entre deux sortes de processus d'auto-organisation qui dépendent chacun, mutuellement, de la persistance de l'autre. De telles autocellules pourraient avoir constitué une étape importante dans le processus menant du non-vivant au vivant. Toutefois, comme l'indiquent Deacon et Sherman eux-mêmes, les autocellules ne sont pas encore des systèmes vivants pleinement développés. Il leur manque plusieurs caractéristiques qui sont généralement considérées comme des critères pour être en vie, telles que la possession de molécules reproductibles d'ARN ou d'ADN et la survie différentielle à travers la reproduction. De plus, les autocellules ne satisfont pas l'ensemble des critères mis de l'avant par Kauffman et Clayton. Le modèle de l'autocellule, en revanche, démontre bel et bien la possibilité d'une continuité intacte depuis la thermodynamique jusqu'à la capacité d'évolution.

Le point d'achoppement de toute théorie de l'origine de l'agentivité et de la vie consiste à trouver un moyen d'unifier deux dynamiques distinctes, normalement assez bien séparées : une dynamique des motifs d'interactions chimiques et une dynamique de signification, ou sémiose. Ce qui nécessite aussitôt une prise en compte de la situation contextuelle, c'est-à-dire de l'environnement. Les critères de Kauffman-Clayton se plient clairement à cet impératif, mais les chercheurs présupposent aussi un commencement bien plus complexe que ne le fait le modèle de l'autocellule de Deacon. Il reste à examiner si, ou comment, les deux approches peuvent être conciliées.

Évidemment, la première chose que la biosémiotique nous rappelle est que « chercher l'origine de la vie, c'est chercher l'origine de l'environnement¹⁵ ». Les organismes vivants sont inscrits dans leur environnement un peu comme des motifs filés dans un tapis – l'un ne va pas sans l'autre. D'un point de vue sémiotique, le pas décisif dans le processus ayant mené

à l'origine de la vie fut l'apparition dans le monde d'une première sorte d'asymétrie, *une asymétrie entre l'intérieur et l'extérieur*. La formation d'une membrane recouvrant entièrement un système de composants lui-même clos et autocatalytique¹⁶ pourrait avoir constitué une étape initiale. Une telle membrane aurait créé ce qui est probablement l'attribut le plus essentiel et unique de la vie : l'interminable *intérêt* des intérieurs pour leurs extérieurs ou, en d'autres mots, la *directionnalité* cellulaire. J'ai suggéré que cet « intérêt » ne devrait pas être entendu au sens d'une propriété dont l'origine ultime serait la membrane primitive elle-même. Une surface membranaire fermée sur elle-même a nécessairement deux sortes d'extérieurs distincts, l'extérieur interne et l'extérieur externe. Pour que l'agentivité apparaisse, de telles membranes doivent être parvenues non seulement à canaliser un flux sélectif de composants chimiques à travers elles, mais également à subsumer leur système de composants interne pour aider ces composants à résister au flux de perturbations en provenance de l'extérieur externe. Ou, pour le dire autrement, pour que les membranes persistent, il leur faut fonctionner comme des interfaces connectant leur monde intérieur au monde extérieur. À un certain point au cours du développement prébiotique, une description numérique autoréférentielle (sous forme d'ARN ou d'ADN) des composants constitutifs de la « cellule » a dû être établie. Toutefois, pour qu'un système prébiotique devienne un véritable système vivant, cette description autoréférentielle du système a dû être intégrée (par exemple à travers la transduction signalétique) dans le système alter-référentiel que constituent les récepteurs à la surface de la cellule. *Une telle intégration stable d'un système autoréférentiel numériquement codé dans un système alter-référentiel analogiquement codé pourrait être vue comme une définition de la vie*¹⁷.

3. Liberté sémiotique

Quand une cellule bactérienne se trouve dans un gradient de nutriments et qu'elle nage vers la droite plutôt que vers la gauche, la cellule fait un choix¹⁸. Le choix est bien entendu basé sur une mécanique chimiotactique compliquée (comprenant des pointages de différentes espèces de protéines), mais une analyse biochimique du système chimiotactique n'épuise pas la question. Nous devons aussi savoir pourquoi ce dispositif s'est développé à l'origine. La biochimie nous permet essentiellement de construire une image de la vie cellulaire en tant que chaînes ou toiles de réactions chimiques prenant place à l'intérieur d'une cellule ou d'un organisme. Bien sûr, elle peut être extrêmement utile dans de nombreux contextes, mais, en soi, cette image ne contient aucune information sur la logique structurale ayant régi l'organisation de cet apparent fouillis composé des millions de réactions chimiques prenant place dans une cellule. Comme l'a dit un jour le lauréat du prix Nobel et biochimiste Alfred Gilman à *Scientific American* :

J'aurais pu dessiner une carte de toutes les dizaines de milliers de composants d'un organisme unicellulaire et y mettre toutes les bonnes flèches les reliant [et, même là,] moi-même ou n'importe qui d'autre jetterait un œil à cette carte et n'aurait pas la moindre capacité de prédire quoi que ce soit¹⁹.

La clé de l'organisation cellulaire ou organismique doit être recherchée du côté des contraintes historiques (évolutives) pesant sur les interactions des biosystèmes simples entre eux et avec leur environnement. Dans la conception sémiotique décrite ci-avant, la mécanique chimiotactique sert à intégrer les sensations du monde extérieur à la réalité du monde intérieur au fur et à mesure que cette réalité est décrite dans le système autoréférentiel, ou génétique. La sélection naturelle, bien entendu, a modulé ce système de fond en comble depuis les toutes premières cellules apparues sur Terre ; et pour ce que nous en savons, le système est très bien protégé. La possibilité demeure tout de même que des mutations viennent le gâcher ou le changer et, plus important peut-être, que des facteurs extérieurs puissent le tromper. Des chercheurs pourraient par exemple facilement tromper le système chimiotactique bactérien en ajoutant des nutriments analogues (tels que des édulcorants artificiels plutôt que du glucose) au milieu ; et, vraisemblablement, la nature elle-même, de temps en temps, « inventera » des sortes de duperies comparables.

Dans de tels cas, il semble approprié de dire que la cellule mésinterprète les signes chimiques de son environnement. De telles mésinterprétations sont dangereuses, et la sélection naturelle favorisera n'importe quelle solution permettant à l'organisme de mieux interpréter les situations qu'il rencontre. En effet, une sélection favorisant l'évolution de formes plus sophistiquées de « liberté sémiotique », au sens d'une capacité accrue à répondre à une variété de signes par le truchement d'interprétants (localement) signifiants, est attendue. La liberté sémiotique (ou interprétance) permet à un système de « lire » plusieurs sortes de « signaux » dans son entourage, et cela doit normalement avoir un effet bénéfique sur la valeur sélective (*fitness*). Ainsi, depuis les commencements modestes observés au niveau de la chimiotactique bactérienne, la liberté sémiotique des systèmes organiques aurait eu tendance à s'accroître. Et bien qu'il n'ait pas été facile de prouver qu'une complexification systémique, au sens où ce concept est traditionnellement défini, a bel et bien accompagné le processus évolutif, il demeure somme toute évident que la complexité sémiotique, ou liberté, a effectivement atteint des niveaux plus élevés à des stades ultérieurs, les espèces avancées d'oiseaux et de mammifères en général étant sémiotiquement beaucoup plus sophistiquées que les espèces moins avancées²⁰.

Parce que la liberté sémiotique est caractérisée par une dynamique auto-amplifiante, sa reconnaissance dans le monde organique modifie significativement la tâche qui consiste à expliquer l'émergence de l'évolution. Les configurations communicationnelles au sein des assemblages de cellules ou dans les cellules prises individuellement pourraient souvent être apparues d'abord comme le simple résultat du processus d'essai-erreur inhérent à l'interaction normale, de sorte qu'elles ont pu se maintenir sur des temporalités considérables. Si de telles configurations sont avantageuses pour les populations (de cellules ou d'organismes), elles peuvent éventuellement s'intégrer à un échafaudage que les événements mutationnels subséquents viendraient élever. À travers ce mécanisme « semi-baldwinien », le processus évolutif s'ouvre sur une aire d'orientation des objectifs (*goal-directedness*) auparavant exclue²¹.

La biosémiotique présente un argument fort pour une conception émergentiste de la vie. Par l'émergence sémiotique, je veux dire l'établissement de macro-entités ou de configurations de niveau supérieur à travers un échange situé de signes entre des sous-composants. S'il est

vrai que, tant que ne sont considérées que les seules interactions physiques entre les entités, l'émergence de configurations de niveau supérieur peut sembler quelque peu mystérieuse (souvent sujette aux suspicions de vitalisme), en revanche, le même résultat devient assez compréhensible lorsqu'il se trouve fondé sur des interactions *sémiotiques* entre des entités au niveau inférieur. Plus important encore, l'*émergence sémiotique*, en ce sens, se présente comme une solution de rechange à la sélection naturelle au titre de mécanisme explicatif de l'évolution des comportements intentionnels.

La conception biosémiotique implique également que la sémiose ne peut être utilisée pour distinguer l'espèce humaine du reste des créatures du monde. Certes, les compétences linguistiques de notre espèce nous rendent très différents des autres espèces sur Terre, mais comme l'ont montré les travaux de Terrence Deacon, la capacité d'usage de la référence sémiotique n'est pas en soi la marque distinctive séparant les humains des animaux. Ce qui nous distingue, c'est notre talent incomparable pour mener cette sorte d'activité sémiotique si particulière qu'est la référence symbolique²², sur laquelle repose en bonne partie notre activité langagière. Nous partageons la compétence sémiotique en tant que telle (c'est-à-dire la capacité de référence iconique et indexicale) avec toutes les formes de vie. Ainsi la biosémiotique nous remet-elle au sein de la nature en même temps qu'elle reconstruit la nature comme le lieu d'appartenance des humains. La nature nous est bien plus familière que la science – dans son obédience au tabou anthropocentrique – ne l'a admis. À la pensée dichotomique (*either-or*) cartésienne, la biosémiotique substitue une pensée graduelle (*more-or-less*).

John Deely a appelé l'être humain « l'animal sémiotique »²³. La sémiose – l'action des signes – prend place partout au sein de la sphère du vivant, mais seuls les humains *connaissent* la différence entre les signes et les choses ; seuls les humains sont des animaux sémiotiques.

4. L'émergence sémiotique et la causalité descendante

L'une des questions clés dans les débats sur l'émergence concerne la réalité ontologique des influences causales qu'exerce le macro-état d'un système sur ses entités de niveaux inférieurs. L'expression « causalité descendante » (*downward causation*) est souvent utilisée pour exprimer ce type de relation causale dans laquelle un macro-état agit sur les micro-états qui, en fait, le constituent²⁴. Le terme peut être conçu comme une tentative d'exprimer une partie de ce qu'on avait l'habitude d'appeler « causalité finale », mais sans devoir se rattacher à l'héritage culturel aristotélicien et à tout le bagage que celui-ci implique. Comme nous le verrons, l'émergence sémiotique et la causalité descendante constituent les deux côtés – ou plutôt les deux aspects – d'une même médaille, que je préfère appeler « causalité sémiotique », laquelle produit ses effets à travers un processus d'interprétation.

Les travaux diligents et très enrichissants de Deborah Gordon sur les fourmis de l'espèce *Pogonomyrmex barbatus* (qui vivent dans une zone aride bordant les déserts entre l'Arizona et le Nouveau-Mexique) nous serviront d'illustration. Les travaux de Gordon ont révélé que la survie des colonies de cette espèce repose presque entièrement sur la régulation d'un modèle sophistiqué d'interactions sémiotiques entre des fourmis individuelles, ce qui soulève la question

consistant à savoir s'il est juste de concevoir la colonie comme un « super-organisme »²⁵. Dans une perspective sémiotique, un super-organisme peut être compris comme un assemblage d'organismes dont l'interaction collective avec l'environnement repose sur une activité sémiotique interne finement élaborée au sein des organismes individuels – sur une « proto-endosémiotique »²⁶. Gordon a remarqué un élément particulièrement important en observant le comportement de la colonie et son processus de croissance, qu'elle appelle « l'assignation d'emploi » – et elle montre que, bien que cette tâche repose effectivement sur un modèle d'interaction plutôt schématique entre différents groupes de fourmis, un élément d'imprévisibilité persiste :

Une fourmi ne répond pas de la même manière à chaque fois au même stimulus ; pas plus que ne le fait la colonie elle-même. Certains événements influencent les probabilités qu'un certain nombre de fourmis accomplissent certaines tâches, et cette régularité mène à des tendances prévisibles plutôt qu'à un résultat parfaitement déterminé²⁷.

L'expérience de Gordon dans ce champ peut être vue comme une réponse aux expériences accomplies par le fondateur de la sociobiologie, Edward O. Wilson, qui prétendaient montrer qu'un parfait déterminisme régissait le schéma de réponse des fourmis aux signaux chimiques (par exemple à l'acide oléique²⁸). L'expérience de Gordon, au contraire, a montré que « tout comme le même mot peut avoir différentes significations en différentes situations [...] le même signal chimique peut provoquer des réponses différentes dans des situations sociales différentes²⁹ ». Les processus physiologiques, sociaux et écologiques agissent simultanément, dit Gordon, et aucun d'eux n'est plus élémentaire que les autres : « Les niveaux d'organisation du vivant sont centraux à toute étude du comportement social. Pour les humains et les autres animaux sociaux, le comportement d'un individu est toujours ancré dans un monde social³⁰. »

La compétence sémiotique des sous-unités – que ces sous-unités soient des individus humains au sein d'une société, des plantes dans un écosystème, des cellules dans un organisme multicellulaire ou des fourmis dans une colonie – est donc le médium à travers lequel le comportement et l'intégrité de l'entité de niveau supérieur sont produits et maintenus. Dans la mesure où les relations endosémiotiques d'un tel système perçoivent et utilisent les signaux et les signes qui indiquent (qui sont les indices de) l'état de l'unité holistique et de ses « besoins », il semble justifié de qualifier ces processus d'authentiquement *endosémiotiques* – et, conséquemment, au système holistique lui-même, en tant qu'unité autonome, mérite d'être attribué un statut : celui de super-organisme.

La formation évolutive de ce genre de macro-entités est la quintessence de ce qu'on appelle la « causalité descendante » telle que définie plus haut, et le rapport entre l'émergence sémiotique et la causalité descendante doit être compris comme appartenant aux deux phénomènes à la fois, tel que le montre la figure 3.

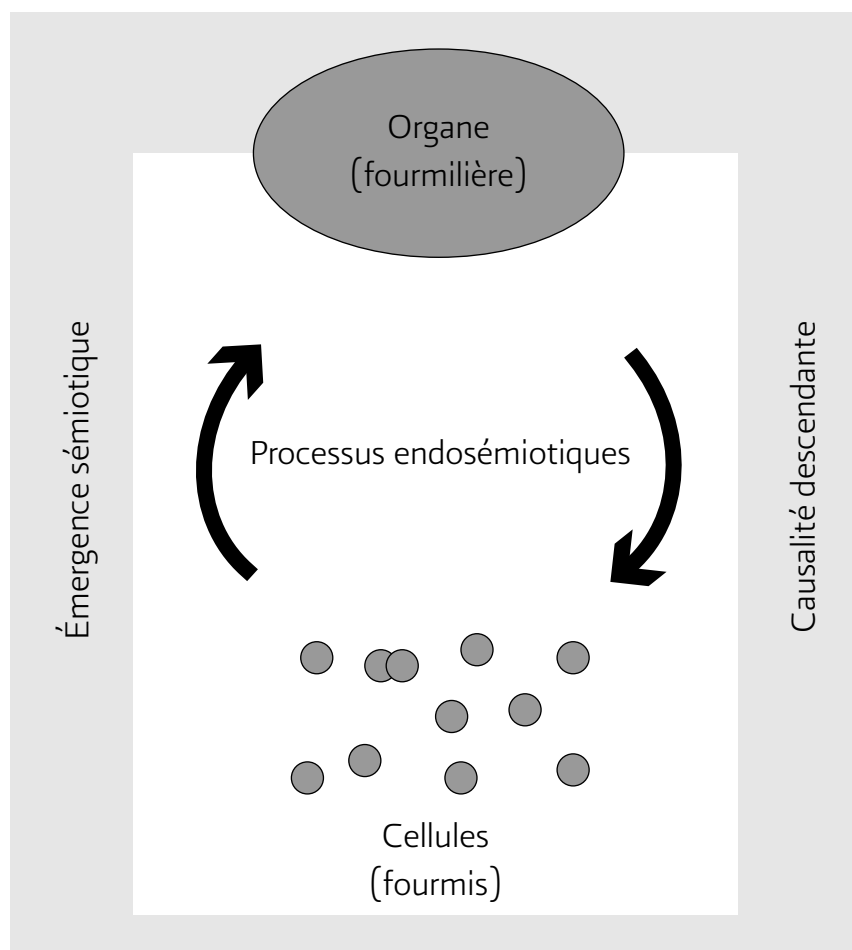


Figure 3. La relation entre l'émergence sémiotique et la « causalité descendante ». La causalité descendante opère à travers des relations de signes indexicaux ; c'est-à-dire que les valeurs des paramètres du système sont interprétées par les agents du niveau inférieur en tant que signes indexicaux. Mais cet état de fait en soi présuppose la formation d'un modèle de grande échelle avec un comportement qui stabilise les interactions sémiotiques entre les parties³¹.

Les relations sémiotiques entre les sous-unités qui, collectivement, sont responsables de la stabilité de l'échelle supérieure, ou du système holistique (par exemple la fourmilière, l'organisme multicellulaire, ou peut-être encore le système symbiotique des seiches et de la bactérie luminophore *Vibrio*, voir ci-après), doivent nécessairement être engagées de manière à pouvoir répondre à des changements environnementaux sans menacer l'intégrité du système de niveau supérieur. Les sous-unités, quant à elles, doivent recevoir des messages leur disant comment soutenir le macro-système, et la manière la plus simple de faire cela consiste probablement à distribuer les besoins du macro-système par l'entremise de signes « indexicaux ».

Ce qu'on appelle la « détection du quorum » (*quorum sensing*) constitue un exemple intéressant. La détection du quorum en est venue à désigner une sorte d'activité de communication chez les bactéries par laquelle la densité des bactéries présentes est un facteur causal. Pour faire court, la détection du quorum est le résultat d'un processus par lequel chaque bactérie, individuellement, excrète un certain composé chimique de telle sorte que la concentration de ce composé dans le milieu doit refléter le nombre de bactéries par unité de volume. La détection du quorum a lieu si le composé, après avoir atteint un seuil de concentration, s'attache à une certaine protéine régulatoire dans la cellule, ce qui a pour effet d'initier la transcription de gènes spécifiques. Un cas pouvant illustrer la détection du quorum s'observe chez une espèce de calmar, *Euprymna scolopes*, qui chasse de petits poissons la nuit sur les récifs coralliens près de la côte d'Hawaï³². La lueur de la Lune fait en sorte que le calmar jette une ombre qui le rend vulnérable face aux prédateurs. *E. scolopes* a développé, à travers l'évolution, une stratégie de défense sophistiquée qui consiste à émettre une lumière lui permettant de « dissimuler » son ombre avec succès. On a appelé ce genre de camouflage la « contre-illumination », et elle n'est rendue possible qu'à travers la relation symbiotique du calmar avec la bactérie lumineuse appelée *Vibrio fischeri* qui vit dans la cavité palléale du calmar. Vivant de la nourriture produite par le système digestif du calmar, la bactérie émet une lumière d'une intensité et d'une couleur qui sont exactement les mêmes que celles de la lumière de la Lune atteignant le calmar, ce qui empêche les prédateurs de le voir en contreplongée³³.

Le matin venu, les calmars s'ensevelissent dans le sable et excrètent 90-95% de la bactérie, ce qui amène la densité des bactéries restantes bien en deçà du seuil de réaction. La bactérie continue à produire la substance particulière, *N*-acyl homosérine lactone, qui déclenche l'émission de lumière, mais puisque la densité des bactéries est faible, la concentration de cette substance demeure trop basse pour provoquer le déclenchement du gène lumineux en question. Apparemment, le calmar est en plein contrôle du taux de croissance bactérien par l'ajustement de l'apport d'oxygène, et au coucher du soleil la population bactérienne atteint à nouveau le niveau seuil. Lorsque la nuit approche, le calmar s'assure que la densité bactérienne dans sa cavité palléale (et, suivant, la concentration de *N*-acyl homosérine lactones) est suffisamment élevée pour que la bactérie puisse réagir en déclenchant la transcription des gènes de l'opéron lux – ce qui aura pour effet d'initier l'émission de lumière. Ce que je tiens à faire remarquer ici, c'est que l'émergence sémiotique ayant permis à ce système de s'établir graduellement dans le cours de l'évolution a nécessairement requis l'invention de moyens sémiotiques afin d'assurer la stabilité du système, et ces « moyens sémiotiques » sont précisément ce que nous entendons par « causalité descendante ». Mais ici, je n'ai fait qu'effleurer la surface des complexités relatives au fonctionnement des réseaux de communication en montrant la marche de cette interaction symbiotique entre le calmar et la bactérie.

La causalité descendante et l'émergence sémiotique sont donc des aspects certes entrelacés, mais non identiques, d'un même processus. Que ce mécanisme, fondé sur la sémiologie indexicale, soit effectivement couplé aux rythmes circadiens du calmar a été confirmé par l'observation des moyens dont dispose celui-ci pour ajuster précisément le niveau d'émission de la lumière. Il peut par exemple changer la longueur d'onde de la lumière émise à l'aide d'un « filtre

jaune », et il peut faiblir l'intensité de la lumière en ouvrant un sac d'« encre »³⁴. On présume que le processus indexical lui-même est trop lent à prendre effet pour compenser certaines variations momentanées de la lumière d'arrière-plan (telles que sous l'effet d'un couvert nuageux), et que l'évolution a dû fournir au macro-système (le calmar) un certain nombre de « vis supplémentaires » lui permettant d'opérer des ajustements précis.

5. La biosémiotique et Dieu

Au contraire de l'orthodoxie néodarwinienne, la conception de la nature comme animée par l'abondance des signes n'entre pas en contradiction avec le fait que la Terre ait soutenu l'évolution d'être humains conscients dotés de sentiments moraux. La biosémiotique est susceptible de rendre compte de l'avènement de telles créatures à travers des processus naturels immanents. L'approche biosémiotique annule ainsi le besoin, ou la légitimité, des arguments du dessein intelligent. La biosémiotique n'implique pas de posture logique précise quant à l'absence ou la présence d'un créateur transcendantal, mais elle paraît capable d'épargner à la perspective scientifique le besoin d'admettre l'existence d'un tel pouvoir transcendantal, un besoin qui paraît inéluctable pour les tenants de la perspective scientifique traditionnelle. Comme l'ont formulé Deacon et Sherman :

Dans le débat entre la science et le fondamentalisme religieux que les citoyens du monde suivent avec tant d'attention, le fardeau de la preuve repose sur la science : elle doit démontrer comment les processus intentionnels peuvent émerger en l'absence d'intelligence antécédente, de conditions sélectionnées avec soin au préalable ou de composants intrinsèquement téléologiques³⁵.

La tentative, par Deacon et Sherman, de « traquer l'émergence du précurseur de ces relations intentionnelles » est certes fort impressionnante, et bien que leur approche soit parfaitement naturaliste, malheureusement, l'emphase mise sur les théories de la complexité et la sémiotique l'entraîne bien au dehors de l'espace exigu des agentivités causales acceptées dans la perspective scientifique dominante.

L'auteur de cet article demeure agnostique vis-à-vis des questions de transcendance ou de déités immanentes, mais il note qu'un tel agnosticisme aurait été plus difficile à maintenir si ce n'avait été de la solution biosémiotique aux problèmes difficiles de l'intentionnalité naturelle. Puisque dans l'image scientifique classique du monde, supposé régi par des lois naturelles inviolables, seule une déité aurait pu créer des êtres aussi « contre nature » que vous et moi.

Bibliographie

- BRUNI, Louis Emilio, « Cellular Semiotics and Signal Transduction », dans M. Barbieri (dir.), *Introduction to Biosemiotics. The New Biological Synthesis*, Dordrecht, Springer, 2007, p. 365-408.
- CAMPBELL, Donald T., « 'Downward causation' in Hierarchically Organised Biological Systems », dans F. J. Ayala & T. Dobzhansky (dir.), *Studies in the Philosophy of Biology: Reduction and Related Problems*, Berkeley/Los Angeles, University of California Press, 1974, p. 179-186.
- CLAYTON, Philip & Stuart KAUFFMAN, « On emergence, agency, and organization », *Biology and Philosophy*, vol. 21, no 4, 2006, p. 501-521.
- DEACON, Terrence, *The Symbolic Species*, New York, Norton, 1997.
- , « What is missing from theories of information », dans P. C. W. Davies & N. H. Gregersen (dir.), *Information and the Nature of Reality. From Physics to Metaphysics*, Cambridge (G.-B.)/New York, Cambridge University Press, 2010, p. 123-142.
- DEACON, Terrence & Jeremy SHERMAN, « The Pattern Which Connects Pleroma to Creatura: The Autocell Bridge from Physics to Life », dans J. Hoffmeyer (dir.), *A Legacy for Living Systems: Gregory Bateson as Precursor to Biosemiotics*, Dordrecht, Springer, 2008, p. 59-76.
- DEELY, John, *Intentionality and Semiotics: A Story of Mutual Fecundation*, Scranton, University of Scranton Press, 2007.
- DEPEW, David J. & Bruce H. WEBER, *Darwinism Evolving: Systems Dynamics and the Genealogy of Natural Selection*, Cambridge (MA), The MIT Press, 1995.
- GIBBS, W. Wayt, « Cybernetic Cells », *Scientific American*, vol. 285, no 2, 2001, p. 52-57.
- GORDON, Deborah M., « The Development of Organization in an Ant Colony », *American Scientist*, vol. 83, no 1, 1995, p. 50-57.
- GORDON, Deborah, *Ants at Work. How an Insect Society is Organized*, New York, The Free Press, 1999.
- GOULD, Stephen J., *The Structure of Evolutionary Theory*, Cambridge, The Belknap Press of Harvard University Press, 2002.
- GRIFFITHS, Paul E. & Russell D. GRAY, « Developmental Systems and Evolutionary Explanation », *The Journal of Philosophy*, vol. 91, no 6, 1994, p. 277-304.
- HOFFMEYER, Jesper, *Signs of Meaning in the Universe*, Bloomington, Indiana University Press, 1996.
- , « Surfaces Inside Surfaces. On the Origin of Agency and Life », *Cybernetics & Human Knowing*, vol. 5, no 1, 1998, p. 33-42.
- , *Biosemiotics. An Examination into the Signs of Life and the Life of Signs*, Scranton, University of Scranton Press, 2008.

- HOFFMEYER, Jesper & Kalevi KULL, « Baldwin and Biosemiotics: What Intelligence is For », dans B. H. Weber & D. J. Depew (dir.), *Evolution and Learning: The Baldwin Effect Reconsidered*, Cambridge (MA), The MIT Press, 2003, p. 253-272.
- KAUFFMAN, Stuart A., *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*, New York, Oxford University Press, 1993.
- , *Investigations*, New York, Oxford University Press, 2000.
- McFALL-NGAI, Margaret J. & Edward G. RUBY, « Sepioids and Vibrios: When First They Meet », *BioScience*, vol. 48, no 4, 1998, p. 257-265.
- OYAMA, Susan, Paul E. GRIFFITHS & Russell D. GRAY, *Cycles of Contingency. Developmental Systems and Evolution*, Cambridge (MA), MIT Press, 2001.
- SARKAR, Sahotra, « Biological Information: A Skeptical Look at Some Central Dogmas of Molecular Biology », dans S. Sarkar (dir.), *The Philosophy and History of Molecular Biology: New Perspective*, Dordrecht, Kluwer, 1996, p. 187-231.
- SCRIVER, Charles R. & Paula J. WATERS, « Monogenic traits are not simple: lessons from phenylketonuria », *Trends in Genetics*, vol. 15, no 7, 1999, p. 267-272.
- ULANOWICZ, Robert E., *A Third Window: Natural Foundations for Life*, Philadelphia, Templeton Foundation Press, 2009.
- WILSON, Edward O., *Sociobiology. The New Synthesis*, London, Belknap Press, 1975.

Notes

- 1 D. J. DEPEW & B. H. WEBER, *Darwinism Evolving: Systems Dynamics and the Genealogy of Natural Selection*, Cambridge (MA), The MIT Press, 1995 ; S. J. GOULD, *The Structure of Evolutionary Theory*, Cambridge, The Belknap Press of Harvard University Press, 2002.
- 2 S. SARKAR, « Biological Information: A Skeptical Look at Some Central Dogmas of Molecular Biology », dans S. Sarkar (dir.), *The Philosophy and History of Molecular Biology: New Perspective*, Dordrecht, Kluwer, 1996, p. 187-231.
- 3 L'écologie a développé un candidat prometteur en vue de fonder une définition du concept d'information qui soit à la fois rigoureuse et utile à la biologie : l'« information mutuelle moyenne ». Il s'agit d'une équation permettant de mesurer à quel point une configuration de relations écologiques donnée apparaît organisée ou déterminée. Le théoricien de l'écologie Robert Ulanowicz a tiré ce concept du côté de ce qu'il appelle l'*ascendance*, qui représente « le pouvoir qu'un système peut arriver à soutenir de manière cohérente en s'organisant lui-même et le monde qui l'entoure avec lui ».
- 4 T. DEACON, « What is missing from theories of information », dans P. C. W. Davies & N. H. Gregersen (dir.), *Information and the Nature of Reality. From Physics to Metaphysics*, Cambridge (G.-B.)/New York, Cambridge University Press, 2010, p. 123-142.
- 5 P. E. GRIFFITHS & R. D. GRAY, « Developmental Systems and Evolutionary Explanation », *The Journal of Philosophy*, vol. 91, no 6, 1994, p. 277-304 ; S. OYAMA, P. E. GRIFFITHS & R. D. GRAY, *Cycles of Contingency. Developmental Systems and Evolution*, Cambridge (MA), MIT Press, 2001.
- 6 C. R. SCRIVER & P. J. WATERS, « Monogenic traits are not simple: lessons from phenylketonuria », *Trends in Genetics*, vol. 15, no 7, 1999, p. 267-272.
- 7 Sémiologie = l'activité des signes. Sémiotique = la science qui étudie l'activité des signes.
- 8 Cela dit, à l'intérieur d'un théâtre, la fumée pourrait bien n'être qu'un artifice. La sémiotique, comme l'a dit un jour Umberto Eco, est la science du mensonge.
- 9 S. A. KAUFFMAN, *Investigations*, New York, Oxford University Press, 2000, p. 152.
- 10 P. CLAYTON & S. KAUFFMAN, « On emergence, agency, and organization », *Biology and Philosophy*, vol. 21, no 4, 2006, p. 501-521, spéc. 504.
- 11 Dans le plus simple des cas, la dynamique intentionnelle de la directionnalité se manifeste par la fertilité.
- 12 N.D.T. : la tradition veut que « *to strive* » soit traduit en français par « lutter ». L'auteur souhaitant pour sa part mettre l'accent sur l'autre acception que possède le verbe anglais, relative à l'effort dirigé en fonction d'un but (qui lui paraît mieux correspondre à l'intention de Darwin), un choix de traduction s'est imposé suivant sa volonté.
- 13 P. CLAYTON & S. KAUFFMAN, « On emergence, agency, and organization », *loc. cit.*, p. 505.
- 14 T. DEACON & J. SHERMAN, « The Pattern Which Connects Pleroma to Creatura: The Autocell Bridge from Physics to Life », dans J. Hoffmeyer (dir.), *A Legacy for Living Systems: Gregory Bateson as Precursor to Biosemiotics*, Dordrecht, Springer, 2008, p. 59-76.
- 15 J. HOFFMEYER, « Surfaces Inside Surfaces. On the Origin of Agency and Life », *Cybernetics & Human Knowing*, vol. 5, no 1, 1998, p. 33-42, spéc. 35.
- 16 S. A. KAUFFMAN, *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*, New York, Oxford University Press, 1993.
- 17 J. HOFFMEYER, « Surfaces Inside Surfaces. On the Origin of Agency and Life », *loc. cit.*
- 18 À nouveau, j'emploie ici un langage téléologique. L'idée n'est pas, bien sûr, que la bactérie fait un choix conscient, mais seulement qu'elle favorise systématiquement une réponse distincte parmi plusieurs comportements également possibles. S'il m'est opposé que cette « préférence »

ne peut constituer une véritable « préférence » ou un véritable « choix » parce que la bactérie n'aurait en aucun cas pu réagir autrement que de la manière dont elle l'a fait, je soutiendrai que : (1) considérée en tant qu'espèce évolutive, la bactérie a bel et bien le choix, au sens où elle aurait pu évoluer différemment ; et (2) même les cellules bactériennes prises individuellement sont des systèmes complexes qui manifestent un comportement véritablement imprévisible (chaotique) et, à vrai dire, des cellules mutantes pourraient s'être comporté différemment dans la même situation. Remarquons ici que l'idée d'une bactérie originale, de « type sauvage », a maintenant été abandonnée : toutes les cellules bactériennes sont donc « mutantes » ou « normales », suivant la manière dont le contexte est défini.

- 19 Cité dans W. W. GIBBS, « Cybernetic Cells », *Scientific American*, vol. 285, no 2, 2001, p. 52-57, spéc. 53.
- 20 J. HOFFMEYER, *Signs of Meaning in the Universe*, Bloomington, Indiana University Press, 1996.
- 21 J. HOFFMEYER & K. KULL, « Baldwin and biosemiotics: What intelligence is for », dans B. H. Weber & D. J. Depew (dir.), *Evolution and Learning: The Baldwin Effect Reconsidered*, Cambridge (MA), The MIT Press, 2003, p. 253-272.
- 22 T. DEACON, *The Symbolic Species*, New York, Norton, 1997.
- 23 J. DEELY, *Intentionality and Semiotics: A Story of Mutual Fecundation*, Scranton, University of Scranton Press, 2007.
- 24 D. T. CAMPBELL, « 'Downward causation' in Hierarchically Organised Biological Systems », dans F. J. Ayala & T. Dobzhansky (dir.), *Studies in the Philosophy of Biology: Reduction and Related Problems*, Berkeley/Los Angeles, University of California Press, 1974, p. 179-186.
- 25 D. M. GORDON, « The Development of Organization in an Ant Colony », *American Scientist*, vol. 83, no 1, 1995, p. 50-57 ; D. GORDON, *Ants at Work. How an Insect Society is Organized*, New York, The Free Press, 1999.
- 26 J. HOFFMEYER, *Biosemiotics. An Examination into the Signs of Life and the Life of Signs*, Scranton, University of Scranton Press, 2008.
- 27 D. GORDON, *Ants at Work*, *op. cit.*, p. 139.
- 28 E. O. WILSON, *Sociobiology. The New Synthesis*, London, Belknap Press, 1975.
- 29 D. GORDON, *Ants at Work*, *op. cit.*, p. 97.
- 30 *Ibid.*, p. 96.
- 31 J. HOFFMEYER, *Biosemiotics*, *op. cit.*
- 32 Pour une description détaillée des considérations sémiotiques liées à ce cas, voir L. E. BRUNI, « Cellular Semiotics and Signal Transduction », dans M. Barbieri (dir.), *Introduction to Biosemiotics. The New Biological Synthesis*, Dordrecht, Springer, 2007, p. 365-408 ; J. HOFFMEYER, *Biosemiotics*, *op. cit.*
- 33 M. J. McFALL-NGAI & E. G. RUBY, « Sepioids and Vibrios: When First They Meet », *BioScience*, vol. 48, no 4, 1998, p. 257-265.
- 34 L. E. BRUNI, « Cellular Semiotics and Signal Transduction », *loc. cit.*
- 35 T. DEACON & J. SHERMAN, « The Pattern Which Connects Pleroma to Creatura: The Autocell Bridge from Physics to Life », *loc. cit.*, p. 63.

