

L'approche organisationnelle des fonctions est-elle trop restrictive ?

CATHERINE RIOUX, *Université Laval*

Résumé

L'approche organisationnelle des fonctions (ou AOF) a récemment été introduite dans le débat sur les attributions fonctionnelles. Elle prétend naturaliser les dimensions téléologique et normative du concept de fonction, tout en échappant à plusieurs critiques ayant été faites aux théories concurrentes des fonctions. Cependant, il peut sembler que l'AOF soit trop restrictive. C'est qu'elle paraît proscrire l'attribution fonctionnelle aux traits reproductifs, car ceux-ci ne contribuent pas au maintien de l'organisme, ainsi qu'à certaines bactéries qui composent notre microbiome, car celles-ci sont maintenues, mais non produites, sous des conditions déterminées par l'organisme. Je soutiens que l'approche organisationnelle dispose des ressources théoriques nécessaires pour rendre compte des attributions fonctionnelles concernant les traits reproductifs. Toutefois, je crois que le « cas des bactéries » constitue un problème plus difficile pour l'approche organisationnelle, qui ne peut être réglé qu'au prix d'un réaménagement théorique assez substantiel.

1. Introduction

La variété des attributions fonctionnelles en biologie est remarquable. En effet, seulement en deçà du niveau organismique, les biologistes reconnaissent des fonctions à un ensemble hétéroclite de structures, qui inclut des systèmes, des organes, des cellules, des molécules et même des atomes¹. Les recherches philosophiques sur la notion biologique de fonction, qui visent à isoler les attributions fonctionnelles légitimes, essaient de tenir compte de cette diversité. De plus, pour défendre le caractère scientifique du concept de fonction, elles tentent de naturaliser les dimensions normative et téléologique des attributions fonctionnelles.

Depuis les cinq dernières années, une nouvelle théorie

philosophique des fonctions biologiques a été développée, principalement par Matteo Mossio, Cristian Saborido et Alvaro Moreno². Il s'agit de l'approche organisationnelle des fonctions, ou AOF. Cette théorie semble séduisante, car elle parvient non seulement à naturaliser le caractère normatif et téléologique de la notion de fonction, mais aussi à échapper à certaines objections soulevées contre les approches étiologiques et systémiques. L'AOF affirme qu'une entité a une fonction au sein d'un système (comme l'organisme humain) si et seulement si : C1) Cette entité contribue au maintien du système dont elle fait partie, C2) Cette entité est produite et maintenue sous des conditions établies par le système, C3) Des entités contribuant de façon différenciée au maintien du système sont produites et maintenues sous des conditions définies par le système.

Il peut sembler que les conditions C1) et C2) rendent la théorie organisationnelle trop peu libérale. C'est qu'elles ont l'air d'exclure du domaine des attributions fonctionnelles légitimes des entités qui sont largement reconnues comme ayant une fonction selon une perspective scientifique. En effet, il semble que C1) proscrive l'attribution de fonctions aux traits reproductifs, qui ne paraissent pas contribuer au maintien du système qui les produit, mais plutôt à la production d'un autre système. La condition C2), elle, nie que des fonctions puissent être attribuées aux bactéries présentes chez l'organisme humain, car plusieurs bactéries ne sont pas produites sous des conditions générées par l'organisme, mais le colonisent de l'extérieur.

Je crois que l'objection concernant les traits reproductifs n'est pas fondée et que l'approche organisationnelle des fonctions a les ressources théoriques pour la réfuter. Cependant, je soutiendrai que l'attribution de fonctions aux bactéries constitue un contre-exemple important à l'AOF, qui pourrait être intégré seulement en modifiant C2). Pour étayer cette thèse, je présenterai d'abord l'AOF et j'en exposerai les principales vertus théoriques. Ensuite, je ferai voir qu'en comprenant C1) et C2) dans une perspective temporelle, il devient manifeste que l'AOF peut reconnaître des fonctions aux traits reproductifs. Alors, je montrerai que la condition C2), en tant que *conjonction* de la production et du maintien sous des conditions

définies par le système, pourrait, en réponse au cas des bactéries, être définie seulement par le maintien.

2. Le défi de la théorie organisationnelle

Il est généralement admis que la naturalisation des dimensions téléologiques et normatives de la notion de fonction est un *desideratum* que doit satisfaire toute théorie des attributions fonctionnelles. C'est que le caractère téléologique et normatif des fonctions en biologie et dans les sciences de la vie en général semble placer ces disciplines à l'écart des autres sciences, qui ne font pas appel à la normativité et à la téléologie dans leurs explications.

Le concept de fonction est un concept téléologique, car il implique une sorte de causalité inversée. En effet, l'existence d'un trait³ fonctionnel semble pouvoir être expliquée par les effets de ce trait et ce, contrairement à ce qui prévaut habituellement dans les sciences naturelles, qui expliquent les effets par les causes. Par exemple, si l'on affirme que « la fonction du cœur est de pomper le sang », on semble vouloir signifier que le cœur est là parce qu'il pompe le sang. De telles explications téléologiques sont acceptables dans le contexte de l'étude de l'action intentionnelle. Mais pour montrer qu'elles le sont aussi dans le contexte biologique, une théorie des fonctions doit être développée. Par ailleurs, le concept de fonction est un concept normatif, car il dépasse la causalité efficiente classique en référant à des effets que les traits sont censés produire. Ainsi, attribuer une fonction à un trait revient à prendre un effet spécifique que ce trait peut provoquer comme critère d'évaluation de ce trait. Si la fonction du cœur est de pomper le sang, alors un cœur qui ne pompe pas le sang fonctionne mal. Une théorie des fonctions doit expliquer comment une telle normativité peut émerger dans le monde physique.

Mossio, Saborido et Moreno soutiennent que les théories étiologiques et systémiques des fonctions connaissent des difficultés considérables, voire insurmontables, malgré qu'elles parviennent toutes deux à résoudre le problème de la téléologie et celui de la normativité. C'est pourquoi ils plaident pour l'adoption d'une nouvelle théorie des fonctions, l'approche organisationnelle, qui aura

les vertus théoriques des approches concurrentes sans leurs défauts⁴.

La théorie systémique⁵ évacue la téléologie de sa caractérisation des fonctions. Selon celle-ci, dire d'un trait T qu'il a une fonction F dans le système S revient à attribuer à T une capacité, dont l'exercice joue un rôle causal dans l'émergence d'une capacité globale du système S dont T fait partie. Ainsi, le trait fonctionnel systémique ne doit pas son existence à la fonction qu'il réalise : un trait T a une fonction F du moment qu'il contribue à l'émergence d'une capacité du système, et ce n'est pas nécessairement à cause de cette contribution causale que T existe. La dimension normative des fonctions, elle, est réduite à la contrainte selon laquelle l'effet causal d'un trait doit contribuer à l'instanciation d'une capacité du système⁶.

La théorie étiologique, plus particulièrement la « selected effect theory » de Neander, a développé un concept de fonction clairement téléologique. Selon la « selected effect theory », la fonction d'un trait est de produire les effets pour lesquels il a été sélectionné (selon le processus de sélection naturelle). La dimension téléologique des fonctions est ainsi naturalisée, car l'existence d'un trait s'explique par le fait que ses effets ont conféré un avantage adaptatif à ses porteurs. De plus, la normativité des fonctions est considérée : les traits fonctionnels sont supposés produire les effets pour lesquels ils ont été sélectionnés⁷.

Selon Mossio, Saborido et Moreno, le problème principal de la théorie systémique, c'est qu'elle est trop libérale, parce que : 1) elle permet apparemment l'attribution de fonctions à des parties de systèmes qui ne sont pas intuitivement des systèmes fonctionnels, 2) elle ne permet pas de distinguer les contributions fonctionnelles des effets dysfonctionnels et 3) elle ne permet pas de distinguer les fonctions des « effets secondaires »⁸. La théorie étiologique, elle, est confrontée à la menace de l'« épiphénomalisme ». C'est que dans la perspective étiologique, les attributions fonctionnelles ne révèlent rien à propos de l'organisation actuelle du système analysé, c.-à-d. à propos du « phénomène » observé : elles sont entièrement déterminées par l'histoire évolutive⁹.

Selon Mossio, Saborido et Moreno, la reconnaissance des avantages et inconvénients respectifs des théories systémiques et

étiologiques ne doit pas nous mener à l'adoption d'un pluralisme quant à la notion de fonction. Bien plutôt, Mossio et ses collègues croient pouvoir développer une théorie unifiée des fonctions¹⁰. Celle-ci ancre les dimensions normatives et téléologiques du concept de fonction dans une propriété actuelle des systèmes biologiques, échappant ainsi à la critique épiphénoménaliste qui mine la théorie étiologique. La propriété des systèmes biologiques qui permet la génération de la normativité et de la téléologie est l'auto-maintien. Cependant, les systèmes par rapport auxquels les attributions fonctionnelles sont pertinentes ne sont pas qu'auto-maintenus : ils sont aussi organisationnellement différenciés. Comme ce ne sont pas tous les systèmes qui possèdent ces propriétés, nous n'avons pas à craindre que la théorie organisationnelle ne soit trop libérale (comme l'est possiblement la théorie systémique).

3. Auto-maintien, normativité et téléologie

Le concept organisationnel de fonction repose sur l'existence d'une classe de systèmes, les systèmes auto-maintenus, dont l'activité vise leur propre préservation et leur propre cohérence en tant que systèmes. Les systèmes auto-maintenus constituent un phénomène répandu dans la nature. Ils ont d'ailleurs été décrits par plusieurs physiciens, chimistes et biologistes depuis les quarante dernières années. Les structures dissipatives constituent des systèmes auto-maintenus élémentaires. Une structure dissipative est un système dans lequel un grand nombre d'éléments microscopiques adopte un patron macroscopique, en présence d'un flux spécifique de matière et d'énergie, dans des conditions éloignées de l'équilibre thermodynamique. En retour, le patron macroscopique exerce une contrainte sur l'activité des éléments microscopiques (activité qui est nécessaire pour que le patron macro soit engendré), en maintenant des conditions éloignées de l'équilibre thermodynamique. C'est ainsi que la structure dissipative s'auto-maintient¹¹.

Notons que la flamme est une structure dissipative. Dans ce système, les réactions microscopiques de combustion génèrent un patron macroscopique (la flamme elle-même). La flamme, en échange, contribue au maintien de conditions éloignées de l'équilibre

thermodynamique, qui sont requises pour l'existence des réactions microscopiques. Par exemple, la flamme garde la température au-dessus du seuil de combustion, vaporise la cire, etc. De cette façon, la flamme préserve les conditions nécessaires pour sa propre existence en tant que flamme. Autrement dit, elle s'auto-maintient¹².

De nombreux systèmes physiques et chimiques, tels que les tornades et les ouragans, peuvent aussi être décrits comme étant auto-maintenus¹³. Par conséquent, tous ces systèmes sont organisationnellement clos. Cela signifie qu'il existe une relation causale circulaire liant le patron macroscopique ou la structure de ces systèmes et leurs dynamiques microscopiques¹⁴. Selon Mossio, Saborido et Moreno, les systèmes biologiques constituent des paradigmes d'organisations closes et extrêmement complexes. C'est que les systèmes biologiques paraissent contribuer de différentes manières à préserver un échange constant de matière et d'énergie avec leur environnement. En retour, cela leur permet de maintenir leur organisation constitutive.

Pour les partisans de l'approche organisationnelle des fonctions, les attributions fonctionnelles effectuées relativement à des systèmes organisationnellement clos font état de la normativité et de la téléologie caractéristiques du concept de fonction. En effet, l'auto-maintien (ou la clôture organisationnelle) justifie le fait d'expliquer l'existence d'une structure en se référant aux effets de cette structure. Relativement à un système organisationnellement clos, il est donc juste de dire que la structure X existe parce qu'elle fait Y. C'est que Y contribue au maintien de l'organisation du système. En retour, l'organisation du système établit les conditions qui sont requises pour l'existence de X. De plus, la normativité est ancrée dans la propriété de clôture, car la clôture implique que l'existence d'un système et de ses composantes dépend de l'activité de ce système. Ce qu'une composante d'un système auto-maintenu est « censée » faire, c'est de travailler pour préserver sa propre existence. Autrement dit, comme l'expliquent Mossio, Saborido et Moreno, « the activity of the system becomes its own norm¹⁵ ».

Bref, selon l'AOF, étant donné que les systèmes fonctionnels sont auto-maintenus, une structure doit remplir les deux conditions

suivantes pour avoir une fonction : C1) elle doit contribuer au maintien de l'organisation du système dont elle fait partie, C2) elle doit être produite et maintenue sous des contraintes déterminées par le système¹⁶. En vertu de la clôture, la téléologie et la normativité relatives à la fonction d'une telle structure sont acceptables d'un point de vue naturaliste.

4. La différenciation organisationnelle, pour réduire l'applicabilité de l'AOF

Pour Mossio, Saborido et Moreno, la clôture constitue une condition nécessaire, bien que non suffisante, pour fonder les attributions fonctionnelles. C'est qu'il existe des systèmes par rapport auxquels il ne semble pas pertinent de reconnaître des fonctions, même si ceux-ci sont organisationnellement clos. Les structures dissipatives sont de tels systèmes. En effet, il nous apparaît que les composantes matérielles de la flamme, par exemple, sont dépourvues de fonctions, parce qu'elles font toutes la même chose : elles contribuent à générer le patron macroscopique, *via* les micro réactions de combustion. En vérité, pour les défenseurs de l'AOF, une structure a une fonction si et seulement si elle fournit un apport spécifique au maintien de l'organisation globale ; en un mot, si et seulement si il y a différenciation organisationnelle du système dont elle fait partie¹⁷. Ainsi, il ne faut pas confondre la différenciation organisationnelle avec la complexité matérielle. Une structure dissipative, comme la flamme, peut à la fois être auto-maintenue et posséder des composantes matérielles variées sans qu'elle ne soit organisationnellement différenciée et propice aux attributions fonctionnelles.

Il existe donc une troisième condition, C3), selon laquelle un trait a une fonction dans un système S si et seulement si S est organisationnellement différencié. Cette condition limite manifestement la portée de l'AOF, qui semble beaucoup moins libérale que si elle n'était définie que par la conjonction de C1) et de C2). En ce sens, l'AOF semble indifférente aux critiques faites à la théorie systémique. Par exemple, Mossio, Saborido et Moreno soutiennent que leur théorie, contrairement à ce qu'entraîne

apparemment la théorie systémique, proscrire entre autres les attributions de fonctions aux composantes du cycle de l'eau. C'est qu'il n'y a pas de différenciation organisationnelle au sein de ce système, dont les parties contribuent toutes de la même façon au maintien de l'organisation globale¹⁸.

L'AOF peut être adoptée pour décrire les fonctions de systèmes non-vivants, systèmes dont les composantes pourraient possiblement remplir C1), C2) et C3), mais cette application n'a pas encore été faite par les défenseurs de la théorie¹⁹. En réalité, ceux qui proposent l'AOF soutiennent que tous les systèmes organisationnellement clos et différenciés qui ont été découverts à ce jour sont des systèmes vivants. Le métabolisme des organismes vivants constitue l'un des exemples les plus éloquentes de tels systèmes. Celui-ci est un système auto-entretenu, car il est défini comme un réseau de relations régulées par les enzymes, qui elles, sont régénérées par le même réseau qu'elles contribuent à réguler. Le système métabolique est aussi organisationnellement différencié, car il comporte des mécanismes de régulation qui sont temporellement découplés et qui contribuent de façon spécifique à sa préservation²⁰. Le métabolisme cellulaire, par lequel la cellule transforme les nutriments, est un autre exemple important de système auto-entretenu et organisationnellement différencié²¹.

Enfin, on peut appliquer C1), C2) et C3) pour identifier la fonction de traits (structures ou processus) des organismes vivants, tels que l'humain, car ces organismes sont des systèmes clos et différenciés. Par exemple, selon l'AOF, si nous pouvons affirmer que le cœur humain a la fonction de pomper le sang, c'est que, suivant C1), le cœur contribue au maintien de l'organisme, en permettant la circulation du sang, qui elle, fait entre autres affluer les nutriments aux cellules. De plus, en conformité avec C2), le cœur est produit et maintenu sous des conditions définies par l'organisme humain. Il y a production sous de telles conditions, car le cœur n'apparaît qu'au sein de l'organisme humain. Il y a aussi maintien sous des conditions établies par l'organisme, car il faut que ce dernier conserve son intégrité globale pour que le cœur continue de fonctionner²². Enfin, il est manifeste que l'organisme humain est différencié, car, au cours

son développement, sont produites et maintenues des structures qui contribuent de manière spécifique à sa perpétuation.

Bref, un examen sommaire de l'AOF semble indiquer qu'elle relève le défi théorique qu'elle s'est donnée, soit celui d'ancrer la normativité et la téléologie propres au concept de fonction dans les propriétés actuelles des systèmes fonctionnels. Elle se soustrait ainsi à l'objection de l'épiphénoménalisme qui mine la théorie étiologique. Par ailleurs, en exigeant des systèmes fonctionnels qu'ils soient non seulement auto-maintenus, mais aussi organisationnellement différenciés, l'AOF restreint le champ des attributions fonctionnelles et ce, possiblement davantage que ne le fait la théorie systémique. Mais, en vérité, l'AOF est-elle trop restrictive ?

5. Le faux problème des traits reproductifs

Dès la parution des premiers articles sur la théorie organisationnelle, Mossio, Saborido et Moreno semblent être conscients du fait que les traits reproductifs ont l'air de constituer un contre-exemple de taille à leur théorie²³. C'est que les traits reproductifs paraissent contrevenir à la condition C1), qui prescrit qu'un trait doit contribuer au maintien du système dont il fait partie pour avoir une fonction. En fait, les traits reproductifs ont l'air de contribuer à la production d'un autre système auto-maintenu, la progéniture. Or, cela ne constitue pas une forme d'auto-maintien. Dès 2009, Mossio, Saborido et Moreno remarquent qu'il y a une alternative à soutenir que les traits reproductifs n'ont pas de fonctions. Ils recommandent de se rapporter aux systèmes du second-ordre, qui sont des systèmes de systèmes, composés de différents organismes, pour reconnaître des fonctions aux traits reproductifs²⁴. Comme je vais le montrer, cette solution n'est satisfaisante que sous certaines conditions.

Mais tout d'abord, il faut voir que l'AOF ne peut pas se permettre de nier une fonction aux traits reproductifs, en refusant par exemple de reconnaître que la fonction du sperme est d'inséminer l'ovule. Cela serait en décalage complet avec les connaissances actuelles concernant la biologie des systèmes reproductifs. En réalité, les théories concurrentes des fonctions paraissent mieux placées que

l'approche organisationnelle pour traiter des traits reproductifs. La théorie étiologique de Neander, par exemple, permet d'accorder des fonctions aux traits reproductifs, car ces traits semblent avoir été sélectionnés pour produire certains effets liés à la reproduction et sont donc avantageux d'un point de vue adaptatif. Les effets liés à la reproduction constituent les fonctions des traits reproductifs. Les théories systémiques, elles, peuvent reconnaître des fonctions aux traits reproductifs, pourvu que ces traits aient un rôle causal dans l'émergence d'une capacité globale du système dont ils font partie. Cette capacité peut être la reproduction.

Pour surmonter les limitations apparemment associées à la théorie organisationnelle, nous ne pouvons pas en appeler aux écosystèmes en tant que systèmes de niveau supérieur. D'emblée, il apparaît effectivement que les traits reproductifs pourraient possiblement être soumis à la clôture organisationnelle dans ces systèmes de systèmes auto-maintenus. En effet, les écosystèmes, en tant que réseaux d'interactions entre les organismes, déterminent les conditions sous lesquelles les individus sont produits et maintenus. Plus précisément, il semble que nous puissions attribuer des fonctions, telles que la régulation de l'air et de l'eau, aux différentes composantes d'un écosystème, si l'activité de ces composantes, maintenues sous des conditions établies par l'écosystème, permet aussi le maintien de ce dernier²⁵.

Toutefois, comme l'expliquent Saborido, Mossio et Moreno, même si l'on parvenait à formuler une théorie qui ferait des écosystèmes des systèmes auto-maintenus d'ordre supérieur, il demeure que l'appel à de tels systèmes d'ordre supérieur ne nous permettrait pas de régler le problème que posent les traits reproductifs pour l'approche organisationnelle²⁶. C'est que le fait de s'en remettre aux systèmes du second-ordre pour déterminer les fonctions des traits reproductifs ne correspond pas à nos *pratiques explicatives*. Par exemple, quand nous affirmons que la fonction du sperme est d'inséminer l'ovule, nous n'avons pas en tête la contribution du sperme quant au maintien de l'écosystème. Aux yeux des défenseurs de l'AOF, le développement d'une théorie organisationnelle des écosystèmes est donc non pertinent pour fonder les attributions

fonctionnelles relatives aux traits reproductifs.

Cependant, selon Saborido, Mossio et Moreno, il y a une classe de systèmes du second-ordre, soit les systèmes « englobants » (« encompassing systems »)²⁷, qui permet de fonder les attributions fonctionnelles relatives aux traits reproductifs. Les systèmes englobants incluent uniquement le système qui se reproduit et sa progéniture. Une fois que l'on a affiné notre compréhension de ce qu'est l'auto-maintien, il ne semble pas problématique d'utiliser ces systèmes comme points de référence pour reconnaître des fonctions aux traits reproductifs.

L'auto-maintien se produit et se remarque dans le temps. Ainsi, ce n'est qu'à travers le temps que les traits reproductifs, tout comme n'importe quels autres traits des organismes, contribuent à maintenir l'organisation dont ils font partie. Il y a des traits qui sont vus comme étant sous clôture organisationnelle en très peu de temps, comme c'est le cas du poumon. Par exemple, nous pouvons réaliser la contribution du poumon au maintien de l'organisme humain très rapidement, étant donné que l'on ne peut arrêter de respirer que quelques secondes. L'estomac, lui, nous apparaît comme étant soumis à la clôture après une observation un peu plus longue, car nous pouvons arrêter de manger pour quelques jours²⁸. Dans le cas des traits reproductifs, la clôture se remarque sur un temps encore plus long, car la persistance temporelle de l'organisation auto-maintenue, qui est réalisée par la conjonction de l'organisme qui se reproduit et de sa progéniture, dépasse la durée de vie de l'organisme individuel²⁹. En effet, le sperme qui insémine l'ovule contribue au maintien de l'organisation englobante, car il permet la production d'un nouvel organisme, qui remplacera éventuellement l'organisme s'étant reproduit. Inversement, l'organisation englobante exerce différentes contraintes sous lesquelles le sperme est produit et maintenu.

Toutefois, on pourrait croire que le système constitué par un organisme (S1) et sa progéniture (S2) n'est pas le même système que celui constitué par le parent de cet organisme (S0) et (S1). Les défenseurs de l'AOF croient que ce problème ne se pose pas, car ils se rapportent à ce qui se produit lors de l'auto-maintien d'organismes

individuels. Chez les organismes individuels, il y a auto-maintien dans le temps malgré le remplacement des composantes matérielles. Effectivement, bien que les organismes individuels changent constamment, notamment au cours de leur développement, nous ne soutenons pas que les instances S1 et S2 d'un système S n'appartiennent pas au même type d'organisation. Selon Saborido, Mossio et Moreno, S1 et S2 sont deux instanciation du même type de système, pourvu qu'il y ait un lien de « causalité matérielle » qui unit S1 et S2, c.-à-d. pourvu que S2 ait hérité son organisation matérielle de S1³⁰. Cette condition est clairement remplie chez les systèmes englobants, car, dans la perspective de Saborido, Mossio et Moreno, quand il y a reproduction, il n'y a pas seulement copie de la forme, mais transfert de matière³¹.

Il est vrai qu'à première vue, l'appel aux systèmes englobants, comme l'appel aux écosystèmes, ne semble pas s'accorder avec nos pratiques explicatives. Lorsque nous attribuons des fonctions aux traits reproductifs, nous ne paraissons pas toujours avoir en tête leurs contributions au maintien de systèmes englobants. Cependant, Saborido, Mossio et Moreno écartent cette objection en rappelant les exigences liées à l'explication des fonctions des traits reproductifs. Certaines formes de clôture organisationnelle, comme celle qui caractérise les traits reproductifs, se remarquent sur un temps plus long. Lorsque l'on s'intéresse à la fonction des traits reproductifs, il faut donc délaissier l'organisme individuel, qui a une durée de vie assez limitée, en tant que système par excellence pour les attributions fonctionnelles. En clair, le fait de considérer les organismes individuels ou la conjonction de parents et de progénitures est seulement une question de « focalisation », qui dépend des buts de l'explication³².

6. Le cas des bactéries : pierre d'achoppement de la théorie organisationnelle

Selon moi, le « problème difficile » pour l'AOF ne concerne pas les traits reproductifs, mais les bactéries. Conformément à la théorie organisationnelle des fonctions, bien des bactéries semblent être dépourvues de fonction au sein de notre organisme, car elles

ne remplissent pas la condition C2), que je comprends comme une conjonction. C2) prescrit qu'un trait fonctionnel doit être à la fois maintenu *et* produit sous des conditions définies par le système dont il fait partie³³. Or, plusieurs bactéries, si elles semblent effectivement maintenues par l'organisme qui les accueille, ne paraissent pas produites sous des conditions générées par cet organisme, qu'elles colonisent de l'extérieur dès la naissance³⁴. Comme je vais le montrer, les bactéries sont en ce sens analogues à l'oxygène, que la théorie organisationnelle traite comme une entité utile, mais non fonctionnelle. La distinction, concernant C1), entre « contribuer au maintien » et « être indispensable au maintien »³⁵, sera aussi mobilisée pour démontrer que, dans la perspective organisationnelle, des entités utiles, comme les bactéries, peuvent être indispensables au maintien d'un système, sans toutefois que l'indispensabilité n'implique la fonctionnalité. Enfin, je soutiens que l'AOF peut contourner le problème des bactéries en « assouplissant » la condition C2), de sorte que celle-ci ne soit définie que par le maintien, et non par la conjonction du maintien et de la production. Je ferai voir que ce changement ne rendrait pas l'AOF plus inclusive qu'elle ne l'est actuellement, hormis en ce qui concerne les bactéries.

Les bactéries et l'organisme humain peuvent entrer dans une gamme étendue de relations, qui va du mutualisme (incluant la symbiose et le commensalisme) à la pathogénie³⁶. Je ne traiterai pas des bactéries pathogènes, car il est évident qu'elles n'ont pas de fonction organisationnelle, étant donné qu'elles ne remplissent pas C1)³⁷. Je me concentrerai sur la relation unissant les bactéries présentes dans l'intestin humain (notre microbiome intestinal) et l'organisme humain qui, bien qu'elle puisse être pathogène, constitue aussi un exemple frappant de symbiose. La symbiose est définie comme une relation dont au moins un partenaire bénéficie sans nuire à l'autre³⁸. Lorsqu'il y a symbiose, à la fois l'organisme humain et les bactéries occupant l'intestin bénéficient de leurs interactions mutuelles. Par exemple, les bactéries de l'intestin peuvent conférer plusieurs bénéfices nutritionnels à l'organisme³⁹ : elles contribuent à l'absorption des lipides et des hydrates de carbone, régulent le stockage de lipides, contribuent à la production de la vitamine K et à

l'absorption du fer, etc. De cette façon, les bactéries peuvent remplir la condition C1) : elles contribuent au maintien de l'organisme. En réalité, le microbiome intestinal est tellement important pour notre santé que certains auteurs l'ont décrit comme « un organe dans un organe⁴⁰ ». En retour, les bactéries de l'intestin sont maintenues par l'organisme : elles ont besoin d'un environnement particulier, soit l'intestin, pour survivre. D'ailleurs, les bactéries « pionnières », qui sont les premières à coloniser l'intestin après la naissance, peuvent possiblement modifier l'expression génétique chez l'hôte pour créer un environnement leur étant adapté, en empêchant par exemple la croissance de bactéries introduites plus tard dans l'intestin⁴¹.

Je viens tout juste d'indiquer le nœud du problème : de nombreuses bactéries, en particulier les bactéries « pionnières », ne sont pas produites sous des conditions déterminées par l'organisme. Il faut savoir que la colonisation bactériale de l'intestin débute dès la naissance, par les aérobies facultatives que sont les streptocoques et les *Escherichia coli*, et se poursuit ensuite (après le sevrage), avec les anaérobies obligées (« obligate anaerobes »), en particulier les espèces bactéroïdes⁴². Bien sûr, étant donné que les bactéries se reproduisent, il y a beaucoup de bactéries qui sont produites sous des conditions établies par l'organisme. Cependant, ce n'est pas le cas de nombreuses bactéries, qui colonisent l'organisme de l'extérieur.

Par conséquent, dans la perspective organisationnelle, plusieurs bactéries sont des entités utiles, mais non fonctionnelles. Ainsi, elles sont analogues à l'oxygène, la nourriture et la gravité. Comme l'expliquent Saborido, Mossio et Moreno : « An entity is useful if it contributes to the maintenance of an organizationally closed and differentiated system, without being produced under some constraint generated by the system⁴³ ». On voit ici que la clause C2) permet d'éviter que l'AOF ne légitime l'attribution de fonctions à des entités, comme la gravité, auxquelles les biologistes ne reconnaissent pas de fonctions. Cependant, dans sa formulation actuelle, C2) exclut non seulement la gravité du champ des attributions fonctionnelles, mais aussi beaucoup de bactéries, auxquelles la vaste majorité des biologistes reconnaissent pourtant des fonctions, de même que l'oxygène, que certains considèrent comme une entité fonctionnelle⁴⁴.

Conséquemment, l'AOF paraît moins inclusive que les théories systémiques et étiologiques. Les théories systémiques, que certains ont qualifiées de trop libérales, pourraient permettre que des fonctions soient reconnues à l'oxygène et aux bactéries au sein de l'organisme humain. En vérité, la seule restriction que pose la théorie systémique classique pour limiter les attributions fonctionnelles est que les traits fonctionnels aient une capacité dont l'exercice contribue à l'émergence d'une capacité globale du système dont ils font partie. L'oxygène pourrait donc avoir une fonction selon ces théories, car il contribue à l'émergence de la capacité de respiration de l'organisme humain. De façon analogue, les photons peuvent avoir une fonction relativement à l'organisme humain, car ils contribuent à l'émergence de la vision⁴⁵. Les bactéries de l'intestin, elles, contribuent entre autres à l'émergence de la capacité de l'organisme humain qu'est la digestion. La théorie étiologique de Neander, pour sa part, définit la fonction d'un trait comme l'effet pour lequel il a été sélectionné. De fait, la portée de cette théorie dépend de la réponse que l'on donne au problème des *unités de sélection*. Selon Neander, l'oxygène ne serait pas une entité fonctionnelle, car l'oxygène n'a pas été sélectionné. Par contre, les bactéries pourraient avoir une fonction dans la théorie de Neander. En effet, notamment depuis Woese⁴⁶, il est généralement admis que les bactéries sont des organismes qui évoluent.

À l'opposé, selon la formulation actuelle de la théorie organisationnelle, beaucoup de bactéries, telles que les bactéries « pionnières », paraissent dépourvues de fonction au sein de l'organisme. Les défenseurs de l'AOF pourraient même expliquer, sur la base de la distinction entre « contribuer au maintien » et « être indispensable au maintien » (distinction relative à C1)⁴⁷, pourquoi l'on croit à tort que des entités utiles comme les bactéries et l'oxygène, qui ne satisfont pas C2), ont des fonctions. C'est qu'on associe souvent le fait d'être indispensable au maintien à celui d'avoir une fonction, alors que, dans la théorie organisationnelle, cette association ne peut être faite. Comme l'expliquent Mossio, Saborido et Moreno, sans l'activité de certains traits, comme le cœur (qui pompe le sang), les organismes humains ne peuvent se maintenir. D'autres traits, comme les yeux (qui opèrent la phototransduction),

contribuent au maintien de l'organisation spécifique de membres particuliers de la classe de systèmes « humain », qui est définie par un ensemble minimal de processus et de contraintes que les organismes humains instancient. Cependant, si les yeux n'accomplissent plus la transduction de la lumière, l'organisme humain peut tout de même survivre. Son organisation particulière ne sera certes plus la même, mais il se maintiendra tout de même en tant que membre de la classe « humain », dont il manifeste encore les contraintes et les processus minimaux. Bref, alors que les yeux contribuent au maintien de l'organisme humain, le cœur lui est essentiel. De façon analogue, à la fois l'oxygène et les bactéries sont indispensables. Toutefois, bien qu'il soit intuitif de lier indispensabilité et fonctionnalité, l'AOF n'admet pas de lien nécessaire entre ces deux propriétés des traits des organismes.

En réponse au cas de bactéries, je propose de modifier la condition C2). Elle pourrait être définie de la façon suivante : le trait fonctionnel est maintenu sous des conditions générées par l'organisme. Le microbiome intestinal, qui remplit déjà C1), remplirait alors aussi C2), car les bactéries de l'intestin survivent sous certaines conditions spécifiques qui sont définies par l'organisme. C'est d'ailleurs pour cette raison que des facteurs aussi variés que la diète dans l'enfance et les mesures d'hygiène déterminent la composition de la flore intestinale d'un individu.

Certains peuvent craindre qu'en évacuant la dimension productive de C2), nous ne rendions l'AOF plus inclusive qu'elle ne l'est déjà, voire trop inclusive. Je crois que ce n'est pas le cas. Pour faire un test, reprenons simplement l'exemple de l'oxygène, qui n'a pas de fonction selon la première version de C2). Il semble que l'oxygène ne soit ni produit, *ni maintenu*, sous des conditions définies par l'organisme humain. En effet, quiconque est familier avec le cycle de l'oxygène sait bien que les humains, comme les autres animaux, transforment l'oxygène en énergie, en eau et en dioxyde de carbone lors du processus de respiration. Il en va de même avec la nourriture, qui est seulement utile à l'organisme : il semble évident que la nourriture n'est pas maintenue sous des conditions définie par l'organisme humain. Il m'apparaît donc que l'AOF a grandement

avantage à modifier son critère C2). En toute vraisemblance, cette modification ne dénaturerait pas l'AOF et permettrait seulement de traiter du cas récalcitrant des bactéries.

Nous pouvons tout de même nous demander pourquoi les défenseurs de l'AOF ont défini C2) par le maintien et la production. C'est peut-être parce que les exemples canoniques d'attributions fonctionnelles, comme « la fonction du cœur est de pomper le sang », réfèrent à des traits qui sont non seulement maintenus sous des conditions définies par l'organisme, mais aussi produits sous de telles conditions⁴⁸. Or, considérant le cas des bactéries, le maintien, en conjonction avec C1) et C3), paraît déjà suffire à fonder les attributions fonctionnelles.

7. Conclusion

L'approche organisationnelle des fonctions a l'avantage majeur de nous permettre de naturaliser les dimensions téléologique et normative du concept de fonction. Ce faisant, elle échappe aussi à la menace épiphénoménaliste à laquelle est confrontée la théorie étiologique, tout en évitant d'être trop libérale, reproche qui a été fait à la théorie systémique. Cependant, de prime abord, l'AOF peut apparaître *trop peu* libérale. J'espère avoir montré que cette réserve à l'endroit de l'AOF est en partie fondée. Dans un premier temps, j'ai fait voir qu'une prise en compte de la dimension temporelle de l'auto-maintien permet aux défenseurs de l'AOF de prouver que leur théorie permet l'attribution de fonctions aux traits reproductifs. Dans un second temps, j'ai tenté de démontrer que l'AOF ne peut reconnaître de fonctions à plusieurs bactéries (telles que les bactéries « pionnières ») au sein de l'organisme humain et que, pour cette raison, la condition C2) devrait être modifiée.

Enfin, j'aimerais souligner que mon examen critique de l'AOF repose sur la thèse suivante, demeurée jusqu'ici plutôt implicite : je crois que les attributions fonctionnelles doivent s'ancrer dans une prise en compte de la temporalité. Par exemple, pour soutenir que l'AOF reconnaît des fonctions aux traits reproductifs, j'ai fait remarquer que l'auto-maintien des systèmes englobants se constate sur le temps long. De façon analogue, pour étayer la thèse

selon laquelle l'attribution de fonctions aux bactéries constitue un « problème difficile » pour les défenseurs de l'AOF, je me suis intéressée aux relations unissant les bactéries colonisatrices et les organismes à travers le temps.

Attribuer des fonctions en considérant le facteur temporel, c'est renoncer à traiter les entités biologiques comme des structures fixes, organisées en hiérarchie de choses, pour se concentrer plutôt les processus biologiques, ces interactions complexes et multiples qui unissent les entités biologiques entre elles. Mais aussi, en considérant les processus, nous jetons un éclairage nouveau sur la question de l'individualité, que j'ai évacuée. Nous savons que 90% de nos cellules sont des microbes⁴⁹ et que nombre d'entre eux, tels que les bactéries symbiotiques de notre intestin, sont essentiels à notre survie. Or, du moment que l'on réalise, comme John Dupré⁵⁰, que l'organisme est un tout fonctionnel de processus complexes, qui interagit avec son environnement, il semble bien difficile de nier que les bactéries font partie de nous – même si (j'ajouterais), elles ne sont pas toujours produites sous des conditions définies par notre organisme.

1. J. Gayon, « Does Oxygen Have a Function, or Where Should the Regress of Functional Ascriptions Stop in Biology ? » dans *Functions : selection and mechanisms*, Synthese Library, vol. 363, 2013, p. 68.

2.M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, « An Organizational Account of Biological Functions » dans *Brit. J. Phil. Sci.*, vol. 60 (2009), pp. 813–841 ; M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, « Fonction: normativité, téléologie et organisation » dans *Les fonctions :Des organismes aux artefacts*, Paris, PUF, 2010, pp. 159-173 ; C.Saborido, M. Mossio et A. Moreno, « Biological Organization and Cross-Generation Functions » dans *Brit. J. Phil. Sci.*, vol 62 (2011), pp. 583–606 ; N. A Nunes-Neto, A. Moreno et C. N. El-Hani, « Function in ecology : an organizational approach » dans *Biol Philos*, Septembre 2013 ; M.Mossio, L. Bich et A. Moreno, « Emergence, Closure and Inter-Level Causation in Biological Systems » dans *Erkenntnis*, Juillet 2013.

3. Traditionnellement, les traits fonctionnels ont été identifiés aux structures biologiques, comprises comme étant organisées de façon hiérarchique, des structures plus micro aux structures plus macro (comme le cœur). Je délaisse

cette perspective au profit d'une conception processuelle des attributions fonctionnelles, qui est inspirée notamment des travaux de John Dupré. Ce passage d'une hiérarchie de structures à une hiérarchie de processus a non seulement des conséquences sur le développement d'une théorie des fonctions : il nous engage aussi à repenser la notion d'individualité biologique, comme je l'expliquerai en conclusion. Cf. J. Dupré, *Processes of Life : Essays in the Philosophy of Biology*, Oxford, Oxford University Press, 2012.

4. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, p. 816 ; 2010, p. 163.

5. Je me livre à une présentation de ces théories uniquement pour montrer en quoi la théorie organisationnelle des fonctions leur est opposée. Autant dans la classe des théories étiologiques que dans celle des théories systémiques, nous retrouvons des différences importantes. En ce qui a trait à la famille systémique, le lecteur intéressé peut se référer à R. Cummins, « Functional Analysis » dans *The Journal of Philosophy*, vol. 72 (1975), pp. 741-765 ; C. F. Craver, « Role functions, mechanisms, and hierarchy » dans *Philosophy of Science*, vol. 68 (2001), pp. 53-74 ; C. Boorse, « A Rebuttal on Functions » dans *Functions*, Oxford, Oxford University Press, 2002, pp. 63-112 ; J. Bigelow et R. Pageter, « Functions » dans *The Journal of Philosophy*, vol. 84 (1987), pp. 181-197.

Sur la famille étiologique, cf. L. Wright, « Functions » dans *Philosophical Review*, vol. 92 (1973), pp. 139-168 ; L. Wright, *Teleological Explanations : An Etiological Analysis of Goals and Functions*, Berkeley, University of California Press, 1976.

Dans ce texte, je me réfère exclusivement à la « selected effect theory », car c'est la version la plus répandue de la théorie étiologique. Cf. P. Godfrey-Smith, « A Modern History Theory of Functions » dans *Noûs*, vol. 28 (1994), pp. 344-362 ; R. G. Millikan, « In defense of proper functions » dans *Philosophy of Science*, vol. 56 (1989), pp. 288-302 ; K. Neander, « Function as selected effects : The conceptual analyst's defense » dans *Philosophy of Science*, vol. 58 (1991), pp. 168-184.

6. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2010, *loc. cit.*, p. 816 ; 2009, p. 161.

7. *Ibid.* ; M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2010, *loc. cit.*, p. 820.

8. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, p. 162 ; 2010, p. 817.

Sur 1) : par exemple, selon Millikan (1989, *loc. cit.*, p. 294), la théorie de Cummins nous permet d'affirmer que c'est la fonction des nuages de produire de la pluie. Sur 2) : selon Neander (1991, *loc. cit.*, p. 181), la théorie systémique permet de soutenir que c'est la fonction d'une certaine tumeur d'exercer une pression sur une artère dans le cerveau (ce qui explique la capacité qu'a l'organisme de mourir du cancer). Sur 3) : toujours selon Neander (*ibid.*), la théorie systémique permet de dire que c'est la fonction du cœur d'avoir le poids x , parce que cela contribue à sa capacité de peser x . Évidemment, ces critiques de la théorie systémique ne font pas l'unanimité. Cf. A. Wouters, « The Function Debate in Philosophy » dans *Acta Biotheoretica*, vol. 53 (2005), pp. 135-136.

9. Ici aussi, la position de Mossio, Saborido et Moreno ne fait pas consensus.

Godfrey-Smith (1994, *loc.cit.*), entre autres, a voulu éviter les implications épiphénoménalistes de la théorie étiologique classique en développant la « modern history theory » des fonctions.

10. Bien que cette théorie unifiée puisse potentiellement s'appliquer aux artefacts, je me limiterai ici aux organismes biologiques, comme le font d'ailleurs Mossio, Saborido et Moreno. Cf. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2010, *loc.cit.*, p. 160.

11. P. Glansdorff et I. Prigogine, *Thermodynamics of Structure, Stability and Fluctuations*, London, Wiley, 1971 ; G. Nicolis et I. Prigogine, *Self-Organisation in Non-Equilibrium Systems : From Dissipative Structures to Order Through Fluctuation*, New York, Wiley, 1977 ; K. Ruiz-Mirazo, *Physical Conditions for the Appearance of Autonomous Systems with Open-ended Evolutionary Capacities*, Thèse de Doctorat, Université du Pays Basque, 2001.

12. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, p. 164 ; 2010, p. 824.

13. Les cellules de Bénard, de même que les réactions chimiques oscillatoires, peuvent aussi être reconnues comme des systèmes auto-maintenus. Cf. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2010, *loc. cit.*, pp. 823-824 ; G. Nicolis et I. Prigogine, 1977, *op. cit.*

14. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, p. 165 ; 2010, p. 824.

15. *Ibid.*, p. 825.

16. *Ibid.*, p. 828 ; M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, p. 168.

17. *Id.* ; M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2010, *loc. cit.*, pp. 825-826.

18. *Ibid.*, p. 826. Je ne suis pas certaine que le cycle de l'eau ne constitue pas un contre-exemple à l'AOF. Est-ce qu'il n'y a vraiment pas de différenciation organisationnelle dans ce système ? Intuitivement, il peut sembler que les nuages, par exemple, font une contribution spécifique au maintien du système, en produisant la pluie. Mossio, Saborido et Moreno pourraient répliquer que c'est la complexité matérielle du cycle de l'eau qui m'induit en erreur, mais il m'apparaît tout de même que le cas du cycle de l'eau est différent de celui des structures dissipatives relativement à la différenciation organisationnelle.

19. *Ibid.*, p. 815 ; M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, p. 160.

20. Ces auteurs sont les premiers à avoir décrit le métabolisme comme un système organisationnellement clos et différencié : R. Rosen, « On the Dynamical Realizations of (M, R)-systems » dans *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 35 (1973), pp. 1-9 ; F. J. Varela., H. Maturana et R. Uribe, « Autopoiesis : The Organisation of Living Systems, its Characterization and a Model. » dans *BioSystems*, vol. 5 (1974), pp. 187-96.

21. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2010, *loc. cit.*, p. 827.

22. Ici, je présente ma compréhension personnelle de la façon dont C2) doit être rempli dans le cas du cœur humain. Je trouve que l'explication de Mossio, Saborido et Moreno est plutôt vague, et qu'elle ne nous permet pas de saisir en quoi le cœur humain est « produit » sous des conditions établies par l'organisme. Voici tout ce qu'ils écrivent à ce sujet : « En même temps (C2), le

cœur est produit et maintenu par l'organisme, dont l'intégrité globale est une condition pour l'existence du cœur » (M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, p. 168 ; 2011, p. 595). Je crois que cette citation explique plus le maintien par le système que la production par celui-ci.

23. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, p. 170 ; 2010, pp. 834-835.

24. *Ibid.*, p. 835 ; M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, p. 170.

25. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2011, *loc. cit.*, p. 597.

26. *Id.* C'est d'ailleurs ce qui a été fait récemment (*cf.* N. A. Nunes-Neto, A. Moreno et C. N. El-Hani, *loc.cit.*).

27. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2011, *loc. cit.*, p. 599.

28. *Ibid.*, p. 598.

29. *Ibid.*, p. 599.

30. *Id.* ; *ibid.*, pp. 601-602.

31. *Id.* Les auteurs s'appuient sur les travaux de Griesemer. *Cf.* J. R. Griesemer, « What Is "Epi" about Epigenetics ? » dans *From Epigenesis to Epigenetics : the Genome in Context*, New York, New York Academy of Sciences, 2002, pp. 97-110.

32. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2011, *loc. cit.*, p. 600.

33. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, p. 168 ; 2010, p. 828.

34. A. M. O'Hara et F. Shanahan, « The gut flora as a forgotten organ » dans *EMBO reports*, vol. 7, p. 691 ; F. Guarner et J-R. Malagelada, « Gut flora in health and disease » dans *The Lancet*, vol. 361 (2003), p. 512.

35. Matteo Mossio, Cristian Saborido et Alvaro Moreno, 2009, *loc. cit.*, pp. 829-830.

36. *Cf.* P-O. Méthot, « Understanding pathogens in the era of next generation sequencing » dans *The Journal of Infection in Developing Countries*, vol. 6(9) (2012), pp. 689-691.

37. Toutefois, certaines bactéries pathogènes, qui ne remplissent pas C1) au temps *t*, pourraient avoir rempli C1) au temps *t-1*, lorsqu'elles étaient commensales. C'est que les bactéries commensales peuvent devenir pathogènes si le contexte écologique se modifie. Par exemple, s'il y a rupture d'une membrane, certaines bactéries commensales de la flore intestinale peuvent coloniser des parties de l'organisme auxquelles elles n'ont généralement pas accès et jouer dès lors un rôle pathogène.

38. C. L. Sears, « A dynamic partnership : celebrating our gut flora » dans *Anaerobe*, vol. 11 (2005), p. 250.

39. *Ibid.* ; F. Backhed et *coll.*, « Host-Bacterial Mutualism in the Human Intestine. » dans *Science*, vol. 307 (2005), pp. 1915-1920 ; L. V. Hooper et J. I. Cordon, « Commensal Host-Bacterial Relationships in the Gut » dans *Science*, vol. 292 (2001), pp. 1115-1118.

40. F. Backhed et *coll.*, 2005, *loc. cit.*, p. 1916 ; A. M. O'Hara et F. Shanahan, 2006, *loc. cit.*, p. 688.

41. *Ibid.*, p. 691 ; Guarner et Malagelada, 2003, *loc. cit.*, p. 512.
42. C. L. Sears, 2005, *loc. cit.*, pp. 247-248.
43. C. Saborido, M. Mossio et A. Moreno, 2011, *loc. cit.*, p. 832.
44. J. Gayon, 2013, *loc. cit.*, p. 68.
45. *Ibid.*, pp. 73-74.
46. C.R. Woese, « Bacterial evolution » dans *Microbiology Reviews*, vol. 51(2) (1987), pp. 221-271.
47. M. Mossio, C. Saborido et A. Moreno, 2009, *loc. cit.*, pp. 829-830.
48. Bien que, selon moi, les défenseurs de l'AOF auraient pu expliquer avec plus de clarté en quoi il y a production dans le cas du cœur humain, *cf.* note 22.
49. D'ailleurs, certains biologistes travaillent actuellement sur un second projet du génome humain : le projet du microbiome humain, qui doit classifier tout le matériel génétique associé à l'humain, y compris celui de ces partenaires microbiens (<http://commonfund.nih.gov/hmp/index>).
50. J. Dupré, *Processes of Life : Essays in the Philosophy of Biology*, Oxford, Oxford University Press, 2012.