

Ontologie des virus : choses, êtres, processus ou information ?

Nicolae Sfetcu

19.11.2020

Sfetcu, Nicolae, « *Ontologie des virus : choses, êtres, processus ou information ?* », SetThings (19 novembre 2020), DOI : 10.13140/RG.2.2.32904.24327, URL = <https://www.setthings.com/fr/ontologie-des-virus-choses-etres-processus-ou-information/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>.

Une traduction de :

Sfetcu, Nicolae, " *Ontologia virusului: lucru, ființă, proces, sau informație?*", SetThings (6 octombrie 2020), DOI: 10.13140/RG.2.2.31276.49284, URL = <https://www.setthings.com/ro/ontologia-virusului-lucru-fiinta-proces-sau-informatie/>

Nicolae Sfetcu : *Ontologie des virus : choses, êtres, processus ou information ?*

Abstract

L'étude des virus soulève des questions conceptuelles et philosophiques pressantes sur leur nature, leur classification et leur place dans le monde biologique. Un ensemble majeur de problèmes concerne l'individualité et l'identité diachronique d'un virus: qu'est-ce que le virus, la particule virale (virion) ou l'ensemble du cycle viral? L'identification correcte du virus a des conséquences ontologiques importantes, également liées au lieu et au moment où les entités biologiques commencent et se terminent.

Ontologie des virus : choses, êtres, processus ou information ?

L'étude des virus soulève des questions conceptuelles et philosophiques pressantes sur leur nature, leur classification (O'Malley 2014, 45-94) (Mayr 1953) et leur place dans le monde biologique.

Un ensemble majeur de problèmes concerne l'individualité et l'identité diachronique d'un virus : qu'est-ce que le virus, la particule virale (virion) ou l'ensemble du cycle viral ? L'identification correcte du virus a des conséquences ontologiques importantes, également liées au lieu et au moment où les entités biologiques commencent et se terminent. (Bouchard et Huneman 2013)

La thèse métaphysique principale considère que le monde est composé de choses ou de substances, avec des choses identifiées par leurs propriétés. Mais Dupré et Guttinger (J. Dupré et Guttinger 2016) estiment qu'une symbiose généralisée menace la clarté des frontières entre les organismes et même le caractère unique de ces frontières. La nature intégrée et les frontières floues entre les organismes ont conduit à affirmer que « les récits métaphysiques traditionnels (fondés sur la substance) de l'individualité devraient être remplacés par une ontologie de processus, comme la seule « philosophie de l'organisme » qui peut donner un sens aux phénomènes biologiques tels que nous les connaissons maintenant. » (J. Dupré et Guttinger 2016) (Henning et Scarfe 2013)

Dupré et Guttinger font une déclaration ontologique selon laquelle les systèmes biologiques sont des processus. Dans ce contexte, ils contestent l'idée selon laquelle les virus sont des entités distinctes qui suivent leur propre agenda intrinsèque (et pathogène), sur la base de deux arguments : les systèmes symbiotiques peuvent inclure des virus, et les virus doivent être considérés comme des processus. (J. Dupré et Guttinger 2016) Ils soutiennent que les virus sont des éléments vitaux et omniprésents du flux plus large de processus interconnectés qui composent les systèmes biologiques.

Les symbiotes microbiens impliqués dans la modulation du développement jouent un rôle central dans le développement et l'homéostasie du système immunitaire, (Spasova et Surh 2014) en relation avec le système nerveux central. (Bravo et al. 2012) Le microbiome humain ne serait pas constitué de passagers, mais de parties d'un individu intégré, l'organisme lui-même dans son état stable se révélant être le produit d'innombrables interactions entre l'hôte et les microbes. Ainsi, les virus fournissent des services aux systèmes biologiques, certains même vitaux. Les virus font partie intégrante du système, plutôt que les parasites, suffisamment maîtrisés pour permettre au système de fonctionner. (Wylie, Weinstock, et Storch 2012) Fondamentalement, le virus répond progressivement et systématiquement aux changements alimentaires. (Minot et al. 2011) suggérant une réponse fonctionnelle positive aux changements environnementaux.

Les virus tuent les cellules dans lesquelles ils se reproduisent et maintiennent leur propre cycle de vie, mais on considère que cette destruction des cellules est fonctionnelle pour le système plus large dont le virus fait également partie. Le résultat est une relation écologique stable entre les virus et leurs hôtes, bénéfique pour le système dans son ensemble, y compris pour réguler la morphologie et la fonction de l'intestin et pour façonner le système immunitaire.

Les rétrovirus ont un génome ARN simple brin qui est transcrit en sens inverse après infection dans l'ADN double brin et inséré dans le génome hôte. Après insertion, l'ADN viral est traité par l'hôte comme son propre ADN, ce qui signifie qu'il est transcrit et reproduit avec le reste du génome de l'hôte. (J. Dupré et Guttinger 2016) Dans certains cas, les rétrovirus atteignent le génome de l'hôte et peuvent se transformer en ce que l'on appelle des rétrovirus endogènes. On estime que jusqu'à 8% du génome humain se compose en fait de rétrovirus endogènes, (Griffiths 2001) ce qui entraîne des proportions significatives d'ADN d'organismes eucaryotes entrant initialement dans la lignée cellulaire via un virus.

Le virus peut fonctionner comme un vaste dépôt de ressources génétiques. (Minot et al. 2011) Ainsi, le génome humain lui-même peut être considéré comme une base de données ou une bibliothèque de ressources qui peuvent être utilisées de plusieurs manières par la cellule. (Noble 2006) On peut supposer ici que « la capacité des microbes, en particulier de notre microbiome symbiotique, à recruter des ressources génétiques à partir de l'environnement biotique, peut être un moyen beaucoup plus efficace de répondre aux contingences environnementales que l'évolution par la variation et la sélection génétique aléatoire. » (J. Dupré et Guttinger 2016)

Compte tenu de cette interconnexion étroite entre les virus et leurs hôtes, il semble plausible que les virus dans des systèmes multi-organiques complexes soient des parties fonctionnelles vitales de l'ensemble et puissent jouer un rôle essentiel dans l'élimination des cellules nuisibles, la médiation du transfert des ressources génétiques, le développement de leurs hôtes et leur survie dans des conditions difficiles. (J. Dupré et Guttinger 2016)

La question de savoir si les virus sont vivants a été posée à plusieurs reprises tout au long de l'histoire de la recherche virologique. La réponse est difficile et elle a changé avec le temps. (Smith et Szathmáry 2000) Un problème connexe est la mesure dans laquelle les virus pourraient être considérés comme des organismes (dans l'idée que tous les organismes sont des êtres vivants, mais que tous les êtres vivants ne sont pas des organismes). De nombreux biologistes pensent que les virus ne sont pas des organismes, qui impliquent un très haut degré d'organisation fonctionnelle et de coopération, avec de fortes interactions entre les parties. (Huneman 2006)

D'autres biologistes pensent que la discrimination entre les êtres vivants et les choses ne convient pas au cas spécifique des virus : la réponse dépendrait des conceptions préexistantes de la « vie ». En outre, la question de savoir ce que font les virus est au moins aussi importante que la question de ce qu'ils sont (c'est-à-dire leur état vivant ou non). (Pradeu, Kostyrka, et Dupré 2016)

Koonin et Starokadomsky définissent le statut des virus parmi les entités biologiques dans le paradigme du réplicateur. (Koonin et Starokadomsky 2016) Tous les réplicateurs biologiques forment un continuum le long de l'axe égoïsme-coopérativité, des formes complètement égoïstes aux formes pleinement coopératives. Dans ce contexte, tous les organismes sont des communautés de réplicateurs qui interagissent, co-évoent, de classes différentes.

Selon Lewis et al., il existe un troisième état, caractéristique des cellules latentes (à activité métabolique réduite et capables de reprendre la croissance et la division en fonction des conditions extérieures), qui n'est ni vraiment « vivante » ni inanimée. (Lewis 2010)

En général, un organisme mort entre encore dans la catégorie de la vie. Cependant, lorsqu'il s'agit de virus, ces différents aspects de la vie sont enchevêtrés et sont généralement discutés ensemble. En effet, les virus peuvent être considérés comme n'appartenant pas à la catégorie des êtres vivants, car ils sont incapables de se reproduire de manière autonome, et les virions extracellulaires sont à l'état latent (inerte).

Koonin et Starokadomsky soutiennent qu'il est toujours possible de dire si une entité particulière appartient au domaine de la biologie, dans le cadre d'un concept fondamental appelé le « paradigme du réplicateur ». (Koonin et Starokadomsky 2016) Les réplicateurs forment un continuum le long de l'axe de l'autonomie. La seule caractéristique universelle partagée par tous les réplicateurs est la présence d'un signal qui permet une autonomie répliative. (Kristensen et al. 2013) Une dimension orthogonale de l'univers répliquant implique des stratégies de reproduction (ou modes de vie), de l'égoïsme complet (associé au parasitisme) à la pleine coopération. (Joh et Weitz 2011)

Des transitions d'un type de réplicateur à un autre se sont produites à de nombreuses reprises au cours de l'évolution, mais il n'y a aucune preuve de transitions évolutives entre les

cellules et les virus. (Koonin et Starokadomskyy 2016) Ni sur l'origine des éléments égoïstes dans les « gènes échappés » (qui deviennent des réplicateurs autonomes et égoïstes) des formes de vie cellulaires. La plupart des gènes viraux essentiels (gènes marqueurs viraux) n'ont pas d'équivalents proches entre les gènes des formes de vie cellulaires, étant probablement issus d'un pool génique pré-cellulaire primordial. (Koonin et Dolja 2013)

La stabilité et l'inactivité des virions fournissent un support intuitif pour l'affirmation courante selon laquelle les virus ne sont pas des êtres vivants. La seule chose qui est constante tout au long du cycle viral est le génome viral. Dupré et Guttinger pensent que le virus doit donc être simplement identifié avec son matériel génétique, mais l'identification du virus avec quelque chose de plus court qu'un cycle conduira à un échec. L'épisome ou le virion n'est qu'une partie de ce que fait le virus. « Ce qui compte, ce n'est pas la molécule d'ADN elle-même, mais ce qu'elle fait (ou peut faire) dans un contexte particulier », (J. Dupré et Guttinger 2016) comme l'invasion cellulaire et la réplication, plutôt que d'avoir une certaine propriété intrinsèque. Ainsi, un rétrovirus endogène n'est un virus que tant qu'il conserve la capacité de contribuer à un processus viral. S'il vit dans un génome hôte, il est sans importance. Et dans le cas d'une latence virale en tant qu'épisome, il doit être considéré comme viral.

Lopez-Garcia et d'autres pensent que les virus ne peuvent pas être considérés comme vivants en raison de leur incapacité à se reproduire sans hôte cellulaire. (Lopez-Garcia 2012)

La perception courante est que les désinfectants tuent la plupart des types de virus. La logique ici est simple : vous ne pouvez pas tuer quelque chose qui n'est pas vivant. De même, si quelque chose peut tomber malade et finalement mourir, il est certainement vivant. (Pearson 2008) Raoult et Forterre classent les virus comme l'une des deux catégories fondamentales d'organismes (codant pour les capsides, par opposition aux organismes codant pour les ribosomes, c'est-à-dire

les formes de vie cellulaires), avec l'implication évidente que les virus sont des êtres vivants. (Raoult et Forterre 2008)

Les systèmes vivants consistent en des interactions complexes entre des éléments qui forment des lignes de plusieurs types différents. Ces éléments incluent les virus. Dupré et O'Malley ont fait valoir que les raisons classiques pour nier que les virus sont vivants sont erronées : la plupart des critères impliqués, comme le critère d'autonomie (selon lequel les virus nécessitent des ressources essentielles de la cellule hôte pour se reproduire) les excluraient de la catégorie des êtres vivants. (J. O. Dupré 2009) Mais, compte tenu de ces considérations, nous dépendons nous-mêmes de manière vitale d'une multitude d'organismes symbiotiques, donc sur ce critère nous ne serions pas non plus vivants. (J. Dupré et Guttinger 2016)

Plutôt que de considérer un ensemble de fonctionnalités qui qualifient quelque chose de virus, nous devrions considérer les activités qui composent le cycle de vie viral. Nous devrions donc considérer les virus comme des processus plutôt que comme des choses. (J. Dupré et Guttinger 2016) Mais la perspective du processus comporte des difficultés conceptuelles.

Si nous adoptons la perspective d'une ontologie de processus, nous pouvons comprendre la fusion et la séparation constantes, car les processus peuvent s'unir en un seul processus et même maintenir leur identité.

La collaboration entre le virus et l'hôte n'est pas une simple interaction, mais une interaction collaborative entre les processus. Le virus lui-même ne peut être compris que s'il est décrit comme un cycle.

Cette perspective centrée sur les processus offre une compréhension très différente de l'activité et de la fonction dans les systèmes biologiques que la simple interaction de choses

individuelles discrètes et évolutives. Selon Guttinger, au moins les virions ne sont certainement pas vivants, mais sont des étapes de processus vivants. (J. Dupré et Guttinger 2016)

Nicholas Rescher introduit une vision des processus tels que définis par une unité fonctionnelle ; il existe une « structure programmatique » qui caractérise et unifie un processus. (Rescher 1996) Les activités interconnectées qui forment une unité fonctionnelle sont la clé pour comprendre les processus : « Un processus se transforme en élément, non par ses propriétés continues (« essentielles »), comme dans le cas d'une substance de conception classique, mais par son histoire, par la structure temporelle de son développement descriptif dans le temps. L'identité d'un processus est constituée par un modèle d'action séquentiel [...] » (Rescher 1996, 41)

Qui est une caractéristique fondamentale du monde, devenir ou être ? Dans une perspective substantielle, être est généralement vu comme fondamental, l'activité dérivant de l'être. Pour un ontologue de processus, devenir est considéré comme la caractéristique fondamentale du monde, selon laquelle une « chose » stable est en fait un processus (lent). (Guttinger 2020b) Selon Dan Nicholson et John Dupré dans l'introduction à la collection d'essais *Everything Flows* :

« En tant que processus, contrairement aux choses ou aux substances, les organismes doivent constamment changer pour continuer à être les entités qu'ils sont. » (Nicholson et Dupré 2018)

Ce qui contredirait une vision du processus, c'est que la stabilité est une caractéristique fondamentale du monde. Ainsi, une ontologie de processus doit expliquer comment ces modèles stables se produisent. (Guttinger 2020b)

Stephan Guttinger considère que la population virale d'un organisme est un système extrêmement diversifié et surtout dynamique, formant ce que les chercheurs appellent un « nuage mutant » ou un « essaim ». Grâce aux interactions entre les membres du nuage et entre le nuage et son contexte plus large, le virus acquiert de nouvelles caractéristiques comportementales, réagissant rapidement aux changements environnementaux, notamment en évitant les

médicaments antiviraux ou les mécanismes de défense cellulaire. Ainsi, la diversité du virus est, au moins en partie, définie par les plus grands systèmes dans lesquels le nuage se développe et se déplace. (Guttinger 2020a)

Ce concept conduit les chercheurs à de nouvelles approches dans les traitements antiviraux, à la recherche de moyens d'interférer avec la dynamique du nuage mutant. Le besoin se fait sentir de passer d'une vision des choses à une compréhension processus des virus, avec une vision plus relationnelle et dynamique.

Au cours d'un cycle viral, le virus d'origine est complètement détruit et seules les informations associées sont transmises à la génération suivante. Ceci est différent pour les organismes cellulaires, qui doivent en transmettre une partie physique de génération en génération. L'hypothèse de l'information virale affirme que l'information génétique est reproduite au détriment de l'efficacité énergétique du système. Selon cette hypothèse, les virus sont les seules entités biologiques qui se reproduisent simplement sous forme d'information. Lorsqu'un virus entre dans son hôte, le virion se désassemble complètement et l'acide nucléique est copié dans de nouveaux génomes, qui sont ensuite conditionnés et libérés sous forme de nouveaux virions. Physiquement, il ne reste plus rien de la forme originale du virion. « Pas une seule molécule, un atome ou un quark ne doit être transféré entre l'ancien et le nouveau. La seule chose qui doit être déplacée entre les générations virales, ce sont les informations nécessaires pour créer le prochain ensemble de virus. » (Rohwer et Barott 2013)

Selon Forest Rohwer et Katie Barott, dans *Viral information*, l'hypothèse de l'information virale stipule que :

1. L'information physique fait référence à la position dans l'univers.

2. La biologie crée des informations physiques en changeant la position de la matière, fonctionnant efficacement comme le démon de Maxwell.
3. Les informations virales convertissent elles-mêmes différents types d'informations physiques au détriment de l'efficacité énergétique globale.
4. La destruction d'informations physiques a un coût thermodynamique, qui est quantifié par le principe de Landauer. Des populations extrêmement importantes, comme les virus, subissent une sélection à la limite de Landauer et cela est observable. (Rohwer et Barott 2013)

La dynamique des virus est incroyable. (Weinbauer 2004) Chaque semaine, 10^{31} virus se désintègrent et 10^{31} nouveaux virus apparaissent. Pratiquement $1,7 \times 10^{25}$ nouveaux virus sont produits chaque seconde, et pour chaque nouveau virus environ 50000 paires de bases d'ADN doivent être synthétisées. (Steward, Montiel, et Azam 2000) Il s'avère que chaque seconde plus de 10^{30} paires de bases d'ADN viral sont effectuées, entraînant la mort d'environ 10^{24} cellules microbiennes par seconde.

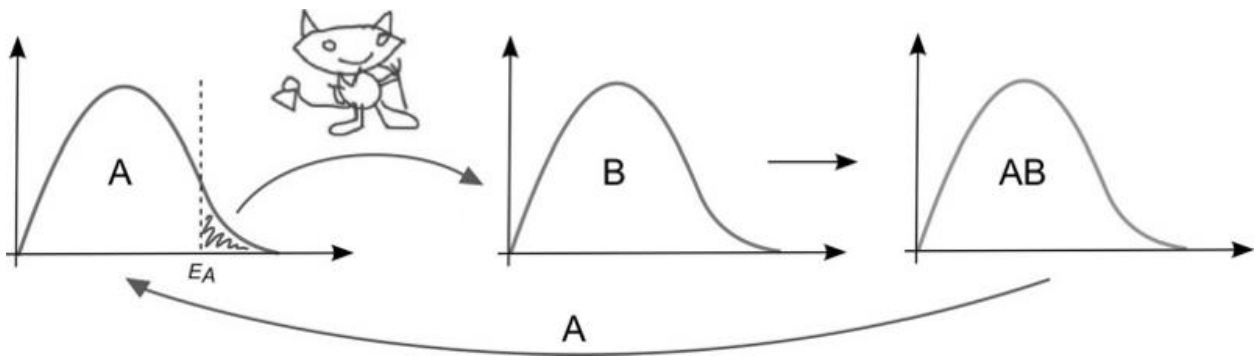


Illustration du démon de Maxwell et principe de Landauer. Le démon / enzyme sélectionne sélectivement les molécules « A » avec suffisamment d'énergie pour réagir avec le réactif « B », conduisant au produit « AB ». Ce processus refroidit légèrement la population « A ». Cette perte de chaleur est ramenée dans le système par l'univers environnant. Lors de la dégradation / effacement de « AB », « A » revient à sa population et cette chaleur peut être mesurée en utilisant des méthodes telles que la calorimétrie isotherme. Source : (Rohwer et Barott 2013)

Au sens de la communication, l'information est une mesure du « pouvoir de surprise ». (Tribus 1961) Plus la surprise est grande, plus nous obtenons d'informations. La conséquence thermodynamique de l'information physique a été définie mathématiquement par Rolf Landauer. (Landauer 1996) La chaleur dégagée par l'effacement des informations physiques peut être mieux imaginée en invoquant le démon de Maxwell. Le démon est une créature hypothétique qui peut collecter des molécules « chaudes » d'un conteneur et les déplacer vers un autre. Cela crée une différence de température qui pourrait être transformée en travail mécanique. Le démon obtient en fait des informations sur la position relative des molécules. (Szilard 1929)

Rohwer et Barott proposent que la biologie se comporte comme le démon de Maxwell. Les informations génétiques sont l'ensemble des instructions pour la construction du démon de Maxwell. Ces nouvelles informations ont un coût thermodynamique lorsqu'elles sont effacées, et la quantité de chaleur dégagée en détruisant les informations est également décrite par le principe de Landauer. (Toyabe et al. 2010) Il devrait donc être possible d'observer le lien entre l'information physique et la thermodynamique et de l'utiliser pour mieux comprendre la biologie et, en particulier, le succès des virus. (Rohwer et Barott 2013)

Pour prouver que les informations virales sont réelles, Djamali et ses collègues ont utilisé la calorimétrie isotherme pour étudier la chaleur dégagée par les communautés microbiennes et virales marines. (Djamali et al. 2012) La diminution du nombre de cellules, associée à l'augmentation de la diversité, est très similaire à l'information virale. (Rohwer et Barott 2013)

Les coûts énergétiques supplémentaires de l'information physique associée à une mutation pourraient expliquer pourquoi des séquences virales identiques sont observées à l'échelle mondiale. Rohwer et Barott concluent qu'on peut imaginer la biosphère comme un système massif qui nourrit en fin de compte les virus, expliquant ainsi pourquoi la diversité biologique est dominée

par les virus. L'hypothèse de l'information virale a le potentiel de synthétiser l'écologie et la théorie de l'évolution en incorporant des virus avec le reste de la biologie dans un cadre thermodynamique.

Les frontières entre les virus et les entités associées ne sont pas faciles à définir. Une classe très importante d'entités apparentées, les plasmides, sont généralement considérées comme se différenciant des virus par leur absence de capsid, constituée d'ADN vide. Mais les virus n'ont pas de capsides pendant tous les stades de leur cycle de vie, pouvant se fixer sur un génome eucaryote hôte sous la forme d'un épisome, la différence entre un épisome viral et le plasmide étant assez floue. Dupré et Guttinger en concluent qu'ils font partie de processus qui diffèrent à différents stades de leur cycle de vie.

Pour découvrir ce qu'est réellement un virus, une ontologie de la substance a peu à offrir. Le point de vue de la substance assume son essentialisme et / ou individualisme, mais aucun d'eux ne correspond bien à l'image interconnectée du monde biologique que les sciences naturelles peignent. (J. Dupré et Guttinger 2016)

Koonin et Starokadomsky concluent que le statut des virus dans le domaine de la biologie est naturellement défini dans le paradigme du réplicateur. (Koonin et Starokadomsky 2016) Toute l'histoire de la vie est une histoire de coévolution parasite-hôte qui comprend à la fois la lutte entre eux et diverses formes de coopération. Ainsi, le paradigme du réplicateur fournit le cadre conceptuel pour l'étude théorique et expérimentale des interactions dans la communauté des réplicateurs. La complémentarité de la réplication et du métabolisme (définie au sens large pour inclure la production d'énergie) est la manifestation biologique du dualisme de l'information (entropie) et de l'énergie, comme l'explique Schroedinger. (Schrodinger, Schrödinger, et Dinger 1992) Mais ici aussi un dilemme se pose : réplication ou métabolisme d'abord ? Différentes

approches sont possibles. En conclusion, le paradigme du réplicateur est considéré comme central en biologie, aidant à établir le statut des virus dans le monde biologique.

Bibliographie

- Bouchard, F, et P Huneman. 2013. « From Groups to Individuals | The MIT Press ». The MIT Press. 2013. <https://mitpress.mit.edu/books/groups-individuals>.
- Bravo, Javier A., Marcela Julio-Pieper, Paul Forsythe, Wolfgang Kunze, Timothy G. Dinan, John Bienenstock, et John F. Cryan. 2012. « Communication between Gastrointestinal Bacteria and the Nervous System ». *Current Opinion in Pharmacology* 12 (6): 667-72. <https://doi.org/10.1016/j.coph.2012.09.010>.
- Djamali, Essmail, James Nulton, Peter Turner, Forest Rohwer, et Peter Salamon. 2012. « Heat output by marine microbial and viral communities ». *Journal of Non Equilibrium Thermodynamics* 37 (septembre): 291-313. <https://doi.org/10.1515/jnetdy-2011-0235>.
- Dupré, John, et S. Guttinger. 2016. « Viruses as Living Processes », mars. <https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2016.02.010>.
- Dupré, John; O'Malley. 2009. « Varieties of Living Things: Life at the Intersection of Lineage and Metabolism ». *Philosophy & Theory in Biology* 1 (décembre). <http://dx.doi.org/10.3998/ptb.6959004.0001.003>.
- Griffiths, David J. 2001. « Endogenous retroviruses in the human genome sequence ». *Genome Biology* 2 (6): reviews1017.1. <https://doi.org/10.1186/gb-2001-2-6-reviews1017>.
- Guttinger, Stephan. 2020a. « A Virus Is Not a Thing, Part 1: The Case for a Process View of Viruses ». *Philosophy, Logic and Scientific Method* (blog). 6 juillet 2020. <https://www.lse.ac.uk/philosophy/blog/2020/07/06/a-virus-is-not-a-thing-1/>.
- . 2020b. « A Virus Is Not a Thing, Part 3: What Virology Can Tell Us about Philosophy ». *Philosophy, Logic and Scientific Method* (blog). 25 août 2020. <https://www.lse.ac.uk/philosophy/blog/2020/08/25/a-virus-is-not-a-thing-3/>.
- Henning, Brian G., et Adam Scarfe. 2013. *Beyond Mechanism: Putting Life Back Into Biology*. Lexington Books.
- Huneman, Philippe. 2006. « Naturalising Purpose: From Comparative Anatomy to the ‘Adventure of Reason’ ». *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 37 (4): 649–674. <https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2006.09.004>.
- Joh, Richard I., et Joshua S. Weitz. 2011. « To Lyse or Not to Lyse: Transient-Mediated Stochastic Fate Determination in Cells Infected by Bacteriophages ». *PLOS Computational Biology* 7 (3): e1002006. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1002006>.
- Koonin, Eugene V., et Valerian V. Dolja. 2013. « A Virocentric Perspective on the Evolution of Life ». *Current Opinion in Virology* 3 (5): 546. <https://doi.org/10.1016/j.coviro.2013.06.008>.
- Koonin, Eugene V., et Petro Starokadomskyy. 2016. « Are Viruses Alive? The Replicator Paradigm Sheds Decisive Light on an Old but Misguided Question ». *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 59 (octobre): 125-34. <https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2016.02.016>.
- Kristensen, David M., Alison S. Waller, Takuji Yamada, Peer Bork, Arcady R. Mushegian, et Eugene V. Koonin. 2013. « Orthologous Gene Clusters and Taxon Signature Genes for Viruses of Prokaryotes ». *Journal of Bacteriology* 195 (5): 941-50. <https://doi.org/10.1128/JB.01801-12>.
- Landauer, Rolf. 1996. « The Physical Nature of Information ». *Physics Letters A* 217 (4): 188-93. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(96\)00453-7](https://doi.org/10.1016/0375-9601(96)00453-7).

- Lewis, Kim. 2010. « Persister Cells ». *Annual Review of Microbiology* 64 (1): 357-72. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.112408.134306>.
- Lopez-Garcia, Purificacion. 2012. « The Place of Viruses in Biology in Light of the Metabolism-versus-replication-first Debate ». *History and philosophy of the life sciences* 34 (janvier): 391-406.
- Mayr, E. 1953. « Concepts of Classification and Nomenclature in Higher Organisms and Microorganisms ». *Annals of the New York Academy of Sciences* 56 (3): 391-97. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1953.tb30229.x>.
- Minot, Samuel, Rohini Sinha, Jun Chen, Hongzhe Li, Sue A. Keilbaugh, Gary D. Wu, James D. Lewis, et Frederic D. Bushman. 2011. « The Human Gut Virome: Inter-Individual Variation and Dynamic Response to Diet ». *Genome Research* 21 (10): 1616-25. <https://doi.org/10.1101/gr.122705.111>.
- Nicholson, Daniel J., et John Dupré, éd. 2018. *Everything Flows: Towards a Processual Philosophy of Biology*. OUP Oxford.
- Noble, Denis. 2006. *The Music of Life: Biology beyond the Genome*. Illustrated Edition. Oxford ; New York: OUP Oxford.
- O'Malley, Maureen. 2014. *Philosophy of Microbiology*. Cambridge University Press.
- Pearson, Helen. 2008. « "Virophage" Suggests Viruses Are Alive ». *Nature* 454 (7205): 677-677. <https://doi.org/10.1038/454677a>.
- Pradeu, Thomas, Gladys Kostyrka, et John Dupré. 2016. « Understanding Viruses: Philosophical Investigations ». *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 59 (octobre): 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2016.02.008>.
- Raoult, Didier, et Patrick Forterre. 2008. « Redefining Viruses: Lessons from Mimivirus ». *Nature Reviews. Microbiology* 6 (4): 315-19. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1858>.
- Rescher, Nicholas. 1996. *Process Metaphysics: An Introduction to Process Philosophy*. F Second Printing Used Edition. Albany: State University of New York Press.
- Rohwer, Forest, et Katie Barott. 2013. « Viral information ». *Biology & Philosophy* 28 (2): 283-97. <https://doi.org/10.1007/s10539-012-9344-0>.
- Schrodinger, Roger, Erwin Schrödinger, et Erwin Schr Dinger. 1992. *What Is Life?: With Mind and Matter and Autobiographical Sketches*. Cambridge University Press.
- Smith, John Maynard, et Eörs Szathmáry. 2000. *The Origins of Life: From the Birth of Life to the Origin of Language*. Oxford: Oxford University Press.
- Spasova, Darina S., et Charles D. Surh. 2014. « Blowing on Embers: Commensal Microbiota and Our Immune System ». *Frontiers in Immunology* 5 (juillet). <https://doi.org/10.3389/fimmu.2014.00318>.
- Steward, Grieg F., Janine L. Montiel, et Farooq Azam. 2000. « Genome Size Distributions Indicate Variability and Similarities among Marine Viral Assemblages from Diverse Environments ». *Limnology and Oceanography* 45 (8): 1697-1706. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.8.1697>.
- Szilard, L. 1929. « über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen ». *Zeitschrift für Physik* 53 (11): 840-56. <https://doi.org/10.1007/BF01341281>.
- Toyabe, Shoichi, Takahiro Sagawa, Masahito Ueda, Eiro Muneyuki, et Masaki Sano. 2010. « Experimental Demonstration of Information-to-Energy Conversion and Validation of the

- Generalized Jarzynski Equality ». *Nature Physics* 6 (12): 988-92. <https://doi.org/10.1038/nphys1821>.
- Tribus, Myron. 1961. *Thermostatistics and Thermodynamics*. 1st Edition. Van Nostrand Reinhold.
- Weinbauer, Markus G. 2004. « Ecology of Prokaryotic Viruses ». *FEMS Microbiology Reviews* 28 (2): 127-81. <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2003.08.001>.
- Wylie, Kristine M., George M. Weinstock, et Gregory A. Storch. 2012. « Emerging View of the Human Virome ». *Translational Research: The Journal of Laboratory and Clinical Medicine* 160 (4): 283-90. <https://doi.org/10.1016/j.trsl.2012.03.006>.