

Crisprcas9 : Quel paradigme philosophique ?

Guillaume Morano¹

¹ Professeur agrégé de philosophie en classes préparatoires, Strasbourg, France,

RÉSUMÉ

Avec CRISPR, le génie génétique s'est doté d'un outil programmable de reprogrammation des organismes. Ce faisant, il a cessé de relever d'un bricolage hasardeux pour devenir un système rationnel d'édition génique. Crispr fait apparaître en cela la rupture accomplie par les technosciences contemporaines à l'égard de l'entreprise des sciences modernes. Dans le cadre d'une conception substantialiste du réel, celles-ci se donnaient pour ambition la maîtrise de la nature par l'usage humain de ses mécanismes. Selon un tout autre paradigme, le génie génétique n'envisage désormais le vivant que comme un flux d'informations de fait et en droit reprogrammable, dans l'horizon d'une entreprise qui n'est plus seulement de maîtrise, mais de commande.

MOTS-CLÉS : chimères, génie génétique, commande, ontologie informationnelle, commissibilité formelle.

DOI : 10.51328/230302

« Les limites de notre imagination »

En 2020, Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna recevaient le prix Nobel de chimie pour la découverte d'une méthode inédite d'édition du génome, nommée CRISPR-Cas9 (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*). Selon les termes mêmes de J. Doudna,

[...] avec l'outil du génie génétique le plus récent et aussi le plus efficace, CRISPRCAS9, il est possible de modifier le génome - le contenu intégral de l'ADN d'un organisme, y compris tous ses gènes - presque aussi facilement que l'on peut modifier un texte sur un ordinateur [...] Nous avons été propulsés pratiquement du jour au lendemain à l'aube d'une nouvelle ère du génie génétique et de la maîtrise biologique, une époque révolutionnaire où les possibilités ne sont limitées que par notre imagination collective (Doudna & Sternberg, 2020).

Le génie génétique n'a pourtant pas attendu cette dernière invention pour produire lapins fluorescents, chèvres-moutons, crapauds sans têtes et porcs humanisés. Depuis plusieurs décennies déjà, les laboratoires du monde entier se sont transformés en fabriques de chimères, annulant les frontières entre les espèces et confondant les êtres distincts. Dans cette entreprise de refabrication de la vie, en quoi la technique CRISPR est-elle révolutionnaire ?

Depuis le premier ADN hybride construit par le biochimiste P. Berg en 1972, de nombreuses techniques ont été mises au point afin d'insérer un ou plusieurs gènes

étrangers au cœur du génome des organismes bactériens, végétaux ou animaux. Quel que soit cependant le mode opératoire, le génie génétique se trouvait limité par le caractère irréductiblement aléatoire de son travail de réécriture. Échappait en effet au contrôle la possibilité d'insérer l'ADN exogène en un endroit ciblé de la vaste étendue du génome. Faute d'une telle précision, l'expression du gène étranger demeurait en son fond incertaine, et la reprogrammation du vivant, condamnée à n'être plus ou moins qu'un hasard qui marche.

C'est cette part irréductible de hasard que la technique CRISPR permet à présent d'éliminer. La molécule constituant le cœur du dispositif intervient à l'origine dans la réponse immunitaire de certaines bactéries à l'attaque des virus bactériophages (Doudna & Charpentier, 2012). Le système consiste à capturer un morceau de l'ADN du virus et à le stocker afin de reconnaître et d'éliminer les virus homologues. Dans ce mécanisme immunitaire, la molécule CRISPR se constitue en une mémoire génétique de l'attaque virale, et c'est à la nucléase Cas9 qu'il revient, une fois celui-ci reconnu, de découper et détruire les séquences d'ADN infectieux. Par comparaison, les anticorps du système immunitaire humain reconnaissent les virus à partir de leurs composants protéiques de surface, et non par recoupement de séquences d'informations génétiques. On comprend alors tout l'intérêt de cette découverte pour le génie génétique : si le système immunitaire bactérien peut programmer Cas9 pour découper des séquences d'ADN spécifiques, il devient possible

de reprogrammer l'ensemble du dispositif pour couper toute séquence choisie, y compris non virale, et intervenir ainsi sur n'importe quelle partie du génome, que ce soit pour l'inactiver, en accentuer l'expression, ou modifier les caractères épigénétiques de l'organisme support. Dans ce dernier cas, la modification génétique ne s'opère pas, comme dans la transgénèse, par importation d'un gène étranger, mais se trouve intégrée dans le système de réparation spontané du génome, sous la forme d'une modification induite excluant toute possibilité de traçage.

Si le système CRISPR inaugure ainsi une nouvelle ère de la réécriture du génome, c'est parce que la reprogrammation organique qu'il permet ne relève plus d'un bricolage en son fond hasardeux, mais s'opère à l'aide d'une machine moléculaire elle-même reprogrammable. L'efficacité sans précédent du système CRISPR lui vient de cette mise en abîme de la reprogrammation, qui s'étend désormais du vivant à l'outil même de sa réécriture. Avec CRISPR, le génie génétique est désormais passé du procédé artisanal de la transgénèse à un système pleinement rationnel d'édition du génome.

Le mirage du calcul utilitariste

En raison même de son efficacité, il est impossible de rendre compte de l'étendue des applications de cette nouvelle technologie, que la facilité et le faible coût d'usage mettent d'ores et déjà à la portée de la plupart des laboratoires de recherche du monde. Selon l'expression des scientifiques à la pointe de cette innovation, la révolution CRISPR est en marche, et elle n'a de limite que l'imagination même des chercheurs. De telles déclarations doivent évidemment être nuancées, dans la mesure où elles se trouvent partiellement motivées par l'incontournable recherche de financements des laboratoires. On saisit néanmoins la portée possible de CRISPR dans le cadre du génie génétique. Avec un outil d'une telle précision, il nous est désormais envisageable de modifier, en peu de temps et à peu de frais, n'importe quelle espèce animale ou végétale existante pour la rendre plus fonctionnelle, plus rentable, ou même plus ludique : papillons repeints de nouvelles couleurs, vaches sans cornes, compatibles avec les conditions de stockage de l'élevage industriel, chiens à la musculature surdéveloppée, susceptibles de servir à la police ou à l'armée, micro-cochons convertis en animaux de compagnie, chèvres métamorphosées en fabriques organiques de médicaments, porcs humanisés devenus banques vivantes d'organes transplantables... Au-delà de l'optimisation morphologique des espèces, il pourrait également devenir possible d'organiser la disparition de celles que nous jugeons nuisibles, par stérilisation génétique de la population, ou à l'inverse, de ressusciter les espèces disparues, tels auroch sauvage, bouquetin des Pyrénées, tortue géante de l'île de Pinta et jusqu'au mammoth laineux. Mais l'édition génique pourrait aussi bien donner naissance aux animaux de notre imaginaire, tels licornes ou lézards ailés, et peupler ainsi la réalité de nos phantasmes et de nos mythes (pour l'ensemble de ces perspectives, voir Doudna & Sternberg, 2020). Par le génie génétique de CRISPR, le monde peut désormais se peupler de créatures reprogrammées par nos soins, et pour nos fins. Au moment où l'étendue de nos activités conduit à la disparition exponentielle des espèces naturelles, nous projetons ainsi de modifier celles qui existent, de

créer celles qui n'existaient pas et de « rééditer » celles qui n'existent plus.

Devant l'étendue d'un tel pouvoir, il est étonnant de voir encore la raison, soucieuse de régulation, s'efforcer de comparer les bénéfices potentiels d'un tel dispositif aux dangers qu'il fait encourir, à la manière dont la rationalité entrepreneuriale calcule les risques d'un investissement à la lumière des gains qu'elle en escompte. C'est à cet exercice que se livre notamment J. Doudna, lorsqu'elle compare les avantages que nous pourrions trouver à l'éradication planétaire des moustiques, au regard des inconvénients que cela pourrait représenter pour les écosystèmes (Doudna & Sternberg, 2020). Un tel calcul, on le comprend, devrait être envisagé pour chaque application du dispositif, et au-delà, à l'ensemble des conséquences positives et négatives qu'il pourrait générer.

On mesure pourtant l'abîme qui sépare cette forme de rationalité de la réalité qu'elle prétend réguler. D'abord, parce qu'un tel calcul, pour être efficace, suppose toujours la possibilité d'une régulation éthique planétaire que l'économie libérale mondialisée rend inenvisageable. Le dispositif CRISPR équipe désormais la plupart des laboratoires du monde, et fait l'objet d'investissements financiers toujours plus considérables (Zivohlana, 2021). Dans ce cadre, le principe même d'une régulation éthique ne peut constituer, pour chacun des acteurs de la recherche, qu'un désavantage concurrentiel évident. Mais surtout, cette rationalité comptable prétend qu'un calcul coût-avantage du procédé est faisable, alors même que l'on proclame contradictoirement le nombre proprement *incalculable* de ses applications. La série indéfinie des conséquences possibles de chaque application, et la prolifération même des usages de CRISPR, devrait anéantir à l'avance toute tentative de comptabilité de ce genre. Les plateaux de la balance utilitariste sont devenus bien trop étroits pour mesurer ici le poids respectif des coûts et des avantages. Le bénéfice d'un tel calcul paraît dès lors évident : il n'est pas tant de permettre la régulation effective des pratiques, que d'entretenir la réconfortante illusion d'un contrôle de notre propre puissance technique.

« Comme maîtres et possesseurs de la nature » ?

Devant l'impertinence de la rationalité comptable, il faut se tourner vers la question du sens d'un tel procédé. De quel paradigme philosophique relève-t-il ? A partir de quels concepts devons-nous le comprendre ?

Il est tentant de placer les dernières avancées de la technoscience sous le patronage de Descartes, dans la mesure où, dans le prolongement des principes de la mécanique découverts au XVII^e siècle, elles achèveraient de nous faire « comme maîtres et possesseurs de la nature ». Au sein du *Discours de la méthode*, cette formule bien connue entend redéfinir le programme de la science, en lui assignant la mise jour des principes mécaniques à l'œuvre dans la nature, et par l'intelligence desquels l'homme pourrait espérer y agir efficacement. La réserve cartésienne introduite par le « comme » n'est pas sans importance. Il revient à celui qui est *réellement* maître et possesseur de commander les principes mécaniques auxquels la nature se soumettra. C'est là l'ouvrage de Dieu. A l'homme revient seulement la possibilité de *détourner* les mécanismes qu'il découvre à des fins qui lui sont propres. Le procédé CRISPR semble s'inscrire à merveille dans l'horizon d'un tel programme : la biologie de syn-

thèse découvre un mécanisme immunitaire ancestral, fruit d'une longue évolution naturelle, et il revient seulement au génie génétique d'en orienter le fonctionnement dans un sens qui soit profitable à l'homme. Nous ne sommes ici « comme maîtres et possesseurs » du vivant qu'à la condition de nous en approprier un fonctionnement intime dont nous ne sommes pas les auteurs. Le caractère apparemment illimité des possibilités techniques ne devrait pas dès lors nous faire oublier la modestie de notre pouvoir de réécriture : aussi loin que s'étendent les réussites du génie génétique, de l'optimisation morphologique des organismes à la recréation des espèces disparues, la puissance de fabrication qu'il revendique n'est jamais que d'emprunt.

Métaphysiquement, cette position cartésienne suppose que la nature ne produit pas d'elle-même tous les effets possibles à partir des causes dont elle dispose. C'est ce qui ressort de la VI^e partie du Discours :

Lorsque j'ai voulu descendre à celles [les choses] qui étaient plus particulières, il s'en est tant présenté à moi de diverses que je n'ai pas cru qu'il fût possible à l'esprit humain de distinguer les formes ou les espèces de corps qui sont sur la terre d'une infinité d'autres qui pourraient y être, si c'eût été le vouloir de Dieu de les y mettre, ni, par conséquent, de les rapporter à notre usage, si ce n'est qu'on vienne au-devant des causes par les effets, et qu'on se serve de plusieurs expériences particulières.

Comme le souligne Guénancia commentant Descartes, « il pourrait y avoir une infinité d'autres corps ou d'autres figures résultant des mêmes « formules » créatrices, de même qu'on pourrait appliquer les divers engins expliqués dans le *Traité de la mécanique* « en une infinité de diverses façons » (Guénancia, 2000). Au regard de la technique, tout se passe comme si les puissances de la nature se trouvaient constitutivement sous-employées. C'est également postulat du génie génétique, pour qui les formules moléculaires créatrices à l'œuvre dans le vivant peuvent à loisir être employées pour inventer des organismes que la nature ne contient pas. A ce niveau se noue la connaissance de la cause et la diversification des effets : c'est en reconduisant la molécule CRISPR au mécanisme immunitaire qui l'explique dans le vivant qu'il devient possible de lui faire produire des effets nouveaux dans le domaine de la biologie de synthèse.

Si cette logique du détournement explique le fait de la maîtrise, quand est-il du droit ? Par quoi cette entreprise de réécriture du vivant se trouve-t-elle justifiée ? Il convient de distinguer ici la condition qui rend possible du principe qui justifie. Que la nature ne fasse pas tout ce qui lui est possible nous permet d'y introduire des effets qui nous sont propres. Mais c'est d'abord parce qu'elle se conçoit sur le modèle de la machine que nous y sommes autorisés. On sait que chez Descartes, ce modèle permet de libérer la philosophie naturelle de toute considération quant aux fins qui pourraient orienter le développement des êtres. Au sein de la nature, seules les causalités matérielle et mécanique sont effectivement à l'œuvre. C'est cette absence constitutive de finalité dans la nature en général, et dans les organismes en particulier, qui justifie alors les usages que nous pouvons en faire : l'être naturel devient disponible à tout usage humain, autrement dit se livre comme ensemble de moyens appropriables, parce qu'il ne trouve plus en lui-

même de fin qui lui soient propres. De la mécanique du XVII^e siècle à la biologie de synthèse actuelle, la machine prise pour référence a évidemment évolué en fonction des avancées de la technique. Comme le résume D. J. Nicholson, l'organisme a successivement été conçu à l'image de l'horloge, de la machine à vapeur, de l'usine chimique et finalement, dans le cadre du génie génétique, à l'image de l'ordinateur (Nicholson, 2013). Mais quelle que soit la machine prise pour référence, le modèle n'en conserve pas moins la même implication pratique : dès lors que les organismes sont assimilés à des machines aveugles, il devient possible, autant que légitime, de les décomposer en leurs constituants de base et de les reconstruire à loisir pour les assigner à des usages humains. De la formule de Descartes au procédé CRISPR, la conséquence semble bonne.

La substance et le flux

A y regarder de plus près, le génie génétique s'est pourtant doté, avec CRISPR, d'un dispositif qui déborde largement le cadre de ce paradigme moderne, tant dans la conception du vivant qu'il véhicule que dans le sens de l'entreprise technique qu'il met en œuvre.

Le décrochage s'opère lorsque l'entreprise de « maîtrise » initialement envisagée par Descartes se donne sous la forme d'un projet de reprogrammation. Il n'est pas de ce point de vue indifférent que la machine prise pour référence soit l'horloge ou l'ordinateur, dans la mesure où chacune engage une conception *ontologiquement distincte* de l'organisme. L'ontologie de Descartes est clairement substantialiste : le réel se compose de choses, que celles-ci soient spirituelles, comme l'âme qui nous anime, ou matérielles, comme les corps qui composent la nature. Si le vivant est conçu sur le modèle de la machine, c'est donc avant tout un être substantiel, quelque chose qui se tient et se maintient par soi, en se différenciant des êtres également substantiels qui l'environnent. Aussi triviale qu'elle paraisse, la formule qui résume la position cartésienne n'en est pas moins fondamentale : les organismes sont, avant toute autre détermination, des choses qui sont.

C'est cette ontologie substantialiste qui se trouve remise en cause par le modèle informatique qui gouverne actuellement le génie génétique. Pour envisager de reprogrammer la vie, quel que soit l'outil mis en œuvre, il faut d'abord en effet que le vivant nous apparaisse lui-même sous la forme d'un programme, soit un ensemble d'informations chimiques déterminants le développement de ses fonctions (Bensaude-Vincent Benoit-Browaey, 2011). Ainsi compris, la réécriture de la vie supposera seulement d'identifier, d'isoler et de recombiner des séquences d'informations données pour les articuler en de nouvelles lignes de code. La biologie moléculaire se prolonge ici en génomique, et la génomique en biologie de synthèse. La première permet de passer de la réalité matérielle des organismes au logiciel du code génétique ; la seconde, de constituer un répertoire universel des séquences génétiques et des fonctions apparentées ; et la dernière d'opérer, par la manipulation du génome, la reprogrammation fonctionnelle des vivants. Dans cet horizon, ces derniers cessent ainsi de nous apparaître comme des êtres substantiels pour se réduire à des flux d'informations de fait et en droit reprogrammables, de simples lignes de code toutes entières offertes à notre travail de réécriture.

Sur ce point, un divorce s'est pourtant progressivement opéré entre le génie génétique et la biologie moléculaire. Le génie génétique postule en effet un déterminisme informationnel qu'une observation plus poussée du vivant, dans le domaine de la biologie moléculaire, a fini par rendre largement contestable. C'est pour l'essentiel grâce à la bio-informatique que la biologie moléculaire a pu faire apparaître les limites du déterminisme étroit véhiculé par la métaphore informatique. Contrairement à l'idée selon laquelle un gène correspond à l'expression étroite d'une fonction, on sait à présent qu'une même fonction peut être contrôlée par plusieurs gènes, de même qu'il existe des interactions entre le génome et son environnement cellulaire, aussi bien qu'entre l'organisme et son environnement externe, et qui régulent l'expression des gènes, à l'inverse du conditionnement à sens unique postulé par le génie génétique. De manière remarquable, ce sont ainsi les outils informatiques dérivés de la conception programmatique du vivant qui ont contribué, ces dernières décennies, à la remise en question de cette dernière. Adressées au génie génétique, ces critiques du modèle informationnel sont pourtant condamnées à manquer leur cible. Dans le domaine des technosciences, un paradigme n'est pas en effet favorisé parce qu'il est objectivement vrai, mais dans la mesure où il est techniquement opératoire. La métaphore du programme constitue moins en ce sens un modèle d'intelligibilité qu'un principe de fabricabilité : sa valeur ne lui vient pas d'élucider l'énigme de la vie, mais de permettre la production de nouvelles formes de vivants. Avec la découverte de CRISPR, nous pouvons d'ailleurs redoubler le paradoxe relevé plus haut : les progrès dans le domaine de la bio-informatique ont fini par invalider la conception programmatique de la vie que le modèle informatique avait lui-même suggéré ; mais au moment même où ce progrès fait apparaître l'irréductibilité du vivant à un programme, c'est un vivant qui fournit un dispositif moléculaire permettant de réalimenter cette réduction informationnelle de la vie.

CRISPR ou la commissibilité formelle des organismes

Avec CRISPR, le génie génétique franchit donc une étape décisive dans la désubstantialisation informationnelle du vivant supposée par son entreprise de réécriture. A la lumière de cette ontologie, la technoscience contemporaine ne peut dès lors plus se comprendre comme une simple déclinaison des principes de la science moderne. La logique technique qui est ici à l'œuvre n'est pas en effet celle de la *maîtrise* envisagée par Descartes, mais celle de la *commande* décrite par Heidegger : pour le génie génétique, l'information constitue le signal de commande du développement organique autant qu'une clef de contrôle offerte à la manipulation technicienne. Elle est, en d'autres termes, ce qui permet de produire le vivant sous la forme d'un processus de part en part guidable.

Dans *La question de la technique*, Heidegger énonçait que le propre de la technique contemporaine est de faire apparaître le réel comme un pur fonds, une réserve de matière et d'énergies constamment disponible et exploitable. Ainsi réduit, le réel n'existe plus de manière autonome : en chacune de ses dimensions, il n'apparaît que comme l'index « commissible » de notre activité. C'est le sens de la fameuse affirmation de Heidegger selon laquelle

« l'essence de la technique n'est rien de technique » : la technique contemporaine ne se saurait se réduire à la fonction instrumentale à partir de laquelle on la conçoit ordinairement. En son essence, elle est un dévoilement de la présence par lequel tout étant advient comme étant « sous la main », l'opératrice d'une transformation du réel par lequel celui-ci se trouve systématiquement organisé en un « stock ». C'est dans cet horizon qu'il faut comprendre le procédé CRISPR. Ce que celui-ci permet, c'est d'organiser la « commissibilité formelle » des organismes (Dulau & Morano, 2020), soit la mise à disposition intégrale, au-delà de la matière et de l'énergie, de toutes les *formes* comprises virtuellement dans le code moléculaire de la vie. Par CRISPR, le génome se trouve convoqué comme un réservoir de formes potentielles, un stock de configurations phénotypiques indifféremment productibles et exploitables, un pur fonds informationnel livré sans reste à l'entreprise de la réécriture génétique. Conformément au sens heideggérien de la commissibilité, les formes engendrées par la nature ne sauraient alors valoir plus que celles que la technique peut elle-même synthétiser. Si les organismes naturels résultent d'un arrangement moléculaire possible, s'ils ne sont que « la manifestation matérielle et formelle d'une information immatérielle » (Heims, 2019), il devient envisageable de leur substituer d'autres formes de présence, jugées plus performantes, moins nuisibles ou simplement plus ludiques. En régime de réécriture de la vie, les formes naturellement données n'apparaissent plus que comme des occurrences provisoires d'une trame génétique potentiellement riche de toutes les reprogrammations possibles. L'hyper accessibilité des formes organiques signifie, en d'autres termes, leur *nivellement* de principe.

Dans ce cadre, on comprend que le rapport au réel devienne simultanément calculatoire et miraculeux. C'est ce que constatait déjà Heidegger :

On appelle aujourd'hui précisément "miracle" ce qui repose exclusivement sur la planification et le calcul et peut chaque fois être réitéré avec une précision accrue [...]. Ce miraculeux-là est tenu pour ce qui seulement est le "réel" — l'étant — en sorte que le "monde" est à présent plein de "miracles", comme jamais auparavant (Heidegger, 1938-1939).

La chimère génétique est à la fois miraculeuse, parce qu'elle rompt avec l'ordre naturel des vivants, et calculable, puisqu'elle est le résultat attendu d'une programmation. Le réel informationnellement réduit déborde en ce sens de « créatures miraculeuses », à la fois impossibles et fabricables, contradictoires et pourtant productibles. Et si chaque créature peut désormais sortir du cercle de son possible, c'est parce que le vivant, ayant cessé d'exister pour lui-même, n'apparaît plus que comme matière première de notre activité de réécriture.

Conclusion

La contradiction initiale du génie génétique était de concevoir l'organisme sous la forme d'un système d'informations reprogrammables, mais de ne pouvoir engager sa reprogrammation que sous la forme d'un procédé en son fond hasardeux. La modalité d'intervention sur le vivant contredisait ainsi le présupposé qui la rendait légitime, et la commissibilité formelle demeurait seulement « de principe », simple intention

directrice dénuée de tout opérateur réel d'effectivité. Le vrai sens de la révolution CRISPR n'est que de résoudre cette contradiction : étendant la logique du programme de l'organisme à l'outil de sa reprogrammation, le moyen rejoint la fin, et la commissibilité formelle se trouve enfin dotée d'un dispositif pleinement opératoire de déploiement.

Au regard de l'ontologie supposée par ce dispositif, la technoscience contemporaine ne saurait alors se comprendre comme une simple déclinaison du projet initial de la science moderne. En elle, une autre logique se trouve à l'œuvre, qui entend faire du réel la simple matière première de son entreprise de reprogrammation (Dulau & Morano, 2020).

Références

Bensaude-Vincent et Benoit-Browaëys. *Fabriquer la vie. Où va la biologie de synthèse ?* (2011). Paris, Seuil (p. 10).

Descartes. *Discours de la méthode* (1637). Sixième partie.

Doudna & Sternberg. *Un coup de ciseaux dans la Création. Crispr-Cas9 : le redoutable pouvoir de contrôler l'Évolution* (2020). Trad. Bosseau. Danemark, H&O éditions (p. 14).

Doudna & Charpentier (2012). *A Programmable Dual-RNA-Guided DNA Endonuclease in Adaptive Bacterial Immunity*. *Science*. Volume 337.

Doudna & Charpentier (2014). *The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9*. *Science*. Volume 346.

Dulau & Morano (2020). *L'âge du Minotaure. Penser la technique*. Paris, Kimé. Livre I, chapitre 1.

Guénancia. *Lire Descartes* (2000). Paris, Gallimard. Deuxième partie, III.

Heidegger. *La question de la technique*. In *Essais et conférences* (1954). Paris, Gallimard.

Heidegger. *Réflexions XI. Cahiers noirs, 1938-1939*. Paris, Gallimard, 2018. Trad. P. David (modifiée). § 38 (p. 396).

Heims. *Infravies. Le vivant sans frontières* (2019). Paris, Seuil (p. 135).

Nicholson (2013). *Organisms Machines. Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*. Volume 44, p. 669-678.

Zivohlana. *La saga CRISPR. La révolution génétique qui va changer notre espèce* (2021). Paris, Flammarion. Chapitre 6.