

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Remerciements.....	viii
Introduction.....	1
Première partie.....	9
Chapitre 1 – Méthode mécaniste et exigence vitaliste : Le problème des relations entre la connaissance et la vie.....	10
La philosophie mécaniste.....	11
La théorie cartésienne des « animaux-machines »	14
La connaissance et la vie.....	16
L’exigence vitaliste	22
Conclusion	25
Chapitre 2 – Les normes et la spécificité de la connaissance du vivant.....	27
L’expérience du malade	28
La normativité vitale	32
Conséquences pour les sciences du vivant.....	36
La médecine comme technique : une critique du positivisme.....	38
Conclusion	41
Chapitre 3 – L’analogie technique et la connaissance du vivant	42
Mécanisme et finalité	43
L’origine vitale des machines	48
Plasticité et rigidité : le continuum entre l’organisme et la machine	52
Le rôle des modèles techniques : du mécanisme à la cybernétique	56
Conclusion	61
Deuxième partie.....	63
Chapitre 4 – L’ingénierie du vivant	64
De l’étude du vivant à sa synthèse	65

Extraire la complexité du vivant	72
Un exemple de réduction de la complexité: la standardisation du vivant	74
Quelle vision de la technique pour la biologie de synthèse?.....	77
Conclusion	83
Chapitre 5 – Entre connaissance et savoir-faire	84
Le bricolage de l’ingénieur	85
La nature contre l’ingénieur?	91
La biologie de synthèse au-delà des machines.....	94
Plasticité et biologie de synthèse.....	97
Conclusion	101
Conclusion – Remettre le mécanisme à sa place « dans la vie et pour la vie »	102
Bibliographie	110

Liste des figures

Figure 1 : Modélisation du circuit génétique « repressilator » (Elowitz et Leibler, 2000).....	70
Figure 2 : Synthetic Biological Open Language: http://sbolstandard.org/visual/	76

Remerciements

J'aimerais d'abord remercier mes amis et ma famille proche, dont la confiance a été indéfectible depuis le début de mes études en philosophie. Un merci particulier à ma copine Elisabeth qui, malgré son humour parfois narquois à l'égard de ma vocation, n'a pas manqué de m'apporter un soutien constant au cours des dernières années. J'aimerais aussi remercier les membres du GREME, notamment Louis-Étienne, Sandra, Frédéric, Héloïse et Jimmy, pour leur amitié ainsi que pour les discussions passionnantes qui ont permis de nourrir ces réflexions.

Enfin, j'aimerais adresser un remerciement particulier à Marie-Hélène Parizeau pour la confiance qu'elle m'a accordée depuis le début de ce projet de mémoire. L'approfondissement des questionnements philosophiques qui ont motivé ce projet n'aurait pas été possible sans ses conseils à la fois avisés et inspirants.

Introduction

Il est commun, tant dans la vie courante que dans les sciences de la vie, de comparer les phénomènes organiques aux objets techniques qui nous sont familiers. On constatera assez aisément l'importance d'une telle analogie en portant attention au vocabulaire qui, couramment, accompagne les différentes techniques et disciplines prenant pour objet le vivant. Les neurosciences, par exemple, puisent dans l'informatique non seulement un champ lexical, mais aussi et par le fait même des concepts qui ne sont pas sans incidence sur l'interprétation et la compréhension du fonctionnement du cerveau. Ainsi parlera-t-on souvent des neurones en termes de réseaux, ou de la pensée en termes de calcul et de computation. Mais s'il est courant de comparer ainsi le cerveau à un ordinateur, il est moins courant de s'interroger sur la portée, la valeur et la signification réelle de ces associations. L'objet technique y fait-il simplement figure de métaphore, ou bien traduit-il une analogie réelle, une réduction du vivant à la matière? S'il ne s'agit que d'une métaphore, sans doute pourrions-nous supposer que cette évocation fréquente de l'objet technique pour comprendre l'organisme viserait moins à affirmer une position ontologique forte qu'à comprendre de façon un peu plus intuitive le vivant, à l'aide de concepts qui sont familiers à l'être humain. Mais s'il s'agit d'une analogie, on énonce alors quelque chose de fondamentalement différent; on pose l'existence d'une correspondance réelle des rapports entre l'objet technique et le vivant. Or, en considérant les différents usages du modèle de la machine pour interpréter les phénomènes biologiques, force est de constater que les métaphores semblent être parfois un peu plus que des métaphores; qu'elles font preuve d'une telle persistance qu'il serait presque légitime de se demander si la technique humaine ne constituerait pas en fait une sorte de modèle privilégié menant à la compréhension de la vie.

Il est vrai que cette seconde option, que l'on pourrait qualifier préalablement de « réductionniste »¹, soulève son lot de résistances. Contre la tentation de réduire le vivant à

¹ Le biologiste et philosophe Francisco J. Ayala distingue 3 formes de réductionnisme biologiques: ontologique, méthodologique et épistémologique. Selon le réductionnisme ontologique, le vivant n'est composé de rien d'autre que ses composantes inorganiques. Le réductionnisme méthodologique ne confère pas de statut particulier au vivant mais suggère tout de même que l'étude du vivant doit obligatoirement passer par l'analyse de ses composantes inorganiques. Quant au réductionnisme épistémologique, il pose que les sciences du vivant

ses propriétés matérielles, il n'est pas rare que l'on s'insurge : « Comment ma conscience pourrait-elle être le résultat déterminé d'un programme ou d'une configuration de mécanismes? N'ai-je pas l'impression d'avoir une volonté, d'exprimer des préférences, de faire des choix? » C'est ainsi que l'on peut voir se dessiner de prime abord une opposition entre deux postures, ou entre deux façons de réagir au réductionnisme. L'une, que l'on pourrait qualifier d'objective, considère légitime d'appliquer au monde organique les méthodes de la connaissance scientifique. Elle vise à connaître; et pour connaître, il faut bien qu'elle puisse mesurer et analyser son objet d'étude. Or, tout principe faisant appel à autre chose qu'à des propriétés matérielles ne lui semble pas être accessible à la mesure. C'est ainsi qu'il lui faut, pour mener à bien ses ambitions, poser que le vivant s'explique par des mouvements déterminés au niveau physico-chimique, produisant ultimement l'apparence ou l'illusion d'un mouvement autonome. À l'inverse de cette première posture, on retrouvera une seconde attitude, plus subjective, qui se représente au contraire la vie du point de vue du vivant lui-même. Puisqu'elle ressent, pense et agit sur le monde, la vie lui paraît être un pouvoir irréductible, une force échappant en droit au déterminisme de la matière. Il lui semble donc que la vie est première par rapport à l'ambition de l'expliquer, et qu'on ne saurait la décomposer sans la perdre de vue².

Peu de disciplines semblent aujourd'hui exposer cette tension aussi manifestement que la biologie de synthèse. Alliant biologie et ingénierie, ce domaine scientifique et technique regroupe des programmes et des visées multiples, mais consiste majoritairement à concevoir des réseaux de gènes qui, une fois intégrés à des organismes, accompliront diverses fonctions utiles telles que la synthèse de composés pharmaceutiques ou la production de biocarburants (Bensaude-Vincent et Benoit-Browaëys, 2011). Or, à en croire les discours les plus médiatisés, cette discipline encore jeune en serait aujourd'hui à l'orée d'une reconstruction entière du vivant. Craig Venter, un chercheur américain particulièrement renommé pour ses exploits en matière de séquençage du génome humain, prétendait ainsi en 2010 avoir conçu « (...) la première espèce capable de se reproduire ayant pour parent un

doivent en principe pouvoir être réduites à des cas particuliers dérivés des sciences physiques (Ayala, 1987). Il est question ici de réductionnisme ontologique.

² La distinction entre ces deux postures est inspirée d'une formulation de Canguilhem (Canguilhem, 2003, p. 111).

ordinateur »³. Si on pourrait reprocher à Venter un certain abus de langage, il demeure que lui et son équipe, après avoir modélisé par ordinateur puis synthétisé chimiquement une séquence ADN, sont effectivement parvenus à transposer celle-ci dans une bactérie *Mycoplasma mycoides*, concevant ainsi le premier être vivant ayant un génome entièrement artificiel (Gibson et al., 2010). Cet exploit, et bien d'autres, sont ainsi parfois interprétés comme des preuves de concept en faveur de la réductibilité de la vie à la matière. Les dispositifs conçus par la biologie de synthèse, qui sont à la fois des êtres vivants et des objets techniques, semblent conforter l'idée d'une identité entre la vie et la machine.

On entrevoit déjà, à ce stade, comment ces possibilités soulèvent des enjeux qui ne sont pas seulement d'ordre scientifique, mais également d'ordre technique et éthique. Quel statut, par exemple, doit-on conférer à ces techniques vivantes? Quel niveau d'artificialité doit-on leur attribuer? Et, de façon plus fondamentale, comment ces objets modifient-ils notre compréhension de la vie, de la machine et de la technique humaine? Ces interrogations philosophiques, loin d'être banales, sont susceptibles d'avoir une incidence normative sur des enjeux tels que la biosécurité ou la brevetabilité du vivant⁴, prolongeant par exemple les débats entourant l'attribution des statuts « artificiel » ou « naturel »; débats qui concernent depuis plusieurs années déjà la production d'OGM, le séquençage de génomes et la production de biotechnologies en général. Mais au-delà de ces enjeux et de façon plus fondamentale, ces interrogations nous semblent également susceptibles d'avoir des implications sur notre compréhension de nous-même et sur notre relation technique au monde.

Pour éclairer et approfondir ces questions, la pensée de Georges Canguilhem (1904-1995) est selon nous d'une richesse et d'une pertinence particulière. Formé en philosophie et en médecine, parfois qualifié d'historien des sciences, Canguilhem s'est surtout consacré, pour une bonne partie de sa vie, à des problèmes philosophiques relatifs à la vie et à la

³ « *This is the first self-replicating species that we've had on the planet whose parent is a computer* », déclaré lors d'une conférence de presse le 10 mai 2010, voir: <http://www.nytimes.com/2010/05/21/science/21cell.html>

⁴ Les questions de propriété intellectuelle et de gestion des risques constituent les principaux enjeux discutés en lien avec la biologie de synthèse. Voir par exemple le rapport français de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), disponible sur : <http://www.senat.fr/opecest/>.

connaissance du vivant⁵. Sa thèse de médecine, *l'Essai sur quelques problèmes concernant le normal et le pathologique* (1943), souvent considérée comme son ouvrage le plus renommé, donne bien le ton de ses travaux philosophiques : on y voit se constituer un champ de recherche bien délimité autour de l'histoire de la biologie et de la médecine, avec une attention particulière pour la généalogie et la signification des concepts biologiques. Attaché à restituer l'historicité des discours scientifiques, Canguilhem est en cela fidèle à une méthode parfois qualifiée d'« épistémologie historique », méthode ayant plusieurs points communs avec celle de son prédécesseur Gaston Bachelard (1884-1962), qu'il remplacera à partir de 1955 à la direction de l'Institut d'histoire des sciences et des techniques de l'Université de Paris (Méthot, 2013).

Au-delà de ce champ d'intérêt en apparence circonscrit, l'œuvre de Canguilhem comporte cependant une portée philosophique considérable dépassant largement le cadre de la science et de son histoire. Si la vie occupe une place si importante dans ses essais, c'est dans la mesure où elle est *valorisation*, c'est-à-dire dans la mesure où elle exclut et préfère certains états de faits. La vie ne fait pas que subir, comme les objets inertes, les conditions de son milieu; elle institue au contraire des normes, un sens, des valeurs. Ce concept de valeur, central chez Canguilhem depuis ses textes de jeunesse – et qui n'en viendra que plus tard à être identifié à la vie biologique⁶ – explique la vigueur avec laquelle il s'opposera aux visions du monde physicalistes et défendra sans cesse l'irréductibilité du vivant à la machine ou à la matière. La distinction entre le fait et la valeur ou, pour reprendre une formulation de Canguilhem, entre une « existence » et une « exigence », sera comme nous le verrons d'une importance cruciale dans sa philosophie de la technique et dans sa critique du mécanisme.

Ce mémoire consistera donc à puiser dans les nombreuses réflexions de Canguilhem concernant la vie et la machine pour diriger et alimenter une exploration des enjeux actuels

⁵ Plus précisément, selon ses propres dires : « Je ne suis pas véritablement un historien des sciences, je suis en fait un professeur de philosophie qui s'intéresse à un certain nombre de questions, qui sont les rapports entre la philosophie et la science et en particulier celle de la fabrication, de la naissance, de l'importation et de l'exportation d'un certain nombre de concepts interprétatifs de fonctions biologiques ». Cette déclaration est issue d'un entretien accordé en 1972 intitulé « La médecine et son histoire »; consulté dans Canguilhem, 2015, p. 41.

⁶ Camille Limoges écrit à ce propos, dans son introduction au Tome IV des œuvres complètes de Canguilhem : « (...) le mouvement de sa méditation et de ses travaux vient (...) de sa philosophie des valeurs puis de l'investissement de celle-ci dans sa philosophie biologique, dans la compréhension des ressorts de l'activité normative du vivant » (Canguilhem, 2011, p. 41).

de la biologie de synthèse. Il ne s'agira pas de deviner ce qu'aurait dit Canguilhem face à tel ou tel problème, mais de montrer dans quelle mesure ses critiques demeurent d'actualité dans un contexte où la frontière classique entre l'organisme et nos objets techniques semble être de plus en plus floue. Il ne s'agira pas non plus de prétendre poser des limites épistémologiques aux biologistes de synthèse, ce qui serait d'ailleurs tout-à-fait contraire aux exigences de ce philosophe qui, bien que pouvant être dans une certaine mesure qualifié de « vitaliste », a toujours considéré qu'il n'était pas du ressort de la philosophie de prescrire au scientifique⁷. Si le philosophe a son mot à dire à propos de la science, c'est parce que les concepts scientifiques ne sont justement pas confinés à la science, qu'ils sont parfois « importés » ou « exportés » hors du cadre scientifique. Suivant ces principes méthodologiques, nous effectuerons une lecture de la biologie de synthèse en portant une attention particulière aux pratiques, aux techniques et aux discours de ses acteurs, en prenant bien soin de ne pas trahir leurs acquis ou leurs conclusions d'ordre scientifique. À partir de cette interprétation, nous tenterons d'évaluer la pertinence et l'actualité de la vision du vivant de Canguilhem, ainsi que des critiques qu'il adressait aux philosophies réductionnistes ou mécanistes.

Ce mémoire sera divisé en deux parties. Une première partie portera spécifiquement sur la pensée de Canguilhem, plus précisément sur la question des relations entre la technique et le vivant. Le texte posant de façon la plus directe cette question est sans doute « Machine et organisme », publié dans le recueil *La connaissance de la vie* (1952) et issu d'une conférence prononcée en 1946 sous le titre initial « Mécanisme et organisme ». Les thèses qui y sont développées seront celles qui, principalement, nourriront notre réflexion sur les enjeux de la biologie de synthèse. Nous avons cependant jugé nécessaire pour notre propos de replacer ces thèses dans le contexte plus large de la philosophie biologique de

⁷ Ainsi, le vitalisme de Canguilhem et sa critique du mécanisme ne consistent pas à poser des interdictions aux sciences biologiques. Toujours selon sa méthode d'épistémologie et d'histoire des sciences, il s'agit plutôt pour lui d'évaluer des concepts en portant une écoute attentive à l'évolution des discours et des découvertes scientifiques : « (...) nous prions volontiers qu'en matière de philosophie biologique, on veuille bien ne pas déconsidérer d'avance (...) toute tentative de spéculation conservant sa liberté, non pas évidemment à l'égard des faits scientifiques bien établis, mais du moins à l'égard des conclusions philosophiques ou pseudo-philosophiques que quelques savants pensent devoir en tirer, tout en se flattant cependant de ne jamais quitter le terrain solide de leur savoir expérimental » (Canguilhem, 2015, p. 312).

Canguilhem⁸. Pour ce faire, nous débiterons par caractériser l'opposition classique entre mécanisme et vitalisme (**chapitre 1**), afin de situer au mieux la position de Canguilhem par rapport à ces deux postures. Nous verrons que le nœud du problème est que la connaissance objective se heurte à un premier obstacle lorsqu'elle entreprend de réduire le vivant à l'inertie, puisqu'elle élimine de ce fait l'idée même de vivant, auquel nous conférons généralement un sens ou une finalité. Canguilhem entend cependant dépasser cet antagonisme en replaçant la connaissance objective elle-même dans son histoire biologique et en insistant sur l'irréductibilité et la préséance chronologique de cette « exigence » vitaliste.

Ces réflexions nous conduiront ensuite (**chapitre 2**) à nous interroger sur les conditions permettant d'articuler cette exigence de sens, qui caractérise la philosophie biologique de Canguilhem, à la connaissance objective du vivant. Il s'agira au fond de préciser cette relation complexe entre la science et le vivant. Cette question, centrale à l'*Essai sur quelques problèmes concernant le normal et le pathologique* (1943), est inséparable du concept de « normativité biologique », auquel nous consacrerons une bonne partie de notre second chapitre. Nous verrons que même les faits vitaux les plus élémentaires traduisent pour Canguilhem une activité normative qui est à distinguer des lois que l'on retrouve par exemple dans les sciences de la matière. Cette normativité est ce qui constitue la spécificité de l'objet des sciences de la vie; elle doit être prise en compte pour conférer un sens biologique à toute analyse scientifique du vivant.

Cette présentation générale du problème de la connaissance objective du vivant chez Canguilhem nous permettra de mieux aborder son traitement du problème de la technique et de l'assimilation du vivant à la machine (**chapitre 3**). Nous verrons que ce que Canguilhem remet avant tout en question, c'est l'opposition, traditionnellement posée depuis Descartes, entre mécanisme et finalisme. Si la machine peut effectivement servir d'*explication* à un vivant ou à ses fonctions, la *compréhension* de l'origine des machines ne se fait pas sans référer à une dimension vitale, à une action technique finalisée, orientée en fonction de

⁸ Le projet de « philosophie biologique » de Canguilhem est à distinguer d'un projet d'épistémologie ou de philosophie des sciences. Il consiste avant tout en une « philosophie des valeurs » informée par les théories et les pratiques biologiques. Sur la philosophie biologique de Canguilhem, voir l'introduction de Camille Limoges au tome IV des œuvres complètes : (Canguilhem, 2011).

besoins authentiquement organiques. Ainsi, si l'on peut effectivement, dans une certaine mesure, trouver dans les machines humaines un modèle explicatif des fonctions organiques, il n'en résulte pas que le vivant soit privé de finalisme. En fait, Canguilhem renverse se raisonnement en remplaçant le mécanisme lui-même dans une histoire de la vie et en le renvoyant à sa finalité biologique.

C'est ainsi qu'une réflexion sur le sens et l'origine des machines est inséparable selon Canguilhem d'une réflexion plus large sur l'action technique elle-même. Si la philosophie mécaniste arrive en apparence à se débarrasser du finalisme, c'est parce qu'elle « se donne » des machines en évoquant la raison humaine. Or, en s'appuyant notamment sur de nombreux travaux d'ethnologues de son temps, Canguilhem viendra montrer au contraire l'origine biologique et l'irréductible dimension vitale de toute action technique. La médecine est à ce titre un exemple particulièrement éclairant : bien que pouvant être informée par la science et la raison, elle se rapproche avant tout en droit d'une activité proprement biologique, dans la mesure où elle vise à ajuster l'être humain à ses conditions d'existence.

C'est à partir de cette réflexion sur la technique que nous aborderons, dans notre seconde partie, le cas de la biologie de synthèse. Dans un premier chapitre (**chapitre 4**), nous entreprendrons d'abord d'analyser la vision de la technique présente dans les discours et les ambitions de la biologie de synthèse. Pour ce faire, nous décrirons l'esprit ingénieur qui caractérise l'une de ses approches les plus courantes et les plus institutionnalisées, celle qui consiste à faciliter le *design* et la conception de réseaux de gènes en vue de fabriquer des dispositifs utiles. Grâce à des pratiques de standardisation, de modélisation et d'abstraction, les ingénieurs poursuivant cette approche espèrent en arriver à « surmonter » la complexité du vivant afin d'obtenir une prévisibilité et une facilité de conception analogues à celles que l'on retrouve par exemple dans les systèmes électroniques. Nous montrerons que cette attitude est ambiguë : bien que traduisant effectivement une vision « cartésienne » de la technique, c'est-à-dire envisagée comme l'application raisonnée d'un savoir, elle demeure avant tout une attitude pragmatique qui a très peu à dire sur une ontologie du vivant. Inversement, c'est souvent dans la mesure où le vivant est perçu comme étant éloigné de nos machines que les ingénieurs travaillant en biologie de synthèse jugent approprié de réduire son caractère à la fois complexe et imprévisible.

Après avoir examiné ces discours, nous porterons une attention particulière aux techniques et aux pratiques concrètes de la biologie de synthèse (**chapitre 5**). Ce chapitre sera pour nous l'occasion de montrer qu'une dimension correspondant à la vision de la technique de Canguilhem est bel et bien présente dans ces pratiques. En effet, le vivant dans son intégralité sert aujourd'hui à la fois de modèle, d'outil et de milieu technique pour bien des ingénieurs. La complexité du vivant, plutôt que d'être entièrement maîtrisée ou surmontée, est couramment instrumentalisée d'une façon qui correspond très peu au paradigme de l'ingénieur véhiculé dans les discours. Nous montrerons que cette dimension exploratoire, qui nous semble être davantage admise et assumée dans certains travaux plus récents, ouvre la porte à une vision de la technique et du vivant correspondant à celle de Canguilhem, au sens où la vie y est prise à la fois comme point de départ et comme condition de l'activité technique.

Enfin, nous entreprendrons dans notre conclusion de synthétiser notre point de vue et d'explorer brièvement la portée normative de notre recherche. L'expression de Canguilhem selon laquelle l'on doit « remettre le mécanisme à sa place dans la vie et pour la vie (...) » (Canguilhem, 2005, p. 320) fournit, il nous semble, un résumé succinct de nos positions. L'exemple de la biologie de synthèse montre en effet que le mécanisme est *dans la vie*, dans la mesure où les dispositifs qui résultent de cette activité s'inscrivent obligatoirement le long de ce continuum biologique et chronologique entre l'organisme et la machine. Ces nouveaux objets seront d'autant plus « machines », c'est-à-dire d'autant plus la marque d'une technique humaine extériorisée et rationalisée, à mesure qu'ils se rapprocheront des mécanismes standards, rigides et prévisibles permis par la raison humaine. Inversement, ils seront d'autant plus « organismes » qu'ils s'éloigneront du contrôle étroit de l'homme, qu'ils comporteront une certaine autonomie ou, pour reprendre le vocabulaire de Canguilhem, qu'ils institueront leurs propres normes d'existence. Enfin, le mécanisme doit être pensé *pour la vie*, dans la mesure où l'activité rationnelle qui a permis les avancées actuelles en matière de biotechnologies ne serait pas possible si le vivant humain n'avait pas cette capacité de recul et de calcul face à ses propres conditions d'existence. En ce sens, l'origine et la finalité de la biologie de synthèse, comme celle de toute technique, n'est pas selon nous à chercher ailleurs que dans le vivant lui-même.

Première partie

Le problème de l'identification du vivant à la machine chez Georges Canguilhem

Chapitre 1 – Méthode mécaniste et exigence vitaliste : Le problème des relations entre la connaissance et la vie

La distinction que l'on retrouve chez Georges Canguilhem entre la méthode mécaniste et l'exigence vitaliste⁹ constitue selon nous une voie d'entrée par excellence au problème fondamental de l'articulation entre la connaissance et la vie. Cette distinction est révélatrice, dans la philosophie de Canguilhem, de cette difficulté à faire entrer la notion de vie dans les cadres méthodologiques de la pensée mécaniste.

Le choix des termes – méthode et exigence – laisse déjà supposer une différence d'attitude essentielle entre le mécaniste et le vitaliste dans leur approche du vivant. Le premier analyse, décompose son objet afin d'en obtenir une connaissance objective, tandis que le second tient son idée de la vie d'une exigence de sens que lui dicte son expérience subjective de vivant. La connaissance scientifique en général, pour Canguilhem, se range indéniablement du côté de l'analyse, et a donc au premier abord plus d'affinités avec le mécanisme. Cependant, comme nous le verrons, analyser et décomposer le vivant implique de le réduire à l'inertie, et donc d'annuler ce qui constitue notre compréhension du concept de vie. Ce chapitre viendra donc poser les bases d'un problème épistémologique primordial concernant la connaissance du vivant : celui des conditions de possibilité mêmes d'une telle connaissance. Nous y soulignerons l'importance de cette exigence que l'on retrouve tout au long de l'œuvre de Georges Canguilhem, qui consiste à prendre en compte le fait que la science du vivant est, avant tout, une science pratiquée par un vivant.

Pour débiter ce chapitre, une brève description de ce qu'est la philosophie mécaniste s'impose. Nous nous limiterons à la définition courante du mécanisme, tout en mettant l'accent sur les implications épistémologiques de son apparition au XVII^e et au XVIII^e siècle. Nous poursuivrons en examinant comment cette vision du monde s'est historiquement appliquée à la connaissance des phénomènes biologiques à partir notamment de la théorie des animaux-machines de René Descartes.

⁹ Voir surtout le chapitre « Aspects du vitalisme » dans *La connaissance de la vie* (2003).

Nous problématiserons ensuite cette approche mécaniste pour comprendre le vivant à partir d'une lecture du problème des relations entre la connaissance et la vie chez Canguilhem. Nous verrons que la connaissance, bien que trouvant selon Canguilhem sa raison d'être dans le vivant lui-même, échoue dans sa version mécaniste à saisir ce qui fait la spécificité de la vie. Nous opposerons enfin le mécanisme à la pensée vitaliste, à partir surtout du texte « Aspects du vitalisme », ce qui nous permettra de mettre en lumière cette situation paradoxale qui fait de l'homme un « vivant séparé de la vie par la science et s'essayant à rejoindre la vie à travers la science » (Canguilhem, 2003, p. 110).

La philosophie mécaniste

On attribue généralement à Descartes l'une des premières et des plus marquantes formulations d'une interprétation mécaniste des phénomènes biologiques¹⁰. Il est vrai que comparer les corps vivants à des mécanismes est alors loin d'être une pratique nouvelle dans l'histoire de la physiologie et de la médecine; comme en témoigne par exemple l'origine même du terme « organe », dérivé du latin « organum » désignant notamment un outil ou instrument de travail. La théorie des animaux-machines de Descartes doit cependant sa nouveauté au plan historique au fait qu'elle s'inscrit dans le sillage de cette vision originale du monde qu'est le mécanisme. Cette vision du monde, intimement liée à la naissance de la science moderne à partir du XVII^e siècle, mérite ici une brève explication, afin de mettre en lumière son caractère original ainsi que ses implications en ce qui a trait à la connaissance du vivant.

Dans son acceptation courante, le mécanisme est une conception matérialiste qui pose la matière et ses interactions comme principes explicatifs de l'ensemble du monde naturel. Empruntant au modèle de la machine humaine, les savants se réclamant du mécanisme estiment que ce sont les figures, les grandeurs et les mouvements qui méritent avant tout d'être considérés, puis évidemment exprimés sous forme de calcul, puisque la nature est, pour reprendre les mots de Galilée, telle un livre écrit dans la « langue mathématique »; et que cette langue est « le seul moyen desquels il est humainement possible d'en comprendre un mot »¹¹. Dans cette conception de la nature, la machine remplit un rôle qui peut être à la

¹⁰ Sur l'histoire du mécanisme dans les sciences de la vie, voir notamment : Duchesneau (1982).

¹¹ Selon la traduction de Christiane Chauviré (1979), p. 141.

fois ontologique et épistémologique : le monde peut être lui-même une machine ou bien il peut être analogue à une machine. Dans tous les cas, il est régi par des lois, les lois de la mécanique, qui sont en principe accessibles à la connaissance humaine. Si le monde obéit ainsi à des lois, cela implique que tous les objets naturels qui le composent sont soumis au même déterminisme. Chaque phénomène ayant lieu dans l'univers est donc, du moins en principe, prévisible. C'est ainsi qu'il suffit de connaître l'état présent d'un objet pour connaître son état futur, comme dans le cas paradigmatique d'un astre ou d'une pierre, dont la trajectoire future est déterminée par sa position et sa vitesse à un moment donné. À ce titre, les succès prévisionnels que connaîtront à partir du XVII^e siècle l'astronomie puis la physique classique conféreront en quelque sorte à la mécanique ses lettres de noblesse, et offriront aux savants un véritable modèle d'objectivité sur lequel fonder les bases de la science moderne.

Il est important de mesurer, sur le plan épistémologique, la portée du changement, souvent qualifié de « révolution »¹², qu'opère le mécanisme par rapport aux visions du monde antérieures. Les visions du monde précédant les sciences mécaniques, comme celles des philosophes grecs, se représentaient la nature comme un cosmos, comme un « Monde clos » dont on pouvait comprendre le sens à l'aide de notions téléologiques telles que les notions d'harmonie ou de perfection de la nature (Koyre, 1988, p. 12). Or, toute description qualitative de la nature se voit progressivement remplacée dans la philosophie mécaniste par des lois quantitatives à la portée de la connaissance et de l'ingéniosité de l'homme. C'est ainsi par exemple que la physique aristotélicienne, avec ses « mouvements naturels » décrivant l'action de la matière, sera progressivement substituée par le principe d'inertie. Une pierre ne chute pas vers le sol en raison d'un principe qui lui est interne, mais en raison des forces qu'elle subit passivement. Aussi, s'il est vrai que la physique antique et médiévale héritée d'Aristote attribuait un rôle explicatif à l'âme, qui était le moteur du mouvement chez le vivant, il en va tout autrement pour un monde dirigé par l'inertie, dans lequel les forces qui agissent ou qui agissaient sur un objet suffisent à en expliquer la mobilité. L'âme, ou tout autre principe introduisant de la finalité au sein du monde, se voient ainsi évacués des explications pouvant rendre compte des phénomènes naturels. On retrouve

¹² Voir notamment Kuhn (2016) et Koyre (1988).

par exemple ce projet de façon particulièrement explicite dans *Les Règles pour la direction de l'Esprit*, œuvre inachevée de Descartes exprimant la possibilité d'une science à la portée de l'homme : « Pour la connaissance des choses, il n'y a que deux points à considérer : nous qui connaissons, et les choses mêmes qui sont à connaître » (Descartes, 2009, p. 407). C'est par cette exclusion de la finalité dans les choses matérielles que la connaissance du monde devient alors accessible à l'homme et à sa mesure. C'est à partir de ce moment que l'être humain peut se concevoir comme étant le décrypteur des lois de la nature.

François Jacob, dans *La logique du vivant* (1970), décrit bien ce changement d'attitude sur lequel nous aimerions insister. Ce nouveau regard de l'être humain face à la nature est particulièrement significatif et revêt de profondes implications pour la structure même de la connaissance. Le monde n'était généralement pas, avant l'époque moderne, un objet d'investigation auquel le savant devait porter un regard extérieur. À cette époque, insiste Jacob, « il n'existe pas encore de lois de la nature, pas plus pour régir la génération des animaux que le mouvement des astres » (Jacob, 1970, p. 27). Cette absence de lois fait en sorte qu'il est incohérent de parler de la nécessité d'un phénomène. Les intentions de Dieu, ou encore l'âme ou le cosmos, peuvent à tout moment intervenir dans les événements du monde. Dans ce monde précédant la science moderne, « on ne distingue pas entre la nécessité des phénomènes et la contingence des événements » (Jacob, 1970, p. 27). Avec l'émergence de la pensée scientifique, la nature est cependant conçue autrement, et la connaissance s'acquiert dorénavant en décryptant ses lois immuables : « Dans cette relation nouvelle qui s'établit entre l'homme et la nature, le nœud de l'action se déplace. Le premier rôle passe de la volonté divine à l'esprit humain. L'intérêt se concentre, non plus sur la création de la nature, mais sur son fonctionnement à l'état présent. Au lieu d'une contemplation, d'une exégèse, d'une devinette, la science de la nature devient un décryptage » (Jacob, 1970, p. 37).

Descartes est peut-être le premier à avoir entrevu l'ampleur des conséquences théoriques et techniques de cette nouvelle vision du monde, comme en témoigne le passage souvent cité du « maître et possesseur de la nature »¹³. Sur le plan conceptuel, la conception mécanique du monde et l'exclusion du finalisme permet à l'homme de légitimer ses

¹³ Il est important de noter que Descartes est à ce sujet plus nuancé que ce que l'on admet généralement, comme le montre Canguilhem dans « Descartes et la technique » (Canguilhem, 1937). Nous reviendrons sur la conception de la technique chez Descartes au chapitre 3.

interventions techniques sur la nature. Sur le plan pratique, le pouvoir de prévision scientifique qui découle de la mécanique lui offre effectivement le potentiel d'étendre considérablement son emprise sur le monde. La connaissance, qui put autrefois être considérée comme une attitude contemplative et désintéressée, devient aux fondements même de l'action humaine. Ce changement d'attitude, loin de se limiter aux doctrines mécanistes du XVIIe siècle, demeurera une caractéristique dominante de la pensée scientifique tout au long de la modernité. On en retrouve, par exemple, une incarnation dans la formule célèbre employée par Auguste Comte dans son *Cours de philosophie positive* (1830-1842) : « science d'où prévoyance; prévoyance d'où action »¹⁴.

La théorie cartésienne des « animaux-machines »

La théorie des animaux-machines de Descartes, que l'on retrouve notamment formulée dans la cinquième partie du *Discours de la méthode* (1637) et dans le *Traité de l'homme* (1633), est souvent considérée comme fondatrice d'une interprétation mécaniste du vivant. Doit-on considérer la théorie cartésienne comme l'expansion prévisible de la vision mécaniste du monde que nous avons décrite, qui après avoir fait ses preuves dans le monde physique chercherait tout naturellement à s'étendre au monde vivant ? Il est vrai que plusieurs contemporains de Descartes, fascinés par la science classique émergente, ont élaborés des modèles mécaniques qui devaient servir d'explication aux diverses fonctions du vivant. William Harvey est à ce titre un exemple notoire, avec sa découverte de la circulation sanguine mobilisant une explication quantitative. Mais si on peut dire que la théorie de Descartes est effectivement en phase avec son temps et son œuvre, il n'en demeure pas moins drastiquement nouveau qu'une machine, conçue comme un agencement de mécanismes inertes, puisse servir de modèle d'explication aux phénomènes biologiques.

Canguilhem insiste en effet, dans « Machine et organisme », sur la « netteté » et même la « brutalité qui ne laissent rien à désirer » de l'apparition chez Descartes d'une interprétation mécaniste de la vie (Canguilhem, 2003, p. 136). Bien qu'il souligne que l'on puisse chercher maintes explications politiques et sociales à cette apparition¹⁵, il demeure

¹⁴ « (...) telle est la formule très simple qui exprime, d'une manière exacte, la relation générale de la *science et de l'art*, en prenant ces deux expressions dans leur acceptation totale » (Comte, 1975 [1835], p. 45).

¹⁵ Canguilhem a relevé certaines des explications avancées pour rendre compte de cette possibilité historique dans son chapitre « Machine et organisme ». Bien que la théorie cartésienne ne soit évidemment pas sans rapport avec une « modification de la structure économique et politique des sociétés occidentales », Canguilhem conclut

certain pour Canguilhem que la théorie des animaux-machines n'aurait pas pu naître dans l'esprit de Descartes sans l'existence d'automates construits par l'homme. Il fallait, comme condition de possibilité de la théorie cartésienne, qu'il existe des machines demeurant en fonction ou en mouvement longtemps après l'intervention humaine (montres, fontaines, horloges, etc.). Sans ce décalage entre l'effort et le mouvement, la machine est en effet toujours conçue comme étroitement dépendante de la finalité que lui a attribuée son constructeur. Ce n'est que lorsque l'on « oublie » ce rapport de dépendance que l'on peut imaginer des machines qui seraient indépendantes de l'homme : « (...) tant que le vivant humain ou animal « colle » à la machine, l'explication de l'organisme à la machine ne peut naître. Cette explication ne peut se concevoir que le jour où l'ingéniosité humaine a construit des appareils imitant des mouvements organiques, par exemple le jet d'un projectile, le va-et-vient d'une scie, et dont l'action, mis à part la construction et le déclenchement, se passe de l'homme » (Canguilhem, 2003, p.138).

Pour Descartes, l'animal et le corps humain sont en tous points semblables à ces automates : ils ne font pas exception à l'immuabilité des lois de la physique mécanique. Il est vrai que l'être humain a bien pour Descartes une âme, qui rend possible le *cogito*, lui conférant ainsi la raison et le distinguant des autres animaux. Mais si l'être humain conserve sa dignité grâce à la raison qui lui donne accès à la connaissance, il n'en demeure pas moins qu'il s'inscrit lui aussi par son corps dans les lois mécaniques de l'univers. C'est ainsi que la séparation de l'âme et du corps animal chez Descartes est une nouvelle instance de son dualisme, c'est-à-dire de la distinction entre la substance étendue et la substance pensante: « Il est assez connu, note Canguilhem, que l'identification par Descartes de l'animal (l'homme physique ou physiologique y compris) à l'automate machiné et machinal est le verso de l'identification de l'âme à la pensée (...) et de la distinction substantielle de l'âme indivisible et de la matière étendue » (Canguilhem, 1989, p. 550).

Ainsi le phénomène vivant, bien que n'étant pas nié, n'a pas pour Descartes une spécificité qui le distinguerait de la matière. Le fonctionnement des phénomènes biologiques s'explique entièrement par une identification à la machine. Les fonctions principales du

au terme de cette analyse que Descartes a « intégré un phénomène humain, la construction des machines, plus encore qu'il n'a transposé en idéologie un phénomène social, la production capitaliste. » (Canguilhem, 2003, p. 141).

vivant, telles que sa digestion, sa respiration, ou sa croissance, n'ont besoin que du mouvement des particules de matière (Descartes, 1996, p. 202). Les animaux ont leurs propres particules de matière, que Descartes nomme les « esprits animaux ». Nul besoin alors de postuler aux animaux une âme ou un principe vital : les fonctions physiologiques sont des mouvements involontaires et matériels, par opposition aux quelques mouvements volontaires (ceux de la raison) que permet l'âme humaine. L'animal-machine est donc un animal réduit à la matière. Il est soumis au même déterminisme universel, et se voit par le fait même privé de toute finalité naturelle¹⁶. En inscrivant ainsi la vie dans cette vision plus large du monde qu'est le mécanisme, Descartes vient la soumettre à la même juridiction que celle qui régit tous les autres objets du monde. Les lois des mécanismes du corps sont à décrypter, au même titre que les lois expliquant le mouvement des astres. Corrélativement, dans la mesure où ils s'inscrivent dans les lois de la nature, les corps sont susceptibles de recevoir l'intervention humaine informée par le savoir de la physique. C'est ce qui permet notamment à Descartes d'annoncer à plusieurs reprises les progrès considérables à attendre d'une médecine scientifique, et d'aller jusqu'à espérer que le vieillissement qui afflige les humains puisse un jour être contré (Canguilhem, 1937, p.80). De même, par cette théorie, l'emprise de l'homme sur l'animal se retrouve elle aussi légitimée. En retirant ainsi à l'animal la finalité naturelle que lui conférerait par exemple une âme, Descartes vient en effet justifier au plan moral une situation de domination préalablement existante: « La mécanisation de la vie, du point de vue théorique, et l'utilisation technique de l'animal sont inséparables. L'homme ne peut se rendre maître et possesseur de la nature que s'il nie toute finalité naturelle et s'il peut tenir toute la nature, y compris la nature apparemment animée, hors lui-même, pour un moyen » (Canguilhem, 2003, p. 142).

La connaissance et la vie

Cette tentative d'étendre la connaissance scientifique aux vivants en les insérant, de façon cohérente, dans une vision mécaniste du monde, ne se fera pas sans certaines difficultés majeures qui intéresseront particulièrement Canguilhem. L'interprétation mécaniste du

¹⁶ Pour Canguilhem, l'expulsion du finalisme dans la théorie des animaux-machine de Descartes n'est qu'apparente. Le finalisme n'est pas éliminé, il est simplement « déplacé » au niveau de la construction des machines. Nous élaborerons sur ce point dans notre troisième chapitre.

vivant pose en effet des problèmes qui ont trait à la relation entre la *connaissance* et le *vivant*, rapports que celui-ci entreprendra d'articuler tout au long de sa vie¹⁷.

« Connaître, c'est analyser. » L'introduction du recueil *La connaissance de la vie* (1965) s'ouvre sur cette proposition, à la fois courte et significative, qui s'avérera essentielle pour notre propos. Le mécanisme, chez Canguilhem, n'est rien de moins qu'une réalisation par excellence des exigences méthodologiques de la connaissance objective. Si connaître, c'est « décomposer, réduire, expliquer, identifier, mesurer, mettre en équations (...) » (Canguilhem, 2003, p. 11), on peut presque considérer que la naissance de la connaissance objective est contemporaine de celle de la mécanique classique, puisqu'elle marque comme nous l'avons vu le réel commencement d'une pensée qui décompose et mathématise le monde. En ce sens, Canguilhem reste fidèle aux thèses de Gaston Bachelard, son prédécesseur à la direction de l'Institut d'histoire et de philosophie des sciences, qui situait le tournant entre l'« esprit préscientifique » et l'« esprit scientifique » à la fin du XVIII^e siècle¹⁸. Le concept de connaissance objective est ici à assimiler complètement à la connaissance scientifique. Dans une entrevue télédiffusée en 1965, Canguilhem ira jusqu'à affirmer que « Connaissance scientifique est un pléonasme. (...) Il n'y a de connaissance que si un ensemble de propositions concernant un objet reçoit le qualificatif de vrai ou de scientifique » (Canguilhem, 2015, p. 1203). La connaissance est donc à distinguer de l'opinion, de la sensation ou de l'expérience vécue. Cela ne veut pas dire que ces différents modes d'appréhension du monde doivent être dévalorisés, mais simplement qu'ils ne peuvent pas, à proprement parler, relever de l'objectivité¹⁹. Or, les premiers succès retentissants de cette connaissance objective sont à situer précisément à la naissance de la science mécanique, qui vient poser la possibilité de « géométriser la nature » et « d'identifier réalité et quantité » (Canguilhem, 2015, p. 700). Dans son article rédigé pour l'entrée « Vie » de l'*Encyclopaedia*

¹⁷ « La philosophie de Canguilhem consiste en une réflexion sur la vie et sur la connaissance que nous pouvons en avoir. Les raisons de connaître scientifiquement la vie ne sont pas rapportées à un sujet idéal, situé à l'extérieur de la vie, mais référées à son objet lui-même, le vivant. L'épistémologie que développe Canguilhem, principalement de la médecine et de la biologie, dans ses différents livres, doit ainsi être comprise de manière purement interne, comme l'effort du vivant humain pour saisir la manière dont la connaissance modifie son rapport à la vie » (Le Blanc, 2007, p. 5).

¹⁸ Voir notamment *La formation de l'esprit scientifique* (1975).

¹⁹ Le terme « objectivité » est employé ici pour désigner un discours qui se veut uniquement descriptif et qui prétend traiter de la réalité sans faire appel à l'expérience personnelle. Sur l'objectivité comme valeur épistémologique en science, voir : Daston et Galison (2012).

Universalis, Canguilhem écrit en effet à propos de la connaissance que « (...) son premier succès historique majeur a été la mécanique fondée sur le principe d'inertie » (Canguilhem, 1989, p.549).

Cependant, Canguilhem nous oblige à ne pas oublier que cette connaissance doit être avant tout comprise dans son origine historique, c'est-à-dire biologique. La connaissance ainsi définie n'est donc pas entièrement désintéressée et détachée du monde. D'un point de vue biologique et évolutionniste, elle remplit d'abord une fonction pratique, qui est d'ajuster le vivant à ses conditions extérieures, à son milieu:

La pensée n'est rien d'autre que le décollement de l'homme du monde qui permet le recul, l'interrogation, le doute (penser c'est peser, etc.) devant l'obstacle surgi. La connaissance consiste concrètement dans la recherche de sécurité par réduction des obstacles, dans la construction de théories d'assimilation. Elle est donc une méthode générale pour la résolution directe ou indirecte des tensions entre l'homme et son milieu. (Canguilhem, 2003, p. 12)

Notons que cette définition de la connaissance, comprise dans sa perspective biologique, n'est pas sans rappeler la conception de l'intelligence défendue par Henri Bergson (1859-1941) dans *L'Évolution créatrice* (1907), sur laquelle il peut ici être utile de s'attarder. Bien qu'ayant été hostile à Bergson dans des années antérieures, Canguilhem en fera une lecture réactualisée à la fin des années 1930 en raison de son intérêt grandissant pour le vivant, et il commentera même en 1943 l'un des chapitres de *L'Évolution créatrice* à l'aune de ses études en médecine²⁰. Leurs conceptions respectives de la connaissance comportent des différences importantes, mais il demeure que la façon dont Bergson aborde ce problème dans *L'Évolution créatrice* trouve plus d'un écho chez Canguilhem. Tous deux sont en effet sensibles à l'importance d'intégrer la connaissance dans le vivant avant de pouvoir traiter de la connaissance de la vie. Bergson formulait ainsi cette exigence dans l'introduction de *L'Évolution créatrice* : « (...) une théorie de la connaissance, qui ne replace pas l'intelligence dans l'évolution générale de la vie, ne nous apprendra ni comment les cadres de la connaissance se sont constitués, ni comment nous pouvons les élargir ou les dépasser » (Bergson, 2013, p. IX). Pour Henri Bergson, l'intelligence est en effet une faculté de distanciation du réel, qui vise à analyser, prévoir et orienter l'action humaine sur le monde

²⁰ Ce commentaire est notamment disponible dans le tome IV des *Œuvres complètes* de Georges Canguilhem paru en 2015. Pour les filiations intellectuelles entre Canguilhem et Bergson, voir: Braunstein (2000) et Roth (2014).

matériel. L'intelligence, dans son essence même, est une faculté qui analyse et décompose son objet, en vue de permettre au vivant de s'ajuster à ses conditions extérieures. C'est pourquoi « elle ne se sent chez elle » qu'avec la matière inerte : « De là devrait résulter que notre intelligence, au sens étroit du mot, est destinée à assurer l'insertion parfaite de notre corps dans son milieu, à se représenter les rapports des choses extérieures entre elles, enfin à penser la matière » (Bergson, 2013, p. V). Pour Bergson, l'intelligence s'incarne donc tout à fait dans la science moderne, à plus forte raison dans la mécanique classique, qui n'est au fond rien d'autre que l'intelligence appliquée à la matière sous forme de calculs et de mesures (Bergson, 2013, p. 29).

Chez Bergson, cette intégration de l'intelligence dans l'histoire évolutive de la vie et l'affinité exclusive avec la matière inerte qui en découle est précisément ce qui explique l'échec de l'intelligence à saisir le phénomène vivant. Si le pur raisonnement est un aspect de la vie, ou pour le dire autrement une fonction naturelle apparue au cours du mouvement évolutif, il en résulte qu'il n'est pas en droit d'expliquer rétroactivement le vivant. L'intelligence étant inscrite dans la vie, elle ne peut qu'échouer à saisir le tout dont elle n'est qu'une partie :

[La philosophie évolutionniste] avait commencé par nous montrer dans l'intelligence un effet local de l'évolution, une lueur, peut-être accidentelle, qui éclaire le va-et-vient des êtres vivants dans l'étroit passage ouvert à leur action : et voici que tout à coup, oubliant ce qu'elle vient de nous dire, elle fait de cette lanterne manœuvrée au fond d'un souterrain un Soleil qui illuminerait le monde. (Bergson, 2013, p. VII)

On retrouve donc chez Canguilhem une définition générale de la connaissance qui partage certains de ses aspects avec la conception de l'intelligence chez Bergson. Tous deux soulignent en effet les affinités entre la pensée et le mécanisme, ainsi que l'intégration de cette pensée dans le vivant humain selon une perspective biologique. Cependant, il importe de souligner que Canguilhem ne suit pas jusqu'au bout la continuité que posait Bergson, au sens où la pensée, à partir du moment où elle devient science, opère une rupture avec le vivant²¹. C'est cette rupture qui légitime l'objectivité de la connaissance scientifique, qui lui

²¹ Xavier Roth écrit à propos de ces rapports : « Canguilhem refusera toujours de suivre Bergson lorsqu'il subordonne la connaissance à l'action. Le désaccord est particulièrement net sur la question des rapports normatifs entre technique et science. Chez Bergson, il n'y a pas vraiment de solution de continuité entre les deux fonctions : l'une et l'autre prolongent l'élan vital dans son « effort pour remonter la pente que la matière descend » (Bergson, 1959b [1907], p. 703). Pour Canguilhem, au contraire, il y a « un rapport de libération par rupture : l'essor de la science a pour condition l'échec de la technique. » (Roth, 2013)

permet d'aller au-delà des « perceptions » ou des « traditions techniques » qui sont d'ordre vital, et non d'ordre scientifique (Canguilhem, 2015, p. 1100-1101). C'est ici que vient alors se poser le problème épistémologique canguilhemien par excellence: comment et sous quelles conditions peut-on faire du vivant, en rupture avec la connaissance objective, l'objet même de cette connaissance?²²

Les raisons qui font que vie et connaissance peuvent sembler, sur le plan épistémologique, incompatibles, sont particulièrement bien exposées par Canguilhem dans son article de l'*Encyclopedia Universalis*. Le mécanisme, comme nous l'avons vu, a pour particularité de retirer toute finalité aux explications ayant trait au mouvement, en posant que tout objet ne fait que suivre les lois de la nature. C'est le principe d'inertie qui, en physique classique, viendra ainsi uniformiser et rendre également quantifiables tous les mouvements de la matière. Or, dans cet article, Canguilhem vient souligner la présence d'une incompatibilité entre l'inertie, que la pensée mécaniste doit méthodologiquement imposer aux objets afin de les soumettre à la mesure; et le sens ou la valeur qui dans notre compréhension et notre expérience subjective semble caractériser la vie. L'inertie, première loi du mouvement de Newton et principal axiome de la mécanique classique, pose que « Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état ». Un objet inerte est donc un objet qui possède toutes les caractéristiques que nous avons décrites précédemment : détermination rigoureuse, prévisibilité, absence de finalité naturelle. En deux mots, l'inertie est « inactivité et indifférence » (Canguilhem, 1989, p. 549). Il y a donc une apparente incompatibilité entre notre compréhension subjective de la vie et l'idéal de connaissance objective qui est véhiculé par la philosophie mécaniste. Cette indifférence des objets inertes s'oppose précisément à la vie telle qu'elle nous apparaît de notre point de vue de vivant. La vie se présente à la conscience comme une « force ou un pouvoir » (Canguilhem, 1989, p. 547) qui est bien à l'inverse d'une relation d'indifférence avec son

²² Cette situation paradoxale qui fait du vivant à la fois le sujet et l'objet de la connaissance est traitée en détails dans un texte plus tardif de Canguilhem intitulé « Le concept et la vie » et paru dans *Études d'histoire et de philosophie des sciences* (1983). Si l'intelligence et la faculté de connaître sont permises par la vie elle-même, il y a lieu de s'interroger sur la nature même de la connaissance. Aussi Canguilhem défend-t-il l'idée d'une immanence du concept dans la vie, idée selon lui soutenue par les progrès les plus récents en biologie moléculaire : « Définir la vie comme un sens inscrit dans la matière, c'est admettre l'existence d'un *a priori* objectif, d'un *a priori* proprement matériel et non plus seulement formel » (Canguilhem, 1983, p. 364).

milieu. Vivre, poursuit-il, c'est « valoriser les objets et les circonstances de son expérience, c'est préférer et exclure des moyens, des situations, des mouvements » (Canguilhem, 1989, p. 549). Dans notre expérience de vivant, la vie nous semble d'abord fondamentalement créatrice de sens, puisqu'elle valorise certains états plutôt que d'autres. Il y a donc une distinction, chez Canguilhem, entre le mouvement de la matière inerte, dénué de tendance, et le mouvement vital, orienté vers une finalité. On retrouve cette même idée formulée dans l'introduction à *La Connaissance de la vie* : « L'étude biologique du mouvement ne commence qu'avec la prise en considération de l'orientation du mouvement, car elle seule distingue le mouvement vital du mouvement physique, la tendance, de l'inertie » (Canguilhem, 20013, p. 15).

Cette idée est à mettre en correspondance avec une distinction chère à Canguilhem entre un fait, donnant lieu à des lois; et une valeur, donnant lieu à des normes. On retrouvera cette distinction, sous une forme ou une autre, dans la plupart des textes importants de Canguilhem. La norme diffère du fait dans la mesure où elle a une *visée*. Elle ne décrit pas simplement l'état actuel des choses, elle oriente par exemple l'action vers ce qui devrait être : « Une norme ou une règle c'est la détermination d'un mode de référence d'une Existence à une Exigence »²³. Or, la capacité de la vie à instituer de normes est ce qui vient la différencier de l'état d'inertie. Cette notion centrale de normativité méritera à elle seule l'attention de notre second chapitre, mais retenons pour l'instant que tant que l'organisme semble conférer un sens ou une valeur à sa propre vie, il apparaît par le fait-même contredire l'idée d'inertie. La pierre et l'astre quant à eux ne préfèrent pas un état à un autre. Ils « persévèrent » dans leur état actuel jusqu'à ce qu'une force externe ne les « contraignent », demeurant éternellement indifférents à toutes les modifications qu'ils pourraient subir.

Ainsi, le premier obstacle à la connaissance de la vie est, selon Canguilhem, contenu dans la méthodologie même de la connaissance objective. Si « connaître c'est analyser », on doit conclure que la condition première de possibilité de la connaissance implique la « négation systématique, en tout objet auquel elle s'applique, de la réalité des qualités que le

²³ Cet extrait est issu du cours « les normes et le normal » donné par Canguilhem en 1942-1943. Ce cours peut être consulté dans les archives du CAPHÉS, mais nous tirons pour notre part cet extrait d'une conférence présentée par Anne Fagot-Largeault au département de philosophie de l'Université Laval le 20 juin 2016. Notons en particulier ici l'usage du mot « exigence », qui reviendra pour décrire le vitalisme.

vivant humain identifie avec la vie (...) » (Canguilhem, 1989, p. 547). La pensée mécaniste doit par sa méthode imposer l'inertie, et se heurte donc à un paradoxe épistémologique lorsqu'elle en vient à vouloir s'étendre au vivant. Elle tente en effet, ce faisant, d'« expliquer un pouvoir au moyen de concepts et de lois initialement formés à partir d'hypothèses qui le nient » (Canguilhem, 1989, p. 549). La vie, que la science a l'ambition de prendre pour objet, échappe dans son acceptation première aux axiomes méthodologiques de cette même science.

L'exigence vitaliste

La doctrine mécaniste cartésienne tend ainsi à intégrer le vivant aux cadres formalisés et raisonnés qui formaient sa représentation du monde. Nous présenterons maintenant la position inverse, vitaliste, qui tend plutôt à affirmer l'originalité du vivant et son irréductibilité à la matière inerte. L'incompatibilité que nous avons relevée, qui oppose l'idée du vivant à la méthode mécaniste, vient expliquer ces « résistances renouvelées » (Canguilhem, 1989, p. 549) qu'ont historiquement opposées les vitalistes aux tentatives scientifiques de réduction de la vie à la matière. Comme nous le verrons, le vitalisme, tel qu'il est défini par Canguilhem, est à l'inverse une exigence de sens et de finalité qui vient révéler la présence même du vivant au sein de la connaissance scientifique.

La doctrine vitaliste est aujourd'hui souvent discréditée dans les manuels de biologie. Elle est parfois présentée à titre de curiosité et dépeinte comme une théorie dépassée, voire infirmée par l'expérience²⁴. La « force vitale » qui était posée par des vitalistes comme Paul-Joseph Barthez (1734-1806) ou Xavier Bichat (1771-1802) est ainsi présentée comme un postulat autrefois nécessaire mais rendu inutile par les découvertes ultérieures, au même titre qu'il n'est plus nécessaire par exemple de postuler un « éther » dans les sciences physiques afin d'expliquer la diffusion de la lumière. Pourtant, dans la mesure où le vitalisme consiste globalement à affirmer une spécificité du vivant, toute biologie qui le refuse se trouve réduite, ainsi que le remarque Canguilhem, à n'être qu'un « satellite » (Canguilhem, 2003, p. 105) des sciences physiques.

Or, selon Canguilhem, le vitalisme n'est pas à classer aux côtés des sciences périmées, puisqu'il constitue, d'un point de vue épistémologique, autre chose qu'une théorie

²⁴ Voir par exemple la définition du vitalisme présentée dans le manuel de biologie de Campbell et Reece (Campbell et Reece, 2007, p. 59-60)

scientifique. En effet, au-delà de son éventuelle valeur théorique et expérimentale, le vitalisme est avant tout une philosophie, une posture du vivant par rapport au monde qui se distingue de la posture mécaniste. Reprenant en partie une idée dont il donne le crédit au philosophe et historien des sciences Emanuel Rádl (1873-1942), Canguilhem décrit de la façon suivante la différence entre ces deux attitudes :

L'homme, dit-il, peut considérer la nature de deux façons. D'abord, il se *sent* un enfant de la nature et éprouve à son égard un sentiment d'appartenance et de subordination, il se voit dans la nature et voit la nature en lui. Ou bien, il *se tient* face à la nature comme devant un objet étranger, indéfinissable. Un savant qui éprouve à l'égard de la nature un sentiment filial, un sentiment de sympathie, ne considère pas les phénomènes naturels comme étranges et étrangers, mais tout naturellement, il y trouve vie, âme et sens. Un tel homme est fondamentalement un vitaliste. (Canguilhem, 2003, p. 111)

Le vitalisme s'oppose donc au mécanisme, non seulement dans sa représentation du vivant, mais plus fondamentalement dans sa façon même d'envisager son objet. Rappelant une posture phénoménologique, le vitaliste privilégie le fait vital à toute théorie rationnelle qui prétendrait l'annuler. La vie précède, en droit mais aussi chronologiquement, la connaissance raisonnée. Pour reprendre les mots de Guillaume Le Blanc, commentateur de Canguilhem : « Le vitalisme rappelle ainsi à la science, trop vite tentée d'expliquer sa légitimité pas la seule performance de ses opérations, que ses activités s'enracinent dans la vie comme valeur au même titre que les autres activités humaines » (Le Blanc, 2007, p. 44).

Il faut de nouveau retourner en médecine, foyer de la philosophie biologique de Canguilhem, pour bien apprécier cette définition du vitalisme. Celui-ci est en quelque sorte une « biologie de médecin sceptique à l'égard du pouvoir contraignant des remèdes ». (Canguilhem, 2003, p.109). Il correspond à une certaine attitude médicale, à une morale de médecin qu'il est possible de faire remonter à Hippocrate, qui consiste à accorder davantage de confiance et d'importance aux pouvoirs thérapeutiques naturels du vivant qu'aux interventions techniques humaines, ces dernières attirant plutôt une certaine méfiance chez les tenants de cette pensée médicale. C'est précisément cette confiance en la vie qui caractérise le vitalisme, que celui-ci soit médical ou scientifique. Cette définition, qui fait du vitalisme une exigence très générale, vient non seulement englober un nombre importants de savants : « Platon, Aristote, Galien, tous les hommes du moyen-âge et en grande partie les hommes de la renaissance étaient, en ce sens, des vitalistes » (Canguilhem, 2003, p. 112),

mais permet également de défendre le vitalisme contre les accusations qui en feraient une théorie scientifique réfutée ou une science périmée.

L'analyse philosophique du vitalisme par Canguilhem va donc de pair avec sa réhabilitation. C'est dans ce cadre par exemple que s'inscrit sa thèse principale de doctorat de philosophie, consistant en une étude d'histoire et d'épistémologie dans laquelle il retrace les origines du concept de réflexe, tout en montrant que ce dernier ne se réduit pas d'un point de vue historique aux doctrines mécanistes (Canguilhem, 1977). Dans la mesure où le vitalisme n'est pas à proprement parler une théorie scientifique, mais plutôt une attitude plus générale, il devient illégitime de rejeter *a priori* toute théorie qui se réclamerait de cette position. En tant que posture générale, le vitalisme permet en effet de former des concepts qui, éventuellement, pourront avoir une valeur scientifique : « On peut admettre que la vie déconcerte la logique sans croire pour autant qu'on s'en tirera mieux avec elle en renonçant à former des concepts » (Canguilhem, 1977, p. 1).

Bien que réhabilitant le vitalisme d'un point de vue historique, il faut noter que Canguilhem se distancie de sa version classique, dont la conception est surtout attribuée au biologiste Bichat. Dans son interprétation classique, le vitalisme accorde au vivant un pouvoir le distinguant de reste du monde matériel. La vie constitue une exception aux lois de la matière, elle est tel un « empire dans un empire » (Canguilhem, 2003, p. 123). Or, pour Canguilhem, une telle définition ne tient pas la route, puisqu'on ne peut se permettre de faire côtoyer ainsi deux ordres de réalité incompatibles et opposés, ce que l'on ferait en posant par exemple une force vitale qui ne répondrait pas aux mêmes lois que le reste du monde. En ce sens, on peut considérer Canguilhem comme étant véritablement anti-dualiste : soit, prenant l'attitude mécaniste, on efface entièrement la vie; ou soit, prenant l'attitude vitaliste, on inscrit la matière elle-même dans sa compréhension vitale. Dans la version canguilhemienne²⁵, le vitalisme ne consiste ainsi pas à poser une force opposée à la matière, mais simplement à reconnaître la préséance chronologique de la vie sur la connaissance de la matière. Il faut, selon Canguilhem, inscrire les sciences physiques elles-mêmes dans une histoire de la vie. Il ne s'agit donc pas pour Canguilhem de discréditer la raison au profit de

²⁵ Canguilhem ne se dit jamais clairement « vitaliste », bien que sa définition du vitalisme puisse inclure ses propres positions. Sur la relation entre le vitalisme et la philosophie biologique de Canguilhem, voir : Wolfe (2015), (2016).

l'originalité du vivant. Il s'agit plutôt de remettre en question la *primauté* de la raison, qui règne notamment dans la philosophie mécaniste, afin d'inscrire la connaissance humaine dans l'ordre des phénomènes vitaux. Guillaume Le Blanc synthétise ainsi cet aspect central de la philosophie de Canguilhem:

Nous atteignons au plus profond de la différence entre rationalisme et vitalisme. Si la raison, selon l'attitude rationaliste, est juge de la vie, c'est la vie qui, selon la philosophie biologique, devient juge de la raison. Ce renversement n'est cependant pas totalement réciproque. Car la vie jugée par la raison est neutralisée par cette dernière tandis que la raison, jugée par la vie, est intégrée à la vie, à titre de phénomène vital. L'ordre humain créé par la raison est moins nié qu'intégré à l'ordre vital. (Le Blanc, 2007, p. 43-44)

D'où l'idée, toujours chez Guillaume Le Blanc, de parler de la philosophie biologique de Canguilhem comme d'un point de départ pour une « anthropologie »²⁶. C'est à partir d'une connaissance de la vie que peuvent être connues, dans un second temps, les autres sphères de l'activité humaine. La vitalité est en effet chez Canguilhem un point de départ, un enracinement nécessaire sans lequel il n'y a pas de connaissance de l'homme. Sans pour autant signifier qu'il n'y aurait pas d'originalité humaine, cette exigence vise à affirmer la « présence à la vie » dans les activités humaine, qu'elles soient scientifiques, psychologiques ou sociales : « Il n'y a pas alors passage de l'ordre vital à l'ordre humain mais affirmation d'une présence à la vie dans l'ordre humain. La visée humaine est référée pour Canguilhem à une visée vitale, supposant la constitution d'une anthropologie biologique » (Le Blanc, 2010, p. 60).

Conclusion

À partir des positions mécanistes et vitalistes, nous avons présenté les principaux enjeux épistémologiques liés à une réduction du vivant à la matière. Nous avons en ce sens discerné deux attitudes. Le mécanisme, incarné de façon emblématique par Descartes, traduit une attitude rationaliste qui tend à annuler le vivant, à le décomposer en parties tel une machine. Il correspond aux méthodes générales de la connaissance objective, qui consistent à analyser et à décomposer. Le vitalisme, quant à lui, correspond précisément à l'attitude inverse, et consiste à refuser cette réduction. L'inertie que suppose la position mécaniste apparaît comme étant en contradiction avec la notion de vie. Dans sa version

²⁶ Canguilhem l'écrit lui-même en des termes semblables : « En conclusion, nous pensons que la biologie humaine et la médecine sont des pièces nécessaires d'une « anthropologie », qu'elles n'ont jamais cessé de l'être (...) ». (Canguilhem, 2003, p. 217-218)

canguilhemienne, le vitalisme ne consiste cependant pas à chercher des lois différentes de celles régissant la matière (en posant par exemple une force vitale), mais à inscrire la rationalité et la pensée mécaniste elles-mêmes dans l'originalité du vivant. Pour Canguilhem, les notions de sens, de norme et de valorisation sont essentielles à notre compréhension de la vie et précèdent chronologiquement la connaissance objective. Ces éléments nous serviront de point de départ pour un approfondissement du problème de la connaissance de la vie chez Canguilhem.

Chapitre 2 – Les normes et la spécificité de la connaissance du vivant

Si l'exigence vitaliste doit précéder la raison et la connaissance elle-même, comment une science du vivant est-elle alors possible ? La biologie contemporaine, avec l'avènement de la biologie moléculaire, a plutôt eu tendance à affiner l'analyse des constituants de l'organisme, ce qui à première vue entre en contradiction avec l'idée d'une reconnaissance de l'originalité de vivant. Comment, dans ce cas, l'objectivité de la connaissance rejoint-elle le vivant ?

Les lois, dans la tradition scientifique, posent un monde dont la matière est inerte, et viennent éliminer, en cherchant à s'étendre au vivant, cette apparente capacité des organismes à normaliser leurs conditions d'existence. Ce chapitre viendra préciser cette tendance à travers la notion centrale de normativité biologique. Pour Canguilhem, le concept de normativité est incontournable si l'on veut conférer un sens à tout discours concernant le vivant. Il est en quelque sorte à la biologie ce qu'un axiome est à la géométrie; il est un point de départ dont on ne peut se passer pour penser la vie. Guillaume Le Blanc écrit à ce propos, dans *Canguilhem et les normes*, « L'analyse philosophique de la vie ne peut se faire qu'à partir du concept de norme. Le concept de norme renvoie inévitablement à l'idée de vie. Le binôme vie, norme est donc indissociable. La vie est l'idée que le concept de norme permet de ressaisir » (Le Blanc, 2007, p.7). Une lecture de Canguilhem ne peut donc pas faire l'économie de ce concept.

La porte d'entrée qu'emprunte Canguilhem afin de décrire cette normativité vitale est l'expérience de la maladie. D'où l'importance de sa thèse de médecine qui est aussi son œuvre la plus connue, *l'Essai sur quelques problèmes concernant le normal et le pathologique*, qui montre notamment comment la maladie vient révéler l'effort du vivant qui consiste à instituer des normes et corrélativement à conférer un sens à son existence. Deux interrogations philosophiques sous-tendent cette œuvre : d'une part celle qui concerne les normes et le normal, et d'autre part la nature des rapports entre science et technique. On comprend dès lors l'intérêt authentiquement philosophique de Canguilhem pour la médecine, qui loin d'être comprise uniquement comme une science théorique, est aussi et surtout selon lui une technique prolongeant cet effort vital. La médecine, en tant qu'elle est située carrefour

entre la science, la technique et le vivant, est donc particulièrement apte à éclairer le problème que nous avons soulevé.

Cette section ne prétendra pas à une analyse intégrale de cette partie centrale de l'œuvre de Canguilhem qu'est *Le normal et le pathologique*, mais visera plutôt à relever les thèses essentielles qu'elle contient concernant la connaissance objective de la vie. Nous débuterons en montrant en quoi l'expérience de la maladie vient en effet révéler la normativité qui est essentielle au vivant, tout en expliquant pourquoi la pratique médicale ne peut en faire abstraction. Nous caractériserons ensuite cette normativité sur un plan plus conceptuel, à partir des distinctions établies dans *Le normal et le pathologique*. Nous pourrons alors le lien avec le problème qui nous intéresse en examinant comment cette normativité vient s'articuler aux sciences du vivant, notamment en ce qui a trait à la physiologie. Nous verrons enfin, à partir de ces considérations, pourquoi la médecine, selon Canguilhem, doit plutôt être rapprochée de la technique que de la science.

L'expérience du malade

Le normal et le pathologique est un livre qui peut être considéré comme fondateur de la philosophie biologique de Canguilhem, car il marque le début d'une réflexion générale sur les relations entre les sciences et le vivant. Il contient deux études assez éloignées l'une de l'autre, soit *l'Essai sur quelques problèmes concernant le normal et le pathologique*, thèse de doctorat de médecine publiée en 1943, et *les Nouvelles réflexions concernant le normal et le pathologique*, une série de textes publiée vingt ans plus tard dans le cadre d'une réédition de cette thèse. Nous nous attarderons pour commencer sur la première partie de *l'Essai*, qui porte sur l'analyse de ce que Canguilhem nomme le « dogme positiviste » de la médecine expérimentale.

Ce dogme, présenté à travers les écrits de Claude Bernard et d'Auguste Comte, consiste à affirmer, suivant le « principe de Broussais », que l'état normal et l'état pathologique ne diffèrent que par une variation quantitative. Emprunté au médecin français François Broussais (1772-1838), ce principe servira explicitement à Comte non seulement pour affirmer sa conception du vivant et de la maladie, mais aussi pour justifier sa philosophie

politique²⁷. Suivant ce principe, la maladie est avant tout conçue comme une altération mesurable s'éloignant, par l'excès ou par le manque, d'un juste milieu qui constituerait l'état normal. Or, il s'agit pour Canguilhem d'un « dogme positiviste » dans la mesure où le positivisme, tel que théorisé par Comte, cherche à fonder le discours philosophique sur les méthodes expérimentales de la science, en se débarrassant par le fait même de toute autre forme de spéculation. De même, Bernard et Comte entendent par ce principe écarter les appréciations qualitatives ou finalistes du discours médical afin d'en faire véritablement une science appliquée. Canguilhem montre qu'en défendant cette idée d'une identification du normal et du pathologique, Comte et Bernard entendent avant tout affirmer un primat de l'objectivité et de la rationalité scientifique dans la compréhension des maladies. Réduire la maladie à une mesure, c'est permettre une interprétation scientifique du corps malade conçu comme une machine défaillante.

La thèse que soutient ici Canguilhem est que dans la mesure où ils confèrent une priorité à la physiologie et à l'expérimentation, Comte et Bernard retirent par le fait même l'importance de l'expérience vécue du malade. En effet, en envisageant la médecine comme une science positive, tous deux sont moins enclins à voir dans la maladie un état qualitativement nouveau qu'une simple variation mesurable. Dans le cas d'Auguste Comte, la maladie est envisagée comme un outil de compréhension permettant à l'expérimentateur de déduire les « lois » d'une physiologie normale : « (...) l'étude scientifique des cas pathologiques devient un moment indispensable de toute recherche des lois de l'état normal » (Canguilhem, 2013, p. 27); alors que pour Claude Bernard, l'étude du normal constitue un moyen de trouver scientifiquement les moyens d'intervenir sur l'état pathologique : « Dans les sciences, c'est la théorie qui éclaire et domine la pratique. La thérapeutique rationnelle ne saurait être portée que par une pathologie scientifique et une pathologie scientifique doit se fonder sur la science physiologique » (Canguilhem, 2013, p.43). Dans les deux cas, la maladie ne diffère de l'état normal que par une variation quantitative, au même titre qu'un mécanisme ne sera plus fonctionnel s'il varie trop de son état standard. Une pathologie n'est plus alors qu'une défectuosité de l'organe analogue à la défectuosité d'une machine; elle peut

²⁷ « Comte se justifie d'affirmer que la thérapeutique des crises politiques consiste à ramener les sociétés à leur structure essentielle et permanente, à ne tolérer le progrès que dans les limites de variation de l'ordre naturel que définit la statique sociale » (Canguilhem, 2013, p. 40)

être expliquée par la mesure et réparée par une approche rationnelle. Il résulte de ce point de vue que l'expérience subjective du malade, pour qui la maladie est essentiellement un état de bouleversements et d'angoisse, est évacuée au profit d'une méthode scientifique objectivante : « La conviction de pouvoir scientifiquement restaurer le normal est telle qu'elle finit par annuler le pathologique. La maladie n'est plus objet d'angoisse pour l'homme sain, elle est devenue objet d'étude pour le théoricien de la santé » (Canguilhem, 2013, p. 17).

Or, la caractérisation qualitative de la maladie via l'expérience vécue du malade est pour Canguilhem un fait irréductible. L'identification même de la maladie trouve toujours son origine dans une dépréciation subjective : « Le fait que santé et maladie fonctionnent comme des représentations « vulgaires » avant de pouvoir être érigées en concepts scientifiques, conduit la réflexion en deçà des discours, vers la réalité primitive de la maladie » (Le Blanc, 2007, p. 29). Ce n'est pas la science elle-même qui nous confère une représentation de la maladie, mais bien le sentiment d'un bouleversement qui précède toute analyse scientifique. D'ailleurs, ce n'est qu'une fois qu'il est tombé malade que l'individu, inversement, peut éprouver ce qu'est la santé. « La santé, écrit Canguilhem dans ses notes de cours, c'est l'innocence organique »²⁸. Ce n'est donc d'abord que parce que l'être humain apprécie ou déprécie certains états que les concepts de maladie ou de santé acquièrent une signification. Canguilhem montre en ce sens que même Auguste Comte et Claude Bernard n'ont pu entièrement se passer de cet aspect qualitatif, « primitif », lorsqu'ils ont voulu identifier ce qui constituait une pathologie. Même lorsqu'une pathologie se prête bien à une analyse quantitative, comme dans le cas des expériences de Claude Bernard sur l'hyperglycémie, c'est néanmoins toujours par rapport à une norme préalable que l'on définit ce qui constituera des variations par rapport à l'état normal: « C'est par rapport à une mesure jugée valable et souhaitable – et donc par rapport à une norme – qu'il y a excès ou défaut. Définir l'anormal par le trop ou le trop peu, c'est reconnaître le caractère normatif de l'état dit normal » (Canguilhem, 2013, p. 25).

Cette difficulté relevée par Canguilhem est en partie attribuable à l'équivocité inhérente au concept de « normal », qui peut recouvrir à la fois deux sens distincts. Cette

²⁸ Cité par Anne Fagot-Largeault (2016).

ambiguïté est relevée dans la seconde partie de l'*Essai* (Canguilhem, 2013, p. 89) ainsi que dans l'article « Le normal et le pathologique » paru dans *La connaissance de la vie* (Canguilhem, 2003, p. 200). « Normal » peut en effet désigner d'une part un état de fait, c'est-à-dire une simple moyenne statistique déterminée avec objectivité; et d'autre part une conformité à un idéal, c'est-à-dire la correspondance à une norme subjective. Le terme « normal » est ainsi souvent employé avec ambiguïté, comme le montre son usage courant. Si l'on affirme par exemple d'un comportement ou d'un état qu'il est « normal », on peut signifier par là qu'il correspond à la moyenne d'une certaine population, mais bien souvent une telle affirmation implique également une valorisation, parfois implicite, de cet état. Or, la médecine telle qu'elle est envisagée par Auguste Comte et Claude Bernard maintient la confusion entre ces deux définitions. Le besoin de fonder scientifiquement et objectivement la médecine pousse ces derniers à tenter de réduire l'état « normal » à un fait quantitatif, mais ce faisant ils ne font qu'ignorer le fait que c'est plutôt le normal en tant qu'idéal qui définit l'objet même de la thérapeutique et qui guide la pratique médicale. Objectiver la maladie conduit ainsi à faire abstraction de ce qui lui donne un sens, c'est-à-dire la dépréciation primitive, vécue, d'un certain état physique.

On retrouve donc ici encore cette pensée fondamentale de Canguilhem selon laquelle la connaissance objective du vivant rencontre son principal obstacle dans le fait que la vie consiste à valoriser certains aspects de l'expérience. S'il n'y avait que des états de faits, il n'y aurait ni maladie, ni médecine. Ni même de santé d'ailleurs, puisque le vivant serait indifférent aux transformations physico-chimiques de ses constituants. Canguilhem écrit ailleurs dans ses notes : « (...) les concepts de santé et de maladie sont concepts normatifs, car les façons de vivre qu'ils désignent ne sont pas des états, c'est-à-dire des faits, mais des prises de positions, c'est-à-dire des valeurs. »²⁹ Voilà ce qui, précisément, problématise la connaissance du vivant et la rend fondamentalement différente des sciences physiques ou chimiques. En effet, comme nous le verrons maintenant, une norme se prête moins aux exigences d'une analyse que ne peut le faire par exemple une loi mécanique.

²⁹ Cité par Anne Fagot-Largeault (2016).

La normativité vitale

La conception de la maladie que nous avons décrite met en lumière une tension entre objectivité et subjectivité que nous avons déjà pu apercevoir au premier chapitre en traitant des lois de la nature posées par la philosophie mécaniste. Les lois de la Nature, dont l'idée même est née avec la science moderne, posent des états de fait. Elles caractérisent le monde par des principes généraux qui sont vrais de tout temps et en toute circonstance. L'idée de loi est ainsi la condition première d'une connaissance objective du monde physique. Les normes, cependant, diffèrent en ce qu'elles expriment ce qui pourrait être autrement. Elles confèrent un sens et « exigent » que les choses tendent vers ce sens. Comme l'écrit Guillaume Le Blanc, « si tout était normal dès le départ, les normes seraient remplacées par des lois » (Le Blanc, 2007, p.19). C'est pourquoi Canguilhem peut définir les normes comme étant, dans leur essence même, une insatisfaction à l'égard de l'expérience.

La « normativité vitale », c'est-à-dire la capacité de la vie à instaurer de nouvelles normes, est ce qui caractérise selon Canguilhem la vie en général. Ce qui est important de noter ici, c'est que cette normativité n'est pas seulement issue d'une volonté ou d'une conscience, mais est inhérente aux phénomènes biologiques eux-mêmes. Cette thèse est loin d'être banale, et Canguilhem en est conscient lorsqu'en la formulant il se défend d'être anthropomorphiste : « Nous ne prêtons pas aux normes vitales un contenu humain, mais nous nous demandons comment la normativité essentielle à la conscience humaine s'expliquerait si elle n'était pas de quelque façon en germe dans la vie » (Canguilhem, 2013, p. 103). Un phénomène aussi fondamental que la nutrition traduit par exemple déjà cette normativité d'ordre vital. D'un point de vue physico-chimique, aucune loi n'est violée lorsqu'un organisme subit un empoisonnement. Pourtant, d'un point de vue biologique, les changements physico-chimiques ayant alors lieu dans l'organisme sont tout sauf neutres; ils ont une *valeur* négative pour le vivant³⁰. Or, cette finalité apparente ne réside pas seulement dans un jugement raisonné, mais est présente dans l'organisme lui-même. L'activité organique, dans sa relation à un milieu, déprécie ou apprécie des états de faits, et s'inscrit par

³⁰ Cet exemple est inspiré de Canguilhem : « Le plus simple appareil biologique de nutrition, d'assimilation et d'excrétion traduit une polarité. Quand les déchets de l'assimilation ne sont plus excrétés par un organisme et encombrant ou empoisonnent le milieu intérieur, tout cela est en effet selon la loi (physique, chimique, etc.), mais rien de cela n'est selon la norme qui est l'activité de l'organisme lui-même. Tel est le fait simple que nous voulons désigner en parlant de normativité biologique. » (Canguilhem, 2013, p. 104-105)

le fait même dans le registre des normes plutôt que dans celui des lois. Traduire en termes quantitatifs la différence entre la nutrition et l’empoisonnement ne suffit pas à en comprendre le sens, il faut une appréciation subjective pour que l’on puisse *qualifier* tel phénomène d’empoisonnement et donc lui attribuer une valeur négative. On peut, pour bien comprendre cette nuance, faire une analogie avec les phénomènes acoustiques: tout agencement de sons est neutre du point de vue acoustique, au sens où tous sont égaux à l’égard des lois physiques. Il y a pourtant une différence qualitative entre une cacophonie, une fugue de Bach et le bruit d’un moteur d’avion. De même, la conformité des phénomènes biologiques à l’égard de lois générales de la physique et de la chimie n’empêche pas que l’on observe, même dans le métabolisme le plus primitif, une tendance; c’est-à-dire un mouvement chargé de sens qui correspond plus à des normes plus qu’à des lois.

Cette différence fondamentale entre la vie et la matière avait déjà été relevée en d’autres termes par Xavier Bichat, dans un passage auquel Canguilhem fait référence en plusieurs endroits³¹. Bien que Bichat ne parle pas en termes de normes, il souligne que le fait pathologique révèle un « besoin » de l’organisme de tendre vers un certain état plus que vers un autre, et que ce besoin révèle l’irréductibilité du vivant – et de la médecine – aux lois de l’inertie :

Il y a deux choses dans les phénomènes de la vie, 1° l’état de santé, 2° celui de maladie : de là deux sciences distinctes ; la physiologie, qui s’occupe des phénomènes du premier état ; la pathologie, qui a pour objet ceux du second. [...] La physiologie est aux mouvements des corps vivants, ce que l’astronomie, la dynamique, l’hydraulique, l’hydrostatique, etc., sont à ceux des corps inertes ; or, ces dernières n’ont point de sciences qui leur correspondent comme la pathologie correspond à la première. Par la même raison, toute idée de médicament répugne dans les sciences physiques. Un médicament a pour but de ramener les propriétés à leur type naturel ; or, les propriétés physiques, ne perdant jamais ce type, n’ont pas besoin d’y être ramenées. (Cité dans : Canguilhem, 1989, p. 549)

De ce point de vue, on comprend que la maladie ne peut être comprise sans faire appel à cette dépréciation qualitative que la notion de normativité vient expliciter. D’abord, le fait de tomber malade n’empêche pas l’organisme d’instituer des normes. Seule la mort peut en effet mettre fin à cette normativité envisagée au niveau organique. Le fait même que l’organisme s’organise en un tout cohérent, même en étant malade, témoigne de cette normativité. Il en résulte également que c’est exclusivement en relation avec un milieu qu’un

³¹ Voir : Canguilhem, 1983, p. 156; Canguilhem, 1989, p. 549; Canguilhem, 2003, p. 78; Canguilhem, 2013, p.37-38.

individu peut être dit « normal ». Ce terme est ainsi relativisé, et ne peut être placé en opposition logique par rapport à la pathologie. Qu'est-ce alors qu'être malade? Si le malade continue effectivement son activité vitale, il le fait cependant à un niveau de normativité réduit. Canguilhem définit ainsi la pathologie comme une autre « allure » de vie, un « seuil qualitatif nouveau » qui est bien éloigné des conceptions objectives de la maladie chez Claude Bernard ou Auguste Comte. Corrélativement, l'état sain n'est pas tant l'état normal qu'un état de plus grande liberté normative : « L'homme est sain pour autant qu'il est normatif relativement aux fluctuations de son milieu » (Canguilhem, 2013, p. 204). Être en santé, c'est donc avoir une plus grande marge de manœuvre pour s'adapter activement à ses conditions de vie. C'est avoir le « luxe » de tomber malade et de s'en relever.³² On comprendra alors, à l'aide de ces définitions de la santé et de la maladie, pourquoi une machine ne saurait être qualifiée de malade, contrairement à un être vivant. C'est la normativité vitale qui vient délimiter, comme chez Bichat, la différence essentielle entre la vie et la matière inerte : « Pour une machine, l'état de marche n'est pas la santé, le dérèglement n'est pas une maladie » (Canguilhem, 2002, p. 56).

La maladie et la mort montrent donc mieux que tout autre phénomène que l'organisme valorise sa propre vie en tant que fin, et institue des normes afin de tendre activement vers cette fin. Même si nous avons vu que Canguilhem se distancie du vitalisme de Bichat, sa conception du vivant est sous un certain angle semblable à celle de Bichat, au sens où la vie est ce qui résiste et lutte contre la mort. C'est par cette opposition avec la mort que Canguilhem ouvre d'ailleurs son article sur la notion de « Vie » dans l'*Encyclopædia Universalis* : « Peut-être n'est-il pas possible, encore aujourd'hui, de dépasser cette première notion : est vivant, et objet de la connaissance biologique, tout donné de l'expérience dont on peut décrire une histoire comprise entre sa naissance et sa mort » (Canguilhem, 1989, p. 546). On pourrait affirmer, pour le dire autrement, que la mort révèle pour Canguilhem la valorisation inhérente à la vie. Toute activité normative, qu'elle soit d'ordre organique ou

³² Une riche littérature en philosophie de la médecine consiste à s'interroger sur la possibilité d'élaborer une définition objective de la santé et de la maladie, c'est-à-dire une définition exempte de valeurs. Pour une réflexion sur la place d'une conception canguilhemienne de la santé en philosophie de la médecine, voir le livre d'Élodie Giroux intitulé : *Après Canguilhem : définir la santé et la maladie* (2010).

même sociale³³, trouve ultimement sa source dans le vivant : « Un organisme, c'est un mode d'être tout-à-fait exceptionnel en ceci qu'entre son existence et son idéal, entre son existence et sa règle ou sa norme, il n'y a pas de différence à proprement parler ». ³⁴

Selon Guillaume Le Blanc, deux opérations complémentaires peuvent être dégagées de cette normativité chez Canguilhem (Le Blanc, 2007, p.55). D'une part, l'organisme s'autorégule, c'est-à-dire qu'il maintient un certain équilibre interne qui tend à le distinguer du milieu extérieur. Cette opération signifie surtout que le vivant n'est envisageable que comme un *individu*. Les processus de régulation biologiques ne sont en effet compréhensibles que si on les rapporte à un « tout » cohérent. Il s'agit de normativité, dans la mesure où cette totalité, qui n'est rien d'autre que la vie elle-même, est valorisée pour elle-même³⁵. D'autre part, le vivant exprime aussi cette individualité par rapport à un milieu extérieur. Il ne subit pas de façon mécanique les contraintes imposées par ses conditions objectives. Au contraire, il opère une différenciation subjective au sein de son milieu. Cette idée est notamment développée dans le texte « Le vivant et son milieu ». Canguilhem prend alors l'exemple de la tique (Canguilhem, 2003, p. 186) qui peut rester pendant des années immobile et complètement insensible à toutes les excitations environnantes, tant que l'excitation appropriée ne déclenchera pas très précisément le mouvement qui lui permettra de se fixer sur l'animal et d'enclencher son processus de reproduction. Cet exemple montre que l'organisme ne subit pas passivement un environnement, mais qu'il constitue au contraire activement son propre milieu, en ce sens qu'il valorise certains moyens, certaines excitations, certaines actions plutôt que d'autres : « On ne peut comprendre son action sans faire appel à la notion de comportement privilégié. Privilégié, cela ne veut pas dire objectivement plus

³³ Pour les normes sociales, voir « Du social au vital » dans les *Nouvelles Réflexions* (Canguilhem, 2013, p. 225)

³⁴ Plusieurs passages du recueil intitulé *Écrits sur la médecine* vont également en ce sens. Par exemple : « Les maladies sont une rançon à payer éventuellement par des hommes faits vivants sans l'avoir demandé, et qui ont à apprendre qu'ils tendent nécessairement, dès leur premier jour, vers une fin à la fois imprévisible et inéluctable. » (Canguilhem, 2002, p.46) Ou encore, un peu plus loin : « rien de ce qui est vivant n'est achevé à proprement parler. Qu'on l'appelle ou non évolution, et quelque explication qu'on en donne, la succession historique d'organismes à partir de ce qu'on nomme aujourd'hui l'évolution chimique prébiotique est une succession de prétendants impuissants à devenir des vivants autres que viables, c'est-à-dire aptes à vivre mais sans garantie d'y réussir totalement. La mort est dans la vie, la maladie en est le signe. » (Canguilhem, 2002, p. 47)

³⁵ Sur la notion d'individualité chez Canguilhem, voir : Gayon (1998).

simple. L'animal trouve plus simple de faire ce qu'il privilégie. Il a ses normes vitales propres » (Canguilhem, 2003, p. 187).

Conséquences pour les sciences du vivant

La question qui nous intéresse ici est la suivante : Comment articuler cette caractérisation de la vie au moyen de « valeurs », d'« exigences » et de « normes vitales » ; avec la connaissance scientifique qui, comme nous l'avons vu au premier chapitre, consiste à mesurer et analyser ? Voilà l'une des questions philosophiques qu'implique le second problème de l'*Essai* que Canguilhem intitule : « Y a-t-il des sciences du normal et du pathologique ? ». Elle pose à Canguilhem le défi d'introduire les caractéristiques finalisées qu'il attribue à la vie (valeur, sens, norme, etc.) dans une connaissance qui se veut objective.

C'est par la physiologie que Canguilhem s'attaque à cette question de la scientificité de la connaissance de la vie, puisque cette science est souvent considérée comme la discipline définissant l'état normal de l'organisme. Nous avons vu par exemple avec Claude Bernard que la physiologie précédait logiquement la médecine, dans la mesure où elle permettait de définir et d'étudier l'état normal afin de donner une base scientifique à l'étude des maladies. Pour Canguilhem cependant, la physiologie ne saurait définir elle-même l'état normal, du moins pas scientifiquement. Dès que le physiologiste qualifie de « normal » ou de « pathologique » les constantes qu'il étudie, son regard cesse d'être « indifférent » (Canguilhem, 2013, p. 150) et donc d'être scientifique. C'est en tant que vivant, et non en tant que scientifique, qu'il perçoit ce qui est valorisé dans l'organisme qu'il étudie : « Le physiologiste, en étudiant un état qu'il dit physiologique, le qualifie par-là, même inconsciemment ; il tient cet état pour qualifié positivement par le vivant et pour le vivant » (Canguilhem, 2013, p. 86). On retrouvera plusieurs exemples de ce regard subjectif parfois camouflé dans de multiples passages de Claude Bernard et d'Auguste Comte que relève Canguilhem. Canguilhem note le flou de ces passages qui, malgré leur ambition, témoignent d'une dépréciation subjective de la maladie, et d'une appréciation toute aussi subjective de l'état qui est qualifié de normal³⁶.

³⁶ Notons par exemple cette citation de Claude Bernard relevée dans l'*Essai*, dans laquelle on peut clairement apercevoir des dépréciations qualitatives : « (...) les maladies augmentent, diminuent, interrompent, dépravent l'innervation de l'encéphale, sous les rapports instinctif, intellectuel, sensitif et musculaire » (p.25)

La physiologie est donc redéfinie par Canguilhem comme étant la science des situations et des conditions biologiques « *dites normale* » (Canguilhem, p. 204). Elle ne débute pas son activité scientifique à partir d'un phénomène entièrement objectivable; elle la débute à partir d'un point de départ subjectif. C'est seulement à partir de ce point de départ que la science objective prend le relais, et que le physiologiste peut mesurer et analyser les constantes vitales de l'état normal. Canguilhem ne vient donc ni rabaisser, ni relativiser le caractère scientifique de la physiologie. Il fait simplement le constat que celle-ci œuvre à partir d'une reconnaissance de certaines normes vitales.

Un lien intéressant peut être ici établi avec un texte ultérieur de Canguilhem, « L'expérimentation en biologie animale » (Canguilhem, 2003, p.19). Ce besoin de fonder la connaissance objective du vivant sur les normes vitales peut être élargi au-delà des études qui concernent la physiologie et la pathologie. Dans une description détaillée des difficultés auxquelles doit faire face l'expérimentateur en biologie, Canguilhem insiste sur l'irréductible spécificité de la biologie, qui n'est pas seulement attribuable à sa méthode, mais à son objet même. C'est ce qui ressort des diverses recherches, même biochimiques, dont les résultats ne peuvent être interprétés qu'à la lumière d'un « sens biologique ». L'exemple de la cellule que prend Canguilhem est éclairant : à quoi sert-il de connaître la composition physico-chimique d'une membrane cellulaire et ses mécanismes de perméabilité, si on ne réfère pas ces résultats au rôle biologique de cette membrane, au fait qu'elle soit « viable, adaptée, sélective » (Canguilhem, 2003, p.40)? En effet, ce qu'il y a de spécifiquement biologique dans la perméabilité sélective d'une membrane cellulaire, c'est le fait que celle-ci joue un rôle dans la régulation de l'activité cellulaire. C'est son rôle, sa finalité pour le vivant qui lui donne une signification proprement biologique.

Cet exemple illustre les limites de l'analyse en biologie. Il est vain de prendre des mesures, de noter des constantes et de caractériser des processus chimiques si ces résultats analytiques ne s'inscrivent pas dans une compréhension plus globale de l'organisme. Cela ne signifie pas qu'une analyse quantitative du vivant soit à proscrire, mais indique simplement qu'elle doit, comme dans le cas de la physiologie de Claude Bernard, s'inscrire dans un organisme et se référer à un sens plus large, à un niveau où il est difficile de ne pas faire appel à une certaine subjectivité. En posant des limites à l'analyse, Canguilhem ne prend pas la

posture du philosophe qui imposerait ses recommandations métaphysiques aux scientifiques. Au contraire, il rend compte explicitement d'une réalité des sciences de la vie qui est parfois implicite ou parfois ignorée par les tenants d'une position métaphysique réductionniste. Il met simplement en lumière le fait que le biologiste ne fait pas que diviser, mais comprend également le vivant dans un sens beaucoup plus synthétique :

Il faut être aujourd'hui bien peu averti des tendances méthodologiques des biologistes, même les moins inclinés à la mystique, pour penser qu'on puisse honnêtement se flatter de découvrir par des méthodes physico-chimiques autre chose que le contenu physico-chimique de phénomènes dont le sens biologique échappe à toute technique de réduction. (Canguilhem, 2003, p. 39-40)

On voit donc ici mieux qu'ailleurs comment s'articule chez Canguilhem le vivant en tant que sujet et le vivant en tant qu'objet d'étude. L'obstacle à une connaissance objective de la vie ne peut être surmonté que si l'on accepte de faire un premier pas relevant d'autre chose que l'analyse. La normativité vitale, concept central de Canguilhem, vient caractériser ce premier pas. Ces considérations sur la physiologie et sur les recherches expérimentales en biologie seront particulièrement bien éclairées par les dernières phrases de l'introduction à *La connaissance de la vie*, qui résumant la position que nous avons décrite. On y constate mieux qu'ailleurs que la spécificité de la connaissance biologique est attribuable pour Canguilhem non seulement au phénomène lui-même, mais au fait que, paradoxalement, c'est un vivant qui tente de connaître la vie :

Nous pensons, quant à nous, qu'un rationalisme raisonnable doit savoir reconnaître ses limites et intégrer ses conditions d'exercice. L'intelligence ne peut s'appliquer à la vie qu'en reconnaissant l'originalité de la vie. La pensée du vivant doit tenir du vivant l'idée du vivant. (...) Nous soupçonnons que, pour faire des mathématiques, il nous suffirait d'être anges, mais pour faire de la biologie, même avec l'aide de l'intelligence, nous avons besoin parfois de nous sentir bêtes. (Canguilhem, 2003, p. 16)

La médecine comme technique : une critique du positivisme

Il nous semble opportun, à la fois pour revenir sur les thèses de l'*Essai* et pour faire le lien avec le problème du modèle technique en biologie, de clore ce chapitre en traitant du statut de la médecine pour Canguilhem. Dans la mesure où la pratique médicale vise à rétablir des normes biologiques plus qu'à connaître, elle peut difficilement être reconnue comme une science à part entière. Cela ne signifie pas que la médecine ne fasse pas usage des sciences, au contraire. Mais puisque sa finalité est *vitale*, en ce sens qu'elle consiste à restituer un état valorisé subjectivement par le vivant, elle doit être tenue davantage pour une technique : « Il est de la médecine comme de toutes les techniques. Elle est une activité qui s'enracine dans

l'effort spontané du vivant pour dominer le milieu et l'organiser selon ses valeurs de vivant » (Canguilhem, 2013, p. 204-205).

Ce qui est sous-entendu ici est que la technique ne relève pas de la connaissance, définie comme connaissance scientifique, objective, codifiée; mais d'une autre forme d'appréhension du monde se rattachant à l'expérience vécue et à la subjectivité. Cette affirmation est lourde de conséquences philosophiques. Si la technique était pour Canguilhem la simple application d'un savoir, c'est-à-dire un cheminement linéaire allant directement de la connaissance à l'intervention pratique, alors identifier la médecine à une technique ne poserait pas problème. Mais la technique, comme nous le verrons plus spécifiquement dans le prochain chapitre, revêt pour Canguilhem une originalité propre qui la rapproche davantage du vivant. Elle est à interpréter comme un phénomène vital, spécifique, qui n'est pas simplement réductible à un cadre scientifique.

Cette position s'oppose drastiquement à celle de Claude Bernard et d'Auguste Comte. Derrière l'ambition d'objectiver entièrement le vivant, de réduire le physiologique et le pathologique à la mesure et à l'analyse, il y a la croyance en un primat de la science sur la technique. En ce sens, c'est bien une ambition positiviste qui sous-tend le projet biologique de Bernard et de Comte. Il y a dans la pensée positiviste une adéquation entre le progrès scientifique et le progrès de l'humanité. Or, ce progrès ne saurait tolérer les « irrégularités » (Canguilhem, 2003, p. 62) qu'introduirait une technique qui serait dans une certaine mesure indépendante de la science. Auguste Comte et Claude Bernard, dans leurs écrits sur les sciences du vivant, témoignent tous deux de cette foi en la prépondérance de la rationalité scientifique. C'est ce qui ressort à la fois de leur recherche des lois de la physiologie, de leur exclusion du point de vue subjectif du malade, et de leur réduction de la qualité à la quantité : « En somme, Claude Bernard a formulé dans le domaine médical, avec l'autorité de tout novateur qui prouve le mouvement en marchant, l'exigence profonde d'une époque qui croyait à la toute-puissance d'une technique fondée sur la science (...) » (Canguilhem 2013, p. 63).

À l'inverse, Canguilhem entend montrer qu'en matière de médecine, la technique précède chronologiquement la science. Tout en attribuant au chirurgien français René Leriche (1879-1955) une position semblable, Canguilhem affirmera constamment la

préséance de l'expérience clinique et thérapeutique sur toute science médicale. Cette conception ne vient aucunement interdire à la médecine de se dire dans une certaine mesure scientifique. La science opère à un autre niveau, elle vient informer la médecine « en lisière et comme garde-fou » (Canguilhem, 2002, p. 68). Il est bien entendu que la médecine a tout à gagner à profiter des connaissances empiriques qu'apporte la science médicale, mais elle le fait avant tout en tant qu'elle vise à rétablir un état valorisé pour lui-même, répondant ainsi à un besoin proprement vital.

En ce sens, *Le normal et le pathologique* s'inscrit dans un refus général du positivisme qui, comme le souligne Dominique Lecourt, caractérise la tradition épistémologique française regroupant Gaston Bachelard, Georges Canguilhem et Michel Foucault³⁷. La philosophie des sciences dominante, surtout à l'époque de Bachelard, est majoritairement positiviste. Elle est envisagée comme une science de la science qui consiste par exemple, dans la version de l'empirisme logique du Cercle de Vienne, à fournir une théorie générale de la connaissance libérée de métaphysique, fondée sur l'expérience et l'analyse logique. Selon Lecourt, le trait commun de l'épistémologie française est de refuser cette conception de la philosophie et de la science en insistant sur l'historicité essentielle à toute connaissance. *Le normal et le pathologique*, par son refus des conceptions de la science et de la médecine que défendent Claude Bernard et Auguste Comte, s'inscrit lui aussi dans cette critique du positivisme.

On comprend mieux ainsi la relation complexe, chez Canguilhem, entre le vivant et la science. Dans *La connaissance de la vie*, celui-ci refuse en effet d'emblée une opposition drastique entre la connaissance et la vie, qui ne conduirait qu'à « la destruction de la vie par la connaissance ou à la dérision de la connaissance par la vie » (Canguilhem, 2003, p. 12). La position de Canguilhem est plus nuancée et dépasse cette opposition. Comme nous l'avons vu précédemment, Canguilhem refuse toute théorie de la connaissance qui n'inscrirait pas celle-ci dans le vivant. La connaissance objective, bien qu'étant insuffisante à la

³⁷ « Ce non positivisme, inauguré par Bachelard, en même temps qu'il nous paraît former le « ciment » de la tradition qui unit nos trois auteurs, la distingue de tout ce qui se pratique ailleurs sous le nom d' « épistémologie » (Lecourt, 1972, p. 7).

compréhension de la vie, doit tout de même être pensée dans son rôle vital pour l'être humain et dans les besoins qu'elle vise à combler.

Conclusion

La normativité du vivant, concept central chez Georges Canguilhem, n'est au fond rien d'autre que la constatation selon laquelle le vivant, tel qu'il est étudié dans les sciences biologiques, institue lui-même ses propres normes d'existence. L'existence de la maladie et de la mort révèle, plus que tout autre phénomène, que les états de faits sont valorisés ou dépréciés par le vivant. Cette thèse centrale de Canguilhem lui permet à la fois de distinguer clairement les sciences biologiques des sciences physiques et de conférer une spécificité propre à leur objet d'étude. La normativité du vivant précède ainsi, de fait, tout discours rationaliste sur le vivant. Parallèlement, c'est également cette normativité qui vient caractériser l'activité technique en la rapprochant du vivant et en la distinguant de l'activité scientifique. La médecine, à ce titre, est emblématique de ce principe : la dépréciation vécue d'un état de fait est ce qui précède, tant sur le plan chronologique que sur le plan existentiel, la connaissance scientifique du corps humain. C'est sur cette thèse concernant la primauté vitale de l'activité technique, idée centrale à notre recherche, que nous consacrerons notre prochain chapitre.

Chapitre 3 – L’analogie technique et la connaissance du vivant

Le problème général de la connaissance du vivant chez Canguilhem, sur lequel nous nous sommes concentrés jusqu’ici, nous servira de base pour bien comprendre sa critique particulière de la doctrine mécaniste et de l’assimilation cartésienne du vivant à la machine. Pour Canguilhem, les limites du mécanisme se révèlent de façon particulièrement claire dans la rencontre entre la machine et l’organisme. Sa façon d’aborder cette question est, comme nous le verrons, liée à une réflexion originale sur la machine elle-même et sur le sens de l’activité technique pour le vivant humain. De la même façon que les normes vitales précédaient la connaissance médicale, la compréhension de ce qu’est une machine ne peut elle non plus se passer d’une référence préalable au vivant.

Plusieurs textes de Canguilhem abordent directement cette question. Elle est notamment traitée dans « Machine et organisme » (1946), un article issu d’une conférence dans laquelle Canguilhem conteste la légitimité du raisonnement prenant la machine pour point de départ afin de penser l’organisme. Ce raisonnement est alors mis en doute à partir d’une réflexion sur la machine elle-même et d’une remise en question du primat de la science sur la technique. Dans une autre étude notable, « Modèles et analogie dans la découverte en biologie » (1963), Canguilhem entreprend d’analyser le rôle scientifique de l’analogie technique qui, bien que se rapprochant d’une formalisation avec les modèles informationnels issus de la cybernétique, ne permet toujours pas une véritable identité entre la machine et l’organisme. Ces deux textes, comme nous le constaterons, comportent une réflexion générale sur le rôle et le sens de la technique. Nous entreprendrons ici de les articuler tout en complétant parfois notre réflexion à l’aide de passages issus d’études différentes traitant cette question de façon plus indirecte.

La première section consistera à voir comment la réponse mécaniste de Descartes au problème du vivant ne permet pas d’en évacuer tout à fait le finalisme, puisqu’elle ne fait que le relayer implicitement au stade de la construction des machines. Nous verrons que ce problème est en fait sous-tendu par une certaine conception des relations entre science et technique. Dans notre deuxième section, nous examinerons comment Canguilhem vient penser à nouveaux frais cette relation, en s’inspirant des travaux de divers ethnologues de

son temps qui ont insisté sur l'irréductible origine biologique de l'activité technique. Ces considérations nous amèneront, dans une seconde section, à reconsidérer les différences et ressemblances entre l'organisme et la machine en posant entre eux une continuité. Nous nous interrogerons enfin, dans une quatrième section, sur le rôle et la portée du modèle mécanique en biologie chez Canguilhem, et sur les raisons qui lui font questionner le sens même de l'assimilation de la machine à l'organisme.

Mécanisme et finalité

La nécessité pour la philosophie mécaniste d'identifier l'organisme à une machine est, comme nous avons pu le constater, liée à la nécessité d'expliquer le vivant autrement que par le recours à un principe ou à une finalité. Pour un penseur comme Aristote, le problème ne se pose pas de la même façon, puisqu'il n'y a aucune incohérence, dans les conceptions du monde antérieures à la « révolution scientifique », à faire intervenir dans le monde naturel des notions téléologiques. Ainsi le mouvement du corps vivant est-il expliqué par Aristote au moyen du désir, lui-même expliqué par l'âme. S'il est vrai que l'on retrouve dans le corpus d'Aristote des explications faisant intervenir des modèles mécaniques, il demeure que ces explications sont étroitement dépendantes du pouvoir de l'âme, qui est identifié à la vie elle-même et qui confère aux vivants forme et finalité. Dans une vision mécaniste du monde telle que nous l'avons décrite, cette finalité apparente des vivants paraît cependant encombrante, puisqu'elle semble impliquer un pouvoir distinct de la matière. François Jacob affirme par exemple, dans *La logique du vivant*, que le biologiste s'est longtemps trouvé devant la téléologie « (...) comme auprès d'une femme dont il ne peut pas se passer mais en compagnie de qui il ne veut pas être vu en public » (Jacob, 1970, p. 17). L'âme, au XVII^e siècle, n'est plus une explication satisfaisante du vivant, elle a « cessée d'apparaître comme une réponse objectivement fondée à la question de la nature de la vie » (Canguilhem, 1989, p. 550). L'explication mécaniste cartésienne, dans cet ordre d'idées, semble fonder les bases philosophiques d'une étude des corps vivants délivrée de finalisme. La place limitée de l'âme, réservée à l'homme et dont le corps est au fond pratiquement indépendant, laisse le champ libre à une science soucieuse de s'étendre à l'étude des organismes. Dans la mesure où le vivant est conçu comme un *automate*, il entre harmonieusement dans la composition d'un monde nouvellement mécanisé.

Comme nous le verrons plus loin, les analogies avec la machine se sont depuis cette époque raffinées, complexifiées. Cependant, bien que les applications relativement récentes de la notion d' « information » au monde vivant puissent sembler éloignées des leviers et des poulies, il demeure que la cybernétique qui les inspire s'incarne dans des objets techniques, qu'il s'agisse du régulateur ou de l'ordinateur. La critique de Canguilhem que nous présenterons maintenant, bien que centrée sur l'animal-machine de Descartes, peut ainsi très bien s'appliquer aux machines contemporaines. C'est d'ailleurs ce que lui-même souligne brièvement dans son texte: « La construction de servo-mécanismes ou d'automates électroniques déplace le rapport de l'homme à la machine sans en altérer le sens » (Canguilhem, 2003, p. 149). La raison en est qu'il ne s'agit pas pour Canguilhem d'*expliquer* comment un mouvement autonome est physiquement possible, mais de *comprendre* l'origine des artifices humains³⁸. Dans la mesure où même une machine informationnelle trouve son origine dans le vivant humain, la réflexion canguilhemienne garde, comme nous le verrons, toute sa pertinence.

Dans « Machine et organisme », Canguilhem entreprend ainsi de montrer les limites philosophiques de la position cartésienne. Ce qui fait l'originalité de sa critique, c'est qu'elle est centrée non pas sur une remise en question de notre idée d'organisme, ni même sur l'affirmation d'une originalité du vivant qui contredirait la position mécaniste, mais sur une réflexion philosophique relative à la compréhension de ce qu'est une machine. Il annonce dès les premières lignes son intention de traiter non pas de l'organisme à partir de la machine, mais de traiter de la machine à partir de l'organisme. L'erreur de ceux, nous dit-il, qui croient que la question du finalisme est aisément réglée par le recours aux automates, n'est pas d'avoir perçu des ressemblances entre les organes et les mécanismes, mais d'avoir tenu le concept de « machine » pour acquis. C'est sur cet aspect que Canguilhem centrera son investigation philosophique.

Qu'est-ce donc qu'une machine? Pour les tenants du mécanisme, une machine est souvent conçue comme une construction rationnelle, un agencement réfléchi de mouvements. Une fois construite, une machine donne ainsi l'apparence d'un mouvement autonome, alors

³⁸ Nous reprenons cette distinction entre comprendre et expliquer d'un court extrait de « Machine et organisme » (Canguilhem, 2003, p. 146)

qu'il n'y a en fait qu'inertie. Vaucanson, en construisant au XVIII^e siècle ses automates hommes ou animaux, n'entend pas seulement imiter la nature, il entend éclairer par « réduction de l'inconnu au connu » les mécanismes réels des fonctions physiologiques (Canguilhem, 1963, p. 309). L'assimilation de l'organisme à une machine ainsi définie tend donc à écarter le finalisme apparent du vivant en le traitant comme une illusion, comme un agencement de matière inerte qui ne serait au fond qu'imitation.

C'est ici qu'un problème évident se pose : s'il y a imitation, de quelle imitation s'agit-il? Si l'on veut ainsi tenir pour illusoire le finalisme de la contraction musculaire, du mouvement des organes ou de la circulation du sang, encore faut-il expliquer d'où vient cet agencement de mécanismes. Or, une machine, comme le montre Canguilhem, suppose toujours à la fois un but et un constructeur. On ne retrouve pas de machines sans l'être humain, sans une finalité initiale pensée au moment de sa conception: « (...) si le fonctionnement d'une machine s'explique par des relations de pure causalité, la construction d'une machine ne se comprend ni sans finalité, ni sans l'homme. Une machine est faite par l'homme et pour l'homme, en vue de quelques fins à obtenir, sous forme d'effets à produire » (Canguilhem, 2003, p. 146). Descartes est bien sûr conscient de cette difficulté, qu'il résout en évoquant un Dieu fabricant qui, de façon analogue aux constructeurs d'automates, aurait conçu l'être humain en orientant des mouvements et des artifices³⁹. Ce que Canguilhem met en lumière et qui constitue au fond le nœud de son argumentation, c'est que cette solution ne permet pas pour autant d'évacuer la finalité liée à la construction des machines. Le machiniste humain et le créateur divin sont ici placés sur un même plan. Le Dieu fabricant lui-même doit en quelque sorte agencer des mécanismes en vue d'obtenir une certaine fin, et bien que son œuvre soit infiniment plus complexe que celle de l'artisan, il travaille lui aussi à partir d'une idée et d'une forme à obtenir. À partir de l'analyse d'un passage du *Traité de l'homme* dans lequel Descartes dépeint l'œuvre mécanique de ce Dieu fabricant, Canguilhem montre que cette idée, cette finalité que le Dieu cartésien doit viser en créant ses machines, n'est

³⁹ On retrouve ici un raisonnement analogue au fameux argument du « design », souvent repris à la suite de Saint-Augustin pour prouver l'existence de Dieu. Ce raisonnement est notamment critiqué par David Hume dans son *Dialogue sur la religion naturelle*. On le retrouvera également formulé sous la forme fameuse du « grand horloger » par William Paley en 1809. L'argument est de façon générale le suivant : 1. Le monde est (ou est semblable) à une machine 2. Toute machine suppose une intention ou un constructeur 3. Donc le monde doit avoir été conçu par un architecte divin. Voir l'article : « Design », *histoire du mot et du concept : sciences de la nature, théologie, esthétique* de Daniel Becquemont (2010).

autre que l'idée même de vivant: « Le Dieu cartésien, l'*Artifex Maximus*, travaille à égaler le vivant lui-même » (Canguilhem, 2003, p. 144).

Le finalisme de l'intention technique ne peut donc pas, même chez Descartes, être entièrement séparé de son origine vitale. Ultimement, le modèle du mécanisme cartésien, sa cause « formelle et finale » au sens aristotélicien, est organique; et l'explication du monde vivant par la machine devient en quelque sorte un raisonnement circulaire. C'est la circularité de cet argument qui est révélée par la position de Descartes, mais qui au fond peut s'appliquer à toute explication mécaniste visant à se débarrasser de notions téléologiques. Si l'on veut expliquer en quoi le finalisme est une illusion ou une imitation, encore faut-il s'en faire une certaine idée; mais cette idée, que l'on passe ou non par le biais d'un Dieu fabricant, ne peut légitimement chercher son origine que dans l'organisme lui-même. Ian Hacking, dans « Canguilhem parmi les cyborgs » résume cette thèse ainsi : « Ni nous ni Dieu n'allons au-delà de la téléologie. Les machines sont faites ainsi parce qu'elles sont construites soit en vue d'une fin, soit en imitation de quelque chose de déjà vivant » (Hacking, 2007, p. 116). L'idée même de finalité est donc irréductible. Elle est première par rapport aux machines, et même la doctrine mécaniste ne peut ultimement s'en passer. Pour reprendre une formulation de Catherine et Raphaël Larrère, qui résument cette idée dans un commentaire sur Canguilhem : « Sa thèse est simple : la machine, explique-t-il, n'a pu devenir le modèle du vivant que parce qu'elle avait, au préalable, incorporé le principe même du vivant, celui du mouvement autonome » (Larrère et Larrère, 2015, p.161-162).

C'est donc une chose d'expliquer que les mouvements du vivant ne sont que des relations de causalité, mais c'en est une autre de dire que celui-ci échappe ainsi à tout finalisme. Si on mobilise la notion de machine telle que la définit la philosophie mécaniste, on ne règle le problème que de façon provisoire, on ne fait que repousser le finalisme à un autre niveau. C'est pourquoi Canguilhem affirme que le mécanisme, pour être convaincant, doit tenir pour acquise la notion de machine: « (...) La raison en est que le mécanisme peut tout expliquer si l'on se donne des machines, mais que le mécanisme ne peut pas rendre compte de la construction des machines » (Canguilhem, 2003, p. 147). On voit mieux, par le fait même, en quoi la critique qu'oppose Canguilhem à Descartes est inséparable d'une réflexion sur la technique. Le problème de l'origine des machines est aisément réglé par

Descartes au moyen du dualisme entre l'esprit et la matière. Ce dualisme est précisément ce qui lui permet de se « donner » des machines, car l'origine de la machine est en quelque sorte, pour Descartes, hors du monde. Si le finalisme apparent du vivant peut être traité par Descartes comme étant une illusion, c'est ainsi au prix d'une certaine conception de la technique posant d'un côté une intention raisonnée (divine ou humaine) et de l'autre côté les résultats appliqués de cette intention. C'est pourquoi l'on peut considérer la mécanisation du vivant et l'artificialisation des processus naturels chez Descartes comme étant des positions philosophiques directement dépendantes de son dualisme entre la pensée et la matière.

Voilà ce qui permet à Ian Hacking d'affirmer, à propos du texte « Machine et organisme », qu'il constitue une « démolition interne » de Descartes (Hacking, 2007, p.115). C'est dans la mesure où la technique trouve son origine dans une intention ou une finalité séparée du monde matériel que la théorie des animaux-machines est rendue possible. Or, en mettant en lumière la dépendance organique de cette intention, en montrant que le finalisme de l'action technique est toujours lié à un être vivant, Canguilhem vient effectivement « ébranler » le dualisme et le *cogito*. Pour reprendre la distinction précédente entre comprendre et expliquer, on peut dire que Descartes pouvait expliquer de façon légitime le finalisme apparent des êtres vivants, mais qu'il ne pouvait en comprendre l'origine sans souscrire à une vision de la technique dépendante d'une séparation stricte en la raison et le monde matériel.

Prenant le contrepied du dualisme cartésien, Canguilhem aborde donc la question de la machine en cherchant son origine, ce qui suppose une réflexion sur les liens entre science et technique: « (...) nous pensons qu'il n'est pas possible de traiter le problème biologique de l'organisme-machine en le séparant du problème technologique qu'il suppose résolu, celui des rapports entre la technique et la science » (Canguilhem, 2003, p. 130). Canguilhem nous dit au fond ceci : à moins d'être dualiste, notre compréhension de la machine ne peut légitimement se passer de la primauté de la technique. D'un point de vue logique, il est vrai que l'on peut expliquer les machines en mobilisant le seul savoir scientifique; mais ce genre d'explication ne suffit pas pour comprendre le sens et l'origine de la construction de ces machines. Nous réexaminerons ici ces rapports entre machine et organisme en prenant cette fois le point de vue évolutionniste adopté par Canguilhem.

L'origine vitale des machines

Les auteurs qui inspirent Canguilhem dans sa compréhension de la technique, dans « Machine et organisme », ont en commun d'avoir cherché à comprendre les machines d'un point de vue historique plutôt que logique: « (...) nous trouvons plus de lumière, quoique encore faible, sur la construction des machines dans les travaux des ethnographes que dans ceux des ingénieurs » (Canguilhem, 2003, p.157). En effet, un grand nombre de réflexions du début du siècle portant sur la technique optent pour un point de vue évolutionniste et prennent le contre-pied d'une conception cartésienne ou dualiste. Les travaux en ethnologie et en anthropologie des techniques, dont la figure préminente est André Leroi-Gourhan (1911-1986), pointent par exemple vers une origine biologique – et non raisonnée – des premiers outils et des artifices humains en général. Loin d'être en rupture avec la vie, la faculté de fabriquer est alors comprise selon son rôle vital. C'est à cette époque que l'on insistera, par exemple, sur l'importance de la main, qui non seulement fut essentielle pour fabriquer et manier des outils, mais qui plus primitivement servait elle-même d'outil. On trouvera un exemple de ces idées chez Ernst Kapp (1808-1896), qui le premier propose l'idée que les outils seraient un prolongement biologique, une sorte de « projection » des organes de l'homme sur le monde matériel⁴⁰; ou encore chez Alfred Espinas (1844-1922), auteur d'un ouvrage intitulé *Les origines de la technique* (1897), que Canguilhem cite comme l'un des seuls ouvrages français de l'époque comportant un point de vue biologique sur la question de la technique.

Canguilhem reprend explicitement l'idée d'un prolongement biologique en expliquant l'origine de la technique chez le vivant, mais il se questionne alors sur la portée philosophique plus générale de cette thèse : dans la mesure où les machines complexes relèvent en partie d'un savoir scientifique, peut-on parler encore d'un simple prolongement des organes? En d'autres mots, la machine opère-t-elle une rupture avec ses origines vitales lorsqu'elle devient régie par une connaissance logique de ses mécanismes?

Il peut être utile, pour bien répondre à ces questions, de faire un détour par deux des auteurs qui inspirent Canguilhem dans cet article, soit Bergson et Leroi-Gourhan.

⁴⁰ Par exemple, les outils de percussion seraient à envisager comme un prolongement des mouvements percussifs du bras ou de la main.

Canguilhem dira de Bergson, dans « Machine et organisme », qu'il est « l'un des rares philosophes, sinon le seul, qui ait considéré l'invention mécanique comme une fonction biologique, un aspect de l'organisation de la matière par la vie », et il ira jusqu'à affirmer de son œuvre qu'elle peut être considérée comme un « traité d'organologie générale » (Canguilhem, 2003, p. 161). Pour Bergson, il va de soi que même les techniques les plus sophistiquées ont une dimension vitale, étant donné que la science elle-même n'est pas en rupture avec cette capacité fabricatrice de l'être humain. L'idée d'*Homo faber*, formulée dans l'œuvre majeure de Bergson, *L'Évolution créatrice* (1907), pose essentiellement que l'homme est un animal « fabricant » (*faber*) avant d'être un animal « savant » (*sapiens*). D'un point de vue paléontologique, cette assertion peut trouver une justification dans les travaux d'ethnographie cités par Canguilhem. Mais plus fondamentalement, la thèse de l'*Homo faber* s'inscrit dans la philosophie de Bergson et dans sa conception biologique de l'intelligence que nous avons vue au chapitre 1. Pour Bergson, l'intelligence est en continuité avec le vivant, et la science n'y fait pas exception. L'arrivée de la science moderne ne change pas le fait que l'homme est plus fondamentalement fabricant que savant. En fait, elle prolonge cette fonction de l'intelligence qui est d'analyser puis de prévoir en vue d'agir sur le monde : « La science porte cette opération au plus haut degré possible d'exactitude et de précision, mais elle n'en altère pas le caractère essentiel » (Bergson, 2013, p. 29). C'est ce qui permet à Bergson de parler notamment de la machine à vapeur, symbole de la révolution industrielle, comme d'une instantiation de cette caractéristique vitale de l'homme (Bergson, 2013, p. 139-140). Par la notion d'*Homo faber*, Bergson inscrit ainsi même les machines les plus sophistiquées dans un processus biologique.

Sur ce point, il est vrai que Canguilhem opéra lui aussi pour une compréhension des machines passant par un point de vue vital. Mais une différence fondamentale avec Bergson apparaît déjà : l'intelligence, comme nous l'avons vu, opère chez Canguilhem une certaine rupture avec le vivant. Elle garde bien sa fonction pratique ou vitale, qui est d'ajuster le vivant humain à ses conditions extérieures, à son milieu. Cependant, elle n'a pas selon lui à être mobilisée pour comprendre le sens original de l'action technique, même en ce qui a trait aux machines les plus complexes.

Une explication des machines plus fidèle aux thèses de Canguilhem peut être trouvée dans l'ouvrage *Milieu et Techniques* (1945) d'André Leroi-Gourhan, que Canguilhem cite à plusieurs reprises. La notion même de « milieu » que développe Leroi-Gourhan est d'inspiration biologique, puisque celui-ci se sert explicitement d'une analogie avec l'évolution darwinienne afin d'expliquer l'apparition, la diffusion, la variabilité et la progression en général des objets techniques. Placer la technique au sein d'un milieu, c'est la rendre au moins en partie dépendante d'un contexte, et c'est donc en même temps rejeter l'hypothèse d'une innovation « pure » qui serait entièrement issue de l'intelligence. Pour André Leroi-Gourhan, plusieurs facteurs indépendants de l'intelligence humaine doivent effectivement être mobilisés pour penser l'innovation technique. Il distingue à ce titre le milieu extérieur, qui comprend le climat, la géographie et la matière à disposition; et le milieu intérieur, qui comprend des facteurs esthétiques, sociaux et culturels, ainsi que le « milieu technique » regroupant les différents éléments techniques à la disposition d'un groupe humain. « (...) le génie inventif ne tient pas au milieu extérieur; mais l'invention, parce qu'elle s'insère dans la matière comporte une large part de déterminisme physique. La présence du cuivre natif ne fera pas naître le génie inventif, mais l'invention tendra à se fixer sur cette matière propice » (Leroi-Gourhan, 1973, p. 383). C'est par un dialogue entre ces milieux que l'innovation technique est expliquée chez Leroi-Gourhan. L'invention ne naît pas ici entièrement, sous une forme pure, dans l'esprit humain. Elle est liée aux problèmes vitaux que l'être humain rencontre en tentant d'agencer la matière.

Ainsi, même à un niveau aussi complexe et avancé que la machine, nous nous retrouvons selon Leroi-Gourhan dans l'impossibilité de concevoir une invention en mobilisant uniquement l'intelligence. D'abord, parce que le tâtonnement et l'essai-erreur ne sont jamais vraiment écartés du processus d'innovation, mais aussi et surtout parce que toute invention demeure le fruit de problèmes antécédents et d'éléments techniques préexistants. Pour illustrer ce point, Leroi-Gourhan prenait l'exemple de moteur à explosion, soulignant qu'une telle invention aurait été impensable sans l'aide des « machines hydrauliques du XVIIe siècle, du rouet, de la marmite de Papin (...) » (Leroi-Gourhan, 1973, p. 344). L'inventeur ne conçoit ainsi jamais un objet *ex nihilo*, il travaille toujours à partir de ce milieu technique.

C'est cette idée d'une irréductibilité à la science qui conduira Canguilhem à étendre, même dans la conception des machines les plus complexes, la préséance d'une dimension vitale. Étant donné que la technique est une réponse vitale à un problème vital, c'est à elle que revient l'initiative d'agir sur le monde, et la science ne vient la réguler qu'après coup. C'est ce qui permet notamment à Canguilhem de parler de la « témérité » de la technique⁴¹. La technique n'a jamais attendu la science pour agir, et les exemples en ce sens sont monnaie courante. La médecine, centrale dans la pensée de Canguilhem, est peut-être le plus éloquent: c'est l'état du patient, sa dévalorisation existentielle de sa maladie, qui suscite la pratique médicale et qui, après coup, rend possible une médecine théorique. De la même manière, on peut faire remonter les origines de la géométrie aux problèmes concrets liés à l'irrigation ou à l'architecture, ou encore les progrès en optique aux difficultés que posait la construction de lunettes. Une certaine partie de l'activité technique demeure originale et créatrice, et cette partie est à chercher ailleurs que dans une démarche raisonnée. Elle est à chercher dans les besoins et les exigences d'un vivant s'efforçant de régler des problèmes liés à sa santé, à son bien-être et à sa vie en général. Dans une présentation de 1937 intitulée *Descartes et la technique*, Canguilhem montre d'ailleurs que Descartes lui-même était conscient de cette finalité vitale de la technique, et qu'il était ainsi plus nuancé sur ce sujet que ce qu'on lui accorde généralement (Canguilhem, 1937).

En fait, Canguilhem ira encore plus loin dans cette position et affirmera que la science elle-même, bien qu'étant à certains égards en discontinuité avec le phénomène technique, en est souvent cependant souvent l'héritière : « l'antériorité logique de la connaissance physique sur la construction des machines à un moment donné, ne peut pas et ne doit pas faire oublier l'antériorité chronologique et biologique absolue de la construction des machines sur la connaissance de la physique » (Canguilhem, 2003, p. 156). D'une part, il n'est pas rare que la construction des machines précède la connaissance des règles théoriques qui leur sont sous-jacentes. La machine à vapeur, par exemple, a historiquement précédé la formulation des principes de la thermodynamique. D'autre part, la technique elle-même oriente souvent la science vers les problèmes théoriques qu'il s'agira d'élucider. Pour reprendre le même

⁴¹ « Si la témérité d'une technique, ignorante des obstacles qu'elle rencontrera, n'anticipait constamment sur la prudence de la connaissance codifiée, les problèmes scientifiques, qui sont des étonnements après avoir été des échecs, seraient bien peu nombreux à résoudre. » (Canguilhem, 2013, p.81)

exemple, il est connu que les avancées théoriques de la thermodynamique, inversement, ont profité des travaux relatifs à l'amélioration des machines à vapeur⁴². La technique, sans rien présumer de la façon dont la science réglerait ces problèmes d'ordre théorique, oriente néanmoins son attention vers les obstacles à surmonter. Dans *Descartes et la technique* Canguilhem défend très explicitement cette idée: « L'embarras technique, l'insuccès et l'échec invitent l'esprit à s'interroger sur la nature des résistances rencontrées par l'art humain, à concevoir l'obstacle comme objet indépendant des désirs humains, et à rechercher une connaissance vraie » (Canguilhem, 1937, p. 99). Science et technique apparaissent ainsi inversées sur le plan chronologique, mettant par le fait même en défaut une représentation linéaire de la technique envisagée comme l'application d'un savoir.

Plasticité et rigidité : le continuum entre l'organisme et la machine

Les considérations précédentes conduisent Canguilhem à inverser le sens de l'identification cartésienne du vivant à la machine. L'identification que posait Descartes entre la machine et les corps vivants conduisait à un effacement des frontières entre ce qui est artificiel et ce qui est naturel. Dans un passage des *Principes de philosophie* cité par Canguilhem, il affirmait ainsi que les rouages d'une montre ne sont pas moins « naturels » que ne l'est la fructification des arbres, puisque ces deux phénomènes sont réductibles aux mêmes lois mécaniques (Canguilhem, 2003, p. 155). Canguilhem, cependant, propose d'inverser cette proposition en donnant préséance au vital plutôt qu'au mécanique. Ce qui fait que les montres ne sont pas si différentes des arbres et du vivant en général, c'est qu'elles sont justement *issues* du vivant :

Mais, de notre point de vue, nous pouvons et nous devons inverser le rapport de la montre et de l'arbre et dire que les roues dont une montre est faite afin de montrer les heures, et, d'une façon générale, toutes les pièces des mécanismes montés pour la production d'un effet d'abord seulement rêvé ou désiré, sont des produits immédiats ou dérivés d'une activité technique aussi authentiquement organique que celle de la fructification des arbres et, primitivement, aussi peu consciente de ses règles et des lois qui en garantissent l'efficacité, que peut l'être la vie végétale. (Canguilhem, 2003, p. 155)

Cette inversion du raisonnement de Descartes illustre particulièrement bien la légitimité qu'accorde Canguilhem, dans ses écrits, à un point de vue prenant pour point de départ le vivant. On constate, ici encore, cet apparent conflit entre les exigences de la

⁴² Voir l'entrée « Chaleur » dans le *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences* de Dominique Lecourt (2006).

connaissance objective et le concept de vie en général. L'assimilation de Descartes entre le naturel et l'artificiel répond à un besoin de connaissance, celui de rendre équivalentes toutes les règles de la physique. Canguilhem, cependant, nous montre sans cesse que ce point de vue ne peut lui-même se passer du finalisme qui caractérise la vie. Sa position consiste, pour insister sur ce point, à assumer pleinement ce finalisme sans pour autant renoncer à connaître la vie de façon objective.

Ainsi, entre l'organisme et la machine, il n'y a aucune rupture : « Un outil, une machine ce sont des organes, et des organes sont des outils ou des machines » (Canguilhem, 2003, p. 148). À cet égard, Canguilhem répond à ses propres exigences philosophiques telles que nous les avons vues dans « Aspects du vitalisme » : il ne peut y avoir deux ordres d'entités, ou deux « empires », comme dans le vitalisme de Bichat. Canguilhem ne base son vitalisme sur aucune force vitale qui ferait exceptions aux lois de la nature. Il pose simplement une priorité axiologique au fait que nous sommes avant tout des vivants constructeurs de machines.

Cette continuité exprimée par Canguilhem ne conduit cependant pas, comme chez Descartes, à une identité. Elle ne signifie pas que nos machines ne seraient pas distinguables des vivants. Plusieurs faits bien connus nous permettent en effet distinguer facilement nos machines actuelles des êtres vivants. Pour Canguilhem, la différence essentielle réside dans la finalité, qui est plus « rigide » dans les mécanismes et plus « plastique » dans l'organisme. L'embryologie est l'un des exemples privilégiés de Canguilhem pour évoquer la plasticité caractérisant le vivant⁴³. Rien ne révèle plus l'incroyable souplesse du vivant que la croissance et le développement d'un embryon, et c'est ainsi souvent pour mettre en lumière cette spécificité du vivant, irréductible à l'analyse, que celui-ci a recours à cette discipline dans plusieurs de ses textes⁴⁴. Plus précisément, ce que l'embryologie met en lumière pour Canguilhem, c'est l'absence d'une finalité « rigide, univoque, univalente » (Canguilhem,

⁴³ Le concept de plasticité est utilisé en biologie en plusieurs sens (par exemple : adaptabilité des organismes à la variation de l'environnement, capacité d'un génotype à produire des phénotypes différents, capacité du cerveau à se modifier lors de l'apprentissage, etc.). Nous l'utilisons ici dans un sens très large, en opposition au terme « rigidité » employé par Canguilhem. Pour une analyse du concept de plasticité en biologie, voir : Nicoglou (2018); Nicoglou (2015).

⁴⁴ « Il est certain que le phénomène biologique fondamental pour les vitalistes, dont les images qu'il suscite comme aussi les problèmes qu'il soulève retentissent à quelque degré sur la signification des autres phénomènes biologiques, c'est celui de la génération. Un vitaliste, proposerions-nous, c'est un homme qui est induit à méditer sur les problèmes de la vie davantage par la contemplation d'un œuf que par le maniement d'un treuil ou d'un soufflet de forge. » (Canguilhem, 2003, p. 112)

2003, p.150). Le finalisme de la machine est fixé à l'avance lors de sa construction, alors que la genèse d'un être vivant est une histoire qui ne peut être prédite à partir des premières étapes du développement embryonnaire. D'où l'importance pour Canguilhem de la théorie de l'épigenèse, opposée à la théorie préformationniste : « Si la conception cartésienne était vraie, s'il y avait à la fois préformation dans le germe et mécanisme dans le développement, une altération au départ entraînerait un trouble dans le développement de l'œuf ou bien l'empêcherait » (Canguilhem, 2003, p. 153). Là où la machine se conforme à un plan établi d'avance, l'embryon explore des potentialités. C'est ainsi, pour reprendre l'exemple donné par Canguilhem, que la dissociation de blastomères issus d'un œuf d'oursin peut donner naissance à deux larves distinctes aux dimensions normales (Canguilhem, 2003, p. 153-154). Les conditions premières de l'embryon ont beau être dérangées, son développement n'en sera pas qualitativement altéré.

C'est ce qui conduit Canguilhem à faire de cette histoire et des potentialités qui l'accompagnent une définition de la vie : « La vie est expérience, c'est-à-dire improvisation, utilisation des occurrences ; elle est tentative dans tous les sens » (Canguilhem, 2003, p.152). Cette marge de manœuvre, cette plasticité que possède la vie, s'incarne de façon générale dans deux phénomènes bien connus en biologie: la vicariance des fonctions et la polyvalence des organes (Canguilhem, 2003, p.150). Ce que ces deux phénomènes mettent en lumière, c'est que le lien entre la structure d'un organe et sa fonction n'est pas aussi rigide qu'il ne le serait dans un mécanisme: là où la fonction d'un mécanisme est fixe, la fonction de l'organe est souple et peut moduler si par exemple un autre organe est manquant : « À la limite, on doit reconnaître que, dans l'organisme, la pluralité de fonctions peut s'accommoder de l'unicité d'un organe. Un organisme a donc plus de latitude d'action qu'une machine. Il a moins de finalité et plus de potentialités » (Canguilhem, 2003, p.151-152).

Une autre façon d'exprimer cette différence consiste à dire que la machine correspond à la somme de ses parties, contrairement à l'organisme dans lequel le tout serait irréductible à l'analyse des parties. On peut diviser une machine, la réduire à une série de pièces que l'on peut soumettre à l'analyse et ainsi comprendre son fonctionnement global. Cependant, diviser le vivant en parties aussi essentielles que possible ne conduira qu'à la perte de ce que nous définissons comme étant vivant. Ce fait n'est pas sans rappeler le concept

d' « émergence », couramment évoqué en biologie lorsque l'on passe d'un niveau à un autre, par exemple de la cellule au tissu ou de l'organe à l'organisme. L'émergence, dans son sens le plus généralement admis, désigne l'apparition de fonctions ou de propriétés qui, bien que découlant d'un niveau inférieur d'organisation, ne peuvent être prédites ou entièrement expliquées par ce niveau inférieur⁴⁵. C'est dans un sens semblable que Canguilhem note l'impossibilité théorique de standardiser les « pièces » du vivant. Seule une machine peut être rigoureusement soumise à une normalisation de ses parties, permettant d'en interchanger les pièces : « (...)une machine présente une rigidité fonctionnelle nette, rigidité de plus en plus accusée par la pratique de la normalisation » (Canguilhem, 2003, p.149). La plasticité de la vie en fait au contraire une histoire en mouvement qui ne se laisse pas aussi facilement diviser. En cela, elle s'oppose aux exigences de la raison telles que nous l'avons précédemment définie. La raison cherche en effet à calculer et à diviser, elle « vit de faire des bilans et n'approuve que ceux où la somme des parties nous donne la connaissance du tout » (Canguilhem, 2015, p. 313).

Il serait sans doute possible d'argumenter que certaines de nos machines les plus récentes sont plus « plastiques » et moins « rigides » que les machines décrites par Canguilhem. Il faut cependant rappeler que ces distinctions entre rigidité et plasticité ne changent au fond rien à la thèse de Canguilhem, au sens où même si nos machines étaient en tout point semblables à nous, cela ne rendrait pas moins irréductible leur origine vitale. Il importe, pour notre propos, d'insister sur ce point. Oui, nous dit-il, les machines actuelles sont distinguables des vivants par leur rigidité; mais il n'y a aucune raison de croire que cela demeurera ainsi. Rigidité et plasticité ne sont au fond que les pôles d'un continuum, et ne représentent pas deux entités ontologiquement distinctes. Dans une note de bas de page à la toute fin de son texte, Canguilhem semble clairement envisager la possibilité que cette distinction puisse tendre à s'effacer. En faisant référence à des disciplines encore jeunes, la « bionic » et le « bio-engineering », il souligne qu'une « nouvelle espèce d'ingénieurs » a vu

⁴⁵ La notion d'émergence, bien que couramment évoquée par les biologistes, ne semble pas toujours signifier exactement la même chose. Elle est en effet parfois mobilisée dans un sens uniquement épistémologique (l'impossibilité de déduire les propriétés du tout à partir de ses composantes), mais parfois dans un sens ontologique beaucoup plus fort, en tant qu'alternative à une réduction du vivant à la matière. Le concept d'émergence reçoit aujourd'hui une attention particulière dans le cadre de l'étude de systèmes complexes et des recherches sur la vie artificielle. Sur la notion d'émergence aujourd'hui, voir : (Bedeau et Humphreys, 2008; Malaterre, 2013a)

le jour au Massachusetts Institute of technology (MIT), et qu'elle trouve dans le vivant un modèle technologique fécond (Canguilhem, 2003, p.163). Ces réflexions, comme nous le verrons plus loin, sont plus que jamais d'actualité avec la biologie de synthèse. Elles n'altèrent en rien l'essentiel de la thèse de Canguilhem, qui est que l'organisme, avec sa normativité et son mouvement autonome, est un point de départ irréductible pour comprendre l'origine des machines.

Le rôle des modèles techniques : du mécanisme à la cybernétique

Ces derniers exemples montrent de quel intérêt à la fois biologique et technique peuvent être les phénomènes qui semblent s'éloigner du fonctionnement des machines qui nous sont les plus familières. Pour Canguilhem, il serait à la fois plus légitime et plus avisé d'en reconnaître l'originalité, plutôt que de chercher à les réduire aux fonctions déjà bien connues des objets qui nous entourent. C'est cette question qui, comme nous le verrons, est abordée dans « Modèles et analogies dans la découverte en biologie » (1963). En remettant en question les conceptions de la philosophie mécaniste concernant la machine et plus généralement la technique, Canguilhem vient moins condamner l'analogie technique qu'il ne vient réviser sa signification. Cette critique de la philosophie mécaniste n'implique pas que l'on doive renoncer à toute comparaison. Au contraire, l'existence d'une continuité entre l'organisme et la machine vient expliquer en partie pour Canguilhem cette inclinaison des êtres humains à constamment chercher dans la technique une source de compréhension des êtres vivants.

Il est en effet facile de constater l'importance de cette inclination dans l'histoire de la biologie. Pendant très longtemps, la déduction anatomique s'est servie de l'assimilation à des mécanismes comme moyen d'expliquer et de comprendre les fonctions des différents organes. Cette tradition, d'ailleurs, se reflète autant dans le vocabulaire anatomique que dans l'étymologie même du mot « organe », renvoyant à un outil ou un instrument⁴⁶. Or, il ne suffit pas d'évoquer une simple préférence ou une contingence historique pour expliquer cette tendance à comparer la machine et l'organisme. L'inclination que nous avons décrite n'est pas fortuite pour Canguilhem, et celui-ci va même en effet jusqu'à parler d'une

⁴⁶ « Le vocabulaire de l'anatomie animale, dans la science occidentale, est riche en dénominations d'organes, de viscères, de segments ou de régions de l'organisme exprimant des métaphores ou des analogies technologiques. » (Canguilhem, 1983, p. 323)

« extension systématique et réfléchie d'une structure de la perception des organismes par l'homme » (Canguilhem, 1983, p. 306). C'est l'expérience technique du vivant, trouvant sa source dans l'organisme lui-même, qui lui fait naturellement percevoir des organes là où il y a des mécanismes et des mécanismes là où il y a des organes. En ce sens il nous semble y avoir un parallèle entre cette « extension » ou cette « structure de la perception » et les thèses développées dans « Machine et organisme ». Si l'homme est ainsi naturellement enclin à percevoir dans l'organe des mécanismes (et vice-versa), c'est en raison de cette continuité biologique reliant l'organisme à la machine qui, comme nous l'avons vu, ne peut faire l'économie de notions téléologiques.

Mais quels sont donc le rôle et la portée réelle, scientifique, de ces analogies dont le médecin ou le biologiste ont fait généreusement usage au cours de l'histoire? Peut-on se servir d'un modèle mécanique sans pour autant affirmer comme Descartes une identité entre la technique humaine et les mécanismes vivants? Dans « Modèles et analogies dans la découverte en biologie », Canguilhem étudie cette question au-delà de sa critique initiale de la philosophie mécaniste. L'enjeu se situe alors moins du côté technique que du côté scientifique. Il s'agit de se questionner sur la pertinence objective d'une comparaison entre l'organisme et la machine, en retraçant l'évolution du concept de modèle et en évaluant sa fécondité en biologie.

Dès le début du texte, Canguilhem distingue deux rôles qu'ont traditionnellement remplis les modèles scientifiques. Le premier qui, comme nous le verrons, est bien plus proche des sciences biologiques, désigne « un groupement de correspondances analogiques entre un objet naturel et un objet fabriqué » (Canguilhem, 1983, p. 305). C'est une analogie à proprement parler, qui permet surtout de marquer les ressemblances entre un objet à connaître (l'objet naturel) et un objet déjà bien connu (l'objet fabriqué). Il s'agit donc de ce que Canguilhem nomme plus loin une « réduction », puisque les caractéristiques ou les fonctions inconnues de l'objet naturel ne sont pas déduites, mais assimilées à d'autres caractéristiques connues. C'est pourquoi ce premier rôle peut être tenu pour relativement « naïf » : on ne découvre au fond aucune fonction nouvelle de l'organisme, on lui transpose des fonctions issues de notre expérience technique. C'est cette critique d'ailleurs, rapportée

par Canguilhem, qu'adressait Claude Bernard à la méthode de l'analogie, à laquelle il opposait sa propre méthode, la physiologie expérimentale⁴⁷.

Le second rôle du modèle a cependant une valeur heuristique beaucoup plus considérable, et est plus souvent associé aux sciences physiques. Il s'agit d'un « système de définitions sémantiques et syntactiques, établies dans un langage de type mathématique, concernant les rapports entre des éléments constitutifs d'un objet structuré et leurs équivalents formels » (Canguilhem, 1983, p. 305). Ici, il ne s'agit pas d'une simple analogie : une théorie exprimée dans un langage formel vient montrer, après déductions mathématiques, en quoi les relations sont conservées entre des objets ou des phénomènes que nous n'aurions pas forcément mis en rapport par leur ressemblance. Reprenant les mots de Joseph Fourier, Canguilhem donne les exemples éloquentes de la propagation de la chaleur, du mouvement des ondes, et de la vibration des lames élastiques, qui sont « intelligibles au moyen d'équations mathématiquement identiques » (Canguilhem, 1983, p. 312). Plutôt que d'une réduction, ou d'une simple assimilation d'un objet à un autre, il s'agit ici d'une déduction qui s'opère directement à partir de la théorie mathématique et qui peut conduire à une compréhension nouvelle et originale d'un phénomène physique. Ainsi, entre le modèle (par exemple, celui du mouvement des ondes) et le phénomène à étudier (par exemple, celui de la vibration de lames élastiques) il n'y a pas une simple transposition de l'imagination; il y a au contraire une réelle correspondance de leurs rapports mathématiques.

Il serait légitime de voir, dans la description de ces deux rôles du modèle scientifique, l'héritage chez Canguilhem d'une conception de la science fidèle à celle de Bachelard. La science contemporaine, du moins la science physique, ne procède pas directement à partir des phénomènes. Il faut dans un premier temps « déconcrétiser » le réel, et au besoin réorganiser les images intuitives et de notre compréhension première des phénomènes. Les mathématiques, elles-mêmes prises pour objet d'étude, ouvrent alors à une compréhension originale du réel que l'esprit ou l'imaginaire du scientifique n'auraient pas forcément produite. Elles montrent au physicien ce qu'aucun outil ne peut lui montrer, ce qui n'existe

⁴⁷ « On savait déjà, par des connaissances acquises expérimentalement dans les usages de la vie, ce que c'était qu'un réservoir, qu'un canal, qu'un levier, qu'une charnière, quand on a dit par simple comparaison que la vessie devait être un réservoir servant à contenir des liquides, que les artères et les veines étaient des canaux destinés à conduire des fluides, que les os et les articulations faisaient office de charpente, de charnières, de leviers, etc. » (cité par Canguilhem, 1983, p. 307-308)

encore qu'en puissance, « les mille traits d'une Réalité cachée »⁴⁸. C'est pourquoi d'ailleurs Canguilhem peut tenir la première définition du modèle pour plus naïve : l'identification des fonctions d'un organe à celles d'un objet technique correspond à une préférence de l'imagination ou, pour reprendre à nouveau les mots de Canguilhem, à une « structure de la perception humaine ».

Qu'en est-il de ces différents rôles de modèle dans l'histoire de la biologie? Certes les modèles mécaniques n'occupent pas tout à fait la même place aujourd'hui qu'à l'époque de la mécanique classique, des constructeurs d'automate et des iatomécaniciens. Ce genre de modèle cartésien, correspondant rigoureusement au premier rôle que nous avons décrit, ne pouvait dès le XIX^e siècle être tenu par les biologistes que comme une « vue étroite et insuffisante » (Canguilhem, 2003, p. 129). La recherche d'un sens caché, d'un plan d'organisation au-delà de ce que François Jacob nommait la « structure visible » (Jacob, 1970), a en effet progressivement rendu désuète l'assimilation d'une machine, au sens classique du terme, aux phénomènes vivants. Dans son article sur la notion de vie, Canguilhem reprend en partie les découpages de l'histoire de la biologie de François Jacob et insiste en particulier sur l'importance de l'embryologie, qui « s'est instituée comme une science capable d'encourager la physiologie à se libérer de la fascination du mécanisme ». (Canguilhem, 1989, p. 550). L'embryologie, et plus précisément la naissance des théories de l'épigenèse, incarne ainsi mieux que d'autres disciplines les difficultés réelles auxquelles a dû faire face la philosophie mécaniste à partir des XVIII^e et XIX^e siècles.

Cependant, ce regard porté vers l'organisation, contemporain de la naissance de la biologie comme discipline, ne marque pas la fin des modèles d'inspiration technique. Canguilhem montre ainsi que, par le biais des modèles électriques ayant servi à l'étude de la circulation nerveuse, s'est progressivement développé un nouveau genre de modèle plus formel en biologie, dont l'évolution correspondrait aujourd'hui à la cybernétique, c'est-à-dire aux théories générales de la circulation d'information au sein d'un système : « Ce n'est pas de la machine à vapeur mais de la pile et de la bobine d'induction que sont nés par épigenèse technique les montages électroniques récemment promus à la dignité de modèles

⁴⁸ « Dans la nouvelle science relativiste, un unique symbole mathématique dont la signification est proluxe désigne les mille traits d'une réalité cachée (...) » (Bachelard, 2012, p. 59)

à feed-back des fonctions des nerfs et des centres nerveux » (Canguilhem, 1983, p. 310). Les machines qui servent aujourd'hui de modèles au vivant sont les systèmes électroniques tels que les ordinateurs, et sont centrées sur la régulation d'un flux d'information plutôt que sur un simple enchaînement de mécanismes. Où se situent donc ces nouvelles machines par rapport aux définitions que nous avons présentées? Ces modèles informationnels constituent selon Canguilhem un intermédiaire entre l'analogie mécanique et les théories entièrement formalisées de la physique. Les systèmes électroniques sont certes plus susceptibles d'être formalisés que les modèles mécaniques, mais ils demeurent, du moins en partie, des explications analogiques. Comme nous l'avons vu, il faut, pour que le modèle tienne un rôle dépassant la simple analogie, que deux phénomènes distincts puissent être reliés par leurs rapports, par une même structure mathématique. Or, selon Canguilhem, il n'y a toujours rien de tel en biologie, et même les montages cybernétiques ne permettent pas encore, par exemple, de transposer librement du cerveau à l'ordinateur. La plasticité du cerveau, le fait entre autres qu'une lésion n'abolisse pas nécessairement son fonctionnement global, fait en sorte que l'ordinateur demeure une « figure » plus qu'un « exemple ». Il aide peut-être l'imagination à appréhender les fonctions du cerveau, mais il ne constitue pas l'un des cas particuliers d'une théorie plus générale des systèmes, aux côtés duquel le cerveau ne serait ni plus ni moins qu'un autre exemple. Il n'y a encore rien de comparable, dans les modèles cybernétiques, aux modèles mathématiques qui sont le propre des sciences physiques.

La biologie contemporaine, selon Canguilhem, ne s'est donc toujours pas départie du modèle par analogie, et c'est encore souvent pour réduire l'organisme à un système inerte que de telles analogies sont déployées. Dans la mesure où nos machines se distinguent encore clairement par leur rigidité, il apparaît trompeur de pousser l'analogie au-delà de son rôle heuristique. Pourtant, Canguilhem note la difficulté que peut représenter pour les biologistes la résistance « à la tentation de conférer à un modèle une valeur de représentation » (Canguilhem, 1983, p.313). Pourquoi serait-il plus difficile pour le biologiste de percevoir les limites de son modèle? Au-delà du fait que le modèle technologique constitue l'approche « naturelle » ou « naïve » de la connaissance du vivant par le vivant, la raison principale qu'évoque Canguilhem – et qui fait écho à sa conception générale de la vie – est que le biologiste fait face à des *totalités* représentant plus que la somme des parties. Réduire la complexité, en la décomposant de manière analytique, fait disparaître ces totalités qui sont

pourtant nécessaires à la compréhension du phénomène vivant en tant que tel. Décomposer le vivant, c'est perdre de vue sa normativité vitale. C'est donc par un souci de représentation mentale que le biologiste assimile à des machines les organes ou les cellules, qui sans ces représentations perdraient leur sens biologique : « La méthode du modèle permet de comparer des totalités indécomposables. Or, en biologie, la décomposition est moins une partition qu'une libération de totalités, d'échelle plus petite que la totalité initiale » (Canguilhem, 1983, p. 311). Cette totalité, comme nous l'avons vu au dernier chapitre, est sans aucun doute à rapprocher de l'activité normative du vivant. Il faut voir, de façon sous-jacente à cette explication, une nouvelle démonstration de cette normativité qui est au cœur de la position philosophique de Canguilhem, et que la connaissance de la vie se doit de prendre pour point de départ.

Cette nécessaire représentation de la totalité n'implique cependant pas qu'il doit y avoir réduction aux machines. La tentation de franchir ce pas peut bien constituer un obstacle à une compréhension des phénomènes organiques; de ceux qui dépassent les caractéristiques rigides de nos machines. Canguilhem propose ainsi de faire des mots de l'électrophysiologiste anglais Edgar Douglas Adrian un conseil de prudence susceptible de surmonter cet obstacle: « *What we can learn from the machines is how our brain must differ from them!* » (Canguilhem, 1983, cité à la page p.314). C'est précisément au niveau des limites épistémologiques entre l'organisme et la machine que résident les phénomènes ayant le plus grand intérêt biologique. Cette façon de procéder permet de partir du connu (la machine) pour explorer l'inconnu. En se limitant aux seules caractéristiques de l'organisme qui peuvent être rapportées à celles de nos machines, on se restreint aux images qui nous sont déjà familières et on ignore l'originalité du phénomène à connaître. Il ne fait pas de doute que, pour Canguilhem, la science pourrait ainsi, à l'instar de la technique, se mettre « à l'école du vivant ».

Conclusion

À travers ses réflexions sur la technique et ses études sur l'assimilation cartésienne du corps à la machine, Canguilhem met en lumière l'irréductibilité du vivant à la connaissance de la matière inerte. Les efforts des théories mécanistes pour réduire l'apparente finalité de l'organisme à des mécanismes répondent au fond simplement aux exigences

méthodologiques de la connaissance objective. Cependant, si ces théories peuvent bien avoir un pouvoir explicatif, il demeure qu'elles sont en quelque sorte hors du temps; elles sont incapables de rendre compte dans une perspective historique de l'origine de cette apparente finalité, de cette illusion de mouvement autonome. Voilà ce qui rend légitime la démarche de Canguilhem – et celle de tous ces ethnographes qui l'inspirent – consistant à prendre pour point de départ l'organisme afin de comprendre l'apparition et le développement de la technique. Cette démarche que l'on pourrait qualifier dans un sens très restreint de « vitaliste » ne fait au fond que poser le vivant comme condition préalable de toute machine, et ne pose aucune interdiction à la connaissance objective. En fait, cette proximité de la technique et du vital permet dans une certaine mesure de mieux expliquer, comme nous l'avons vu, cette tendance à voir dans les mécanismes des organes, et dans les organes des mécanismes.

Si la démarche de Canguilhem conduit ainsi à repenser le sens même des analogies entre machine et organisme, elle montre aussi les limites des tentatives de réduire effectivement l'un à l'autre. Si la machine peut servir de modèle à la représentation du vivant, c'est dans la mesure où elle permet la représentation d'une totalité. « Les formes vivantes étant des totalités dont le sens réside dans leur tendance à se réaliser comme telles (...), elles peuvent être saisies dans une vision, jamais dans une division », écrivait Canguilhem dans l'introduction à *La connaissance de la vie* (Canguilhem, 2003, p. 14). Mobiliser l'analogie mécaniste dans le but d'opérer une réduction à l'inerte ne peut ainsi que limiter les sciences de la vie dans leur compréhension des phénomènes authentiquement organiques.

Réciproquement – et cela sera pour nous d'une grande importance lorsque nous traiterons de la biologie de synthèse – une technique rigoureusement « cartésienne », c'est-à-dire attachée à diviser et à analyser avant de concevoir, verra toujours ses machines facilement distinguables du vivant par leur rigidité fonctionnelle. Au même titre que la science gagne à chercher dans l'organisme ce qui diffère de nos machines, les machines elles-mêmes, comme nous le verrons, seront appelées avec la biologie de synthèse à chercher dans le vivant un véritable modèle de conception.

Rapport-Gratuit.com

Deuxième partie

La technique et le vivant en biologie de synthèse

Chapitre 4 – L’ingénierie du vivant

La biologie de synthèse est souvent présentée comme étant à l’intersection entre la biologie et l’ingénierie. À travers ses différentes définitions et malgré la diversité de ses ambitions, il serait ainsi possible de faire ressortir de cette discipline aux contours flous un point commun qui serait celui d’un « esprit ingénieur ». C’est du moins, comme plusieurs auteurs l’on fait remarquer, ce qui ressort de la plupart des discours et des promesses des acteurs de cette jeune discipline (Larrère et Larrère, 2015; Gelfert, 2013; Bensaude-Vincent et Benoit-Browaëys, 2011; Morange, 2009; O’Malley, 2009; Serrano 2007; Brent, 2004). Contre le bricolage aveugle de l’évolution, la biologie de synthèse marquerait ainsi l’irruption dans le monde du vivant des méthodes de l’ingénierie, ouvrant dès lors la possibilité de concevoir (*design*) rationnellement de nouvelles formes de vie ou, plus souvent, de nouvelles fonctionnalités dans le vivant.

D’un point de vue épistémologique, cette approche ingénieure conduit en premier lieu à un questionnement sur le rôle et le sens de la technique. Prôner une conception technique entièrement rationalisée vient en effet inscrire la biologie de synthèse en continuité avec la philosophie mécaniste telle que nous l’avons précédemment décrite, du moins en ce qui a trait à son projet. L’ingénieur qui construit une machine entend contrôler les paramètres, prévoir les résultats et maîtriser son objet. Prétendre être arrivé à un tel niveau de maîtrise du vivant supposerait donc à première vue que celui-ci soit décomposable en parties standardisées et puisse être traité comme une machine. Les discours de la biologie de synthèse seraient ainsi tributaires d’une conception de la technique qui, comme nous l’avons vu, est le corolaire d’une telle analogie; soit celle de l’application raisonnée d’un savoir.

L’enjeu de ce chapitre consistera à faire ressortir cet esprit ingénieur et analyser les conceptions de la technique qui lui sont sous-jacentes. Nous nous concentrerons pour ce faire sur l’approche la plus centrale et la plus répandue en biologie de synthèse, celle qui passe par la conception et la modélisation de nouveaux « dispositifs » génétiques⁴⁹. C’est en effet dans les discours qui l’accompagnent que ressort le plus clairement l’esprit ingénieur que nous

⁴⁹ Maureen O’Malley et ses collègues nomment cette approche : « *DNA-based device construction* » (O’Malley et al., 2007).

avons évoqué. Nous débiterons en examinant dans quel contexte historique s'est formée cette approche, en portant une attention particulière aux bases techniques et scientifiques sur lesquelles elle s'appuie pour prétendre parvenir à une réelle maîtrise du vivant. Nous verrons ensuite plus précisément comment les ingénieurs pionniers de la biologie de synthèse, notamment ceux travaillant au MIT, font la promotion de cette approche. Nous évaluerons enfin la conception de la technique que ces discours traduisent. Nous constaterons alors que, paradoxalement, les tentatives de rationalisation du vivant entreprises par la biologie de synthèse impliquent une reconnaissance de la complexité du vivant et des limites que pose cette complexité.

De l'étude du vivant à sa synthèse

Il existe une continuité très générale entre les approches réductionnistes de la biologie moléculaire du dernier siècle et les ambitions actuelles de la biologie de synthèse (Campos, 2009; Morange, 2013b; Boudry & Pigliucci, 2013). La tentative de réduire l'explication du vivant à celle de ses composantes matérielles fait partie d'un mouvement plus vaste et continu en histoire de la biologie, qui trouve son affirmation la plus forte dans l'avènement de la biologie moléculaire entre les années 1940-1960. Les biologistes Ernst Mayr et François Jacob avaient d'ailleurs bien caractérisé ce mouvement en le distinguant d'un autre qui lui est parallèle, l'approche évolutionniste (Mayr, 1961; Jacob, 1970). Ce tableau général des sciences du vivant comprendrait ainsi d'un côté une tendance réductionniste, visant à expliquer le fonctionnement de l'organisme par ses constituants, et de l'autre, une tendance évolutionniste qui considérerait plutôt les totalités que sont les individus, les genres ou les espèces⁵⁰. Suivant ce large portrait, la biologie de synthèse viendrait s'inscrire pour l'instant du côté du réductionnisme, et serait donc à ce titre l'une des héritières de la biologie moléculaire.

Cette partie importante des sciences de la vie dont l'effort vise à comprendre le fonctionnement du vivant en le décomposant a souvent intégré à sa méthode l'usage de métaphores et d'analogies avec la machine (Keller, 2004) La notion de fonction elle-même revêt en effet une connotation technologique, puisqu'elle suggère implicitement que l'organe ou la structure en question a un rôle, qu'elle est « faite » pour telle ou telle tâche, de la même

⁵⁰ Michel Morange opte pour le même schéma général dans son *Histoire de la biologie* (2015).

façon qu'un outil ou une machine est conçue en vue d'une certaine fin à réaliser. L'usage de la notion de fonction peut ainsi inciter à croire que le vivant pourrait en principe être démonté et analysé afin d'en décortiquer le sens et d'en comprendre les fonctionnalités. Même si cette façon d'aborder l'étude de l'organisme et l'usage même du terme « fonction » a été largement critiquée dans les dernières années, l'idée qu'une rétro-ingénierie du vivant est possible demeure toujours d'actualité en biologie de synthèse (M. Boudry et M. Pigliucci, 2013)⁵¹.

En se fiant aux premières impressions et aux opinions les plus médiatisées, la biologie de synthèse ne fait pas seulement prolonger cette approche réductionniste, mais la porte à un tout autre niveau. Comme son nom le suggère, l'ambition serait d'aller plus loin que la simple analyse du vivant et de passer à sa reconstruction (synthèse). Prenant pour adage la phrase maintenant célèbre de Richard Feynman : « *What I cannot create, I do not understand* »⁵², ce point de vue semble d'abord supposer que le vivant doit en principe pouvoir être décomposé puis recomposé, une étape à la fois, afin que nous puissions considérer avoir enfin compris son fonctionnement. Après avoir atteint les fondements du vivant, il serait possible de le reconstruire. Comme le suggère la référence aux mots de Feynman, on retrouve en effet au-delà de la dimension technique de cette démarche une aspiration authentiquement théorique. Cette position épistémologique qui consiste à « connaître par le faire » peut être comparée aux synthèses depuis longtemps effectuées en chimie, qui permettent par exemple d'étudier à partir d'un modèle les caractéristiques d'une enzyme « naturelle » (Benner et Sismour, 2005). Comme le montre Michel Morange, « reconstruire » une molécule organique dans un laboratoire permet depuis plusieurs décennies de prouver que l'on sait maintenant précisément comment caractériser celle-ci : « *The rise of synthetic biology is a return to the « old » traditions: one can claim that a system has been fully described only when it has been possible to reconstruct it* » (Morange, 2009).

Dans le cas de la biologie de synthèse, ce n'est cependant pas seulement à des protéines, mais à la vie elle-même que l'on étend cette ambition. Sur quelles bases techniques

⁵¹ Pour une réflexion philosophique sur la notion de fonction, voir le livre dirigé par Jean Gayon et Armand de Ricqlès (2010). Cette façon de supposer une fonction à chaque trait de l'organisme correspond à la vision « adaptationniste » de l'évolution qui a été sévèrement critiquée, notamment par les biologistes Stephen Jay Gould et Richard Lewontin (1979).

⁵² Cette phrase souvent citée du physicien et vulgarisateur Richard Feynman (1918-1988) a été retrouvée inscrite sur le tableau noir de celui-ci après sa mort. Sa signification réelle est toujours discutée. (O'Malley, 2009)

et scientifiques peut-on prétendre être ainsi passés à la « reconstruction » du vivant? L'ambition elle-même est loin d'être nouvelle, comme en témoignent par exemple les quelques occurrences du terme « biologie synthétique » au cours du dernier siècle⁵³. Mais les justifications actuelles de cet espoir de créer la vie sont à chercher dans l'histoire récente des sciences biologiques, à partir notamment de l'essor de la biologie moléculaire et, de façon plus importante, à partir du développement du génie génétique au cours des années 1970.

Le développement relativement récent d'une conception informationnelle du vivant occupe indéniablement une place majeure derrière cette ambition. À partir années 1950, avec l'élaboration du modèle de la structure en double hélice de l'ADN par Watson et Crick (1953), et de façon plus décisive au cours des années 1960, la notion d'information a été largement mobilisée par la biologie moléculaire et en est venue à participer à l'identité même de cette discipline. Après la découverte de l'ARN messager par Jacob et Monod et leurs collaborateurs en 1960, suivie du « décryptage » biochimique du code génétique par Matthaei et Nirenberg en 1961, le concept d'information s'est réellement imposé dans l'esprit des biologistes. Puisant dans le cadre conceptuel de l'époque, lui-même caractérisé par les messages codés utilisés dans la Seconde Guerre mondiale, par la cybernétique de Norbert Wiener et par la naissance de l'informatique, les sciences de la vie ont alors trouvé dans la notion de programme génétique non seulement une métaphore utile, mais une nouvelle vision du vivant (Morange, 2003).

Depuis les années 1970, on peut considérer que notre façon de « lire » le code s'est constamment accélérée et affinée, notamment grâce à de nouvelles techniques de séquençage de l'ADN issues du génie génétique. Ce progrès rapide culmine avec la génomique, que l'on peut considérer comme l'une des origines de la biologie de synthèse. Développée dans le sillage du fameux Projet Génome Humain (HGP), celle-ci a véritablement élargi notre lecture du code génétique en l'étendant à une échelle jusque-là inégalée. Aux carrefours entre biologie moléculaire, biologie cellulaire et informatique, la génomique permet de traiter et de comparer des génomes entiers, dont le nombre séquencé s'élargit de façon exponentielle

⁵³ On retrouve par exemple l'appellation « biologie synthétique » dès 1912 chez le chimiste français Stéphane Leduc (Bensaude-Vincent et Benoit-Browaëys, 2011). Les expériences de Leduc ne consistaient cependant pas à synthétiser des formes vivantes, mais à reproduire chimiquement des formes analogues ou comparables à celles du vivant. Pour une perspective historique sur la biologie de synthèse, voir notamment : Morange, 2010; Campos, 2009; Keller, 2004; Keller, 2009.

d'année en année. Le développement de ces techniques est l'une des conditions qui a historiquement permis le développement de la biologie de synthèse. Le séquençage d'ADN et de génomes entiers demeure en effet encore aujourd'hui l'outil de base, de plus en plus accessible, de cette discipline. Dans cet ordre d'idées, la biologie de synthèse prolonge la métaphore informationnelle, en revendiquant cependant maintenant être passé de la lecture du code génétique à son écriture (Bensaude-Vincent et Benoit-Browaëys, 2011). Ce sont les instructions du vivant que l'on prétend maintenant comprendre et utiliser.

Pour effectuer cette « réécriture », la biologie de synthèse s'appuie aussi sur une vision modulaire de l'organisme qu'elle partage avec la biologie des systèmes (Braillard, 2009). Cette dernière est en effet souvent dépeinte comme le verso théorique de la biologie de synthèse⁵⁴. Ce qui est effectivement commun à ces deux disciplines, c'est qu'elles conçoivent l'organisme comme étant constitué de « modules » ayant des fonctions bien définies et pouvant être traités indépendamment, à la façon des composantes électroniques constituant un ordinateur. Alors que la biologie des systèmes vise à caractériser ces modules, la biologie de synthèse viserait plutôt à intégrer ses propres modules « artificiels » au sein d'un vivant, ou encore à tester empiriquement les modèles de la biologie des systèmes. Même si cette distinction claire entre biologie des systèmes et biologie synthétique peut être questionnée, il demeure que la vision modulaire du vivant héritée de l'électronique est largement partagée par ces deux disciplines.

Voilà, de façon très générale, sur quel arrière-plan technique et métaphorique l'ambition de créer la vie semble aujourd'hui s'appuyer dans les discours des promoteurs de la biologie de synthèse. À ce stade, on peut légitimement se demander en quoi la biologie de synthèse se distingue fondamentalement du génie génétique, dont les techniques permettent déjà depuis longtemps de modifier le vivant au niveau de son information génétique. Cependant, la biologie de synthèse n'a pas seulement pour ambition de transférer certains gènes d'un organisme à un autre, mais d'imaginer puis de synthétiser de nouveaux systèmes de gènes en suivant une approche plus ascendante que le génie génétique. Par exemple, l'un des projets qui a le plus mis en avant-plan la biologie de synthèse dans les dernières années

⁵⁴ Cette vision de la biologie de synthèse et de la biologie des systèmes comme étant les « deux faces d'une même pièce » a notamment été critiquée par K. Kastenhofer (2013).

est celui de l'équipe de Craig Venter, qui en 2010 est arrivée à intégrer un génome entièrement modélisé puis synthétisé par l'homme au sein d'une bactérie *Mycoplasma mycoides* tout en gardant celle-ci en vie (Bensaude-Vincent et Benoit-Browaëys, 2011). L'ambition n'est donc plus simplement ici de modifier un gène individuel, mais de fabriquer de toutes pièces un système beaucoup plus large. Cette vision plus globale ou réseautique des circuits génétiques constitue d'ailleurs un autre point commun important avec la biologie des systèmes.

Il nous semble cependant que, plus fondamentalement, la biologie de synthèse se distingue de ses prédécesseurs par son aspect technique lui-même, qui est fortement inspiré des sciences d'ingénierie. L'un des exemples de réalisations de la biologie de synthèse parmi les plus souvent cités et parmi les plus représentatifs de cet aspect technique est celui du « *repressilator* », un modèle élaboré par les scientifiques Michael B. Elowitz et Stanislas Leibler (Elowitz et Leibler, 2000). Ceux-ci sont arrivés à « construire » un dispositif génétique analogue à une horloge biologique et à l'insérer dans une bactérie *Escherichia Coli*. Ce dispositif est constitué d'un circuit informationnel composé de répresseurs de transcription bien connus, qui mis en tandem ont permis d'exprimer sur une base régulière une protéine fluorescente, faisant ainsi « clignoter » la bactérie selon un cycle de temps prévisible. Le projet a d'abord été préalablement modélisé afin de simuler son fonctionnement (voir Fig. 1). C'est dans un deuxième temps, après ce travail d'abstraction, que le système en question a été intégré à la bactérie. Ce qu'il y a de significatif pour notre propos, c'est que le processus de conception est réalisé dans un premier temps indépendamment du processus de fabrication, de façon analogue aux modélisations que l'on peut retrouver en électronique. Le fait que l'on espère travailler sur le plan conceptuel à partir de « composantes » prévisibles et standardisées tend à rapprocher l'aspect technique de cette réalisation des principes généraux de l'ingénierie. En se fiant à cet exemple paradigmatique, on pourrait alors distinguer la biologie de synthèse par son approche ou sa méthode à la fois rationnelle et appliquée, que certains ont qualifiée d'« esprit ingénieur » (Morange, 2009).

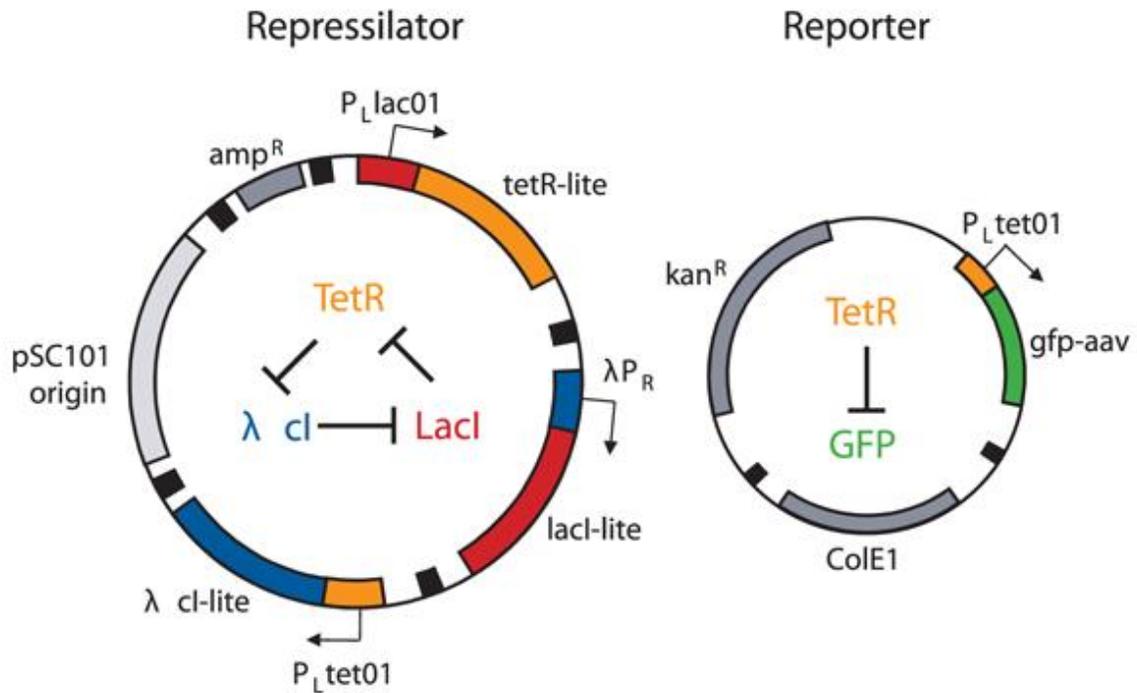


Figure 1 : Modélisation du circuit génétique « repressilator ». Chacun des trois gènes (λ cl, TetR et LacI; au centre du schéma de gauche) produit une protéine qui inhibe l'expression du gène suivant, formant ainsi une boucle de rétroaction négative. Le « comportement » de cette boucle de rétroaction est ensuite observé grâce à une protéine fluorescente (GFP; schéma de droite) qui est liée à cette boucle et ainsi exprimée de façon intermittente (Elowitz et Leibler, 2000).

Drew Endy, ingénieur au MIT que l'on pourrait considérer comme l'un des pionniers de la biologie de synthèse, revendique cette particularité. Avec la biologie de synthèse, on serait alors plus véritablement dans le « génie » que le génie génétique ne l'était lui-même, grâce à l'introduction de principes propres à l'ingénierie, tels que la standardisation, le découplage et l'abstraction (Endy, 2005; Canton, Labno, et Endy, 2008). Essentiellement, ces principes consistent, comme dans l'exemple précédent, à séparer l'étape de la construction d'un objet technique de l'étape de son *design* et de sa conception rationnelle.

Il est important de noter ici que la vision d'Endy n'est peut-être pas rigoureusement représentative des positions épistémologiques de toutes les approches que l'on retrouve en biologie de synthèse. Celle-ci est en effet souvent caractérisée par une multiplicité de méthodes, et ses contours disciplinaires sont parfois ambigus (Bensaude-Vincent, 2013;

O'Malley et al. 2007). En ce sens, la philosophe Maureen O'Malley et ses collègues proposent de diviser la biologie de synthèse en trois branches qui comportent des méthodes, des buts et des techniques différentes. La première, la construction de dispositifs ADN (« *DNA-based construction* »), correspond à la vision de Drew Endy et vise avant tout à rendre le domaine biologique accessible à un traitement ingénieur. Elle procède à partir de la synthèse d'ADN, puis elle entreprend d'isoler et de concevoir des modules conçus comme des composants fonctionnels. La seconde, l'ingénierie cellulaire à partir du génome (« *genome-driven cell engineering* ») rejoint des travaux analogues à ceux de Craig Venter, et vise à analyser et synthétiser des génomes entiers. Dans le cadre de ces travaux, le génome est traité comme un logiciel ou un programme qu'il s'agit d'introduire dans une cellule. C'est par cette approche que l'on cherche par exemple à concevoir une cellule minimale, c'est-à-dire comportant un minimum de gènes, qui pourrait éventuellement servir de « châssis » aux biologistes de synthèse. Enfin, une troisième approche cherche plus directement à recréer la vie en assemblant des « protocellules », c'est-à-dire des cellules d'une complexité minimale correspondant de façon approximative à des cellules vivantes. Pour ce faire, on procède non pas à partir du génome, mais à partir d'autres composants biologiques, tels que des lipides, des micelles et des ribosomes (O'Malley et al., 2007).

Malgré cette diversité de visées et de pratiques, il demeure cependant que l'approche de Drew Endy est la plus institutionnalisée et la plus fortement associée à la biologie de synthèse. C'est en effet en mobilisant les règles d'ingénierie défendues par Endy que les principaux commentaires scientifiques présentent cette discipline émergente (Par exemple : Brent, 2004; Heinemann et Panke, 2006; Andrianantoandro, 2006; Forster et Church, 2007; Voigt, 2007). On notera d'ailleurs que la branche de la biologie de synthèse que représente Drew Endy, décrite plus haut sous le nom de « *DNA-based device construction* », s'est institutionnalisée autour du MIT et de la Silicone Valley, deux foyers historiques de l'innovation ingénierie aux États-Unis⁵⁵. Le premier congrès de biologie de synthèse, intitulé *Synthetic Biology 1.0* et organisé par Drew Endy lui-même, s'est tenu au MIT et a contribué à former l'identité de cette discipline (Bensaude-Vincent et Benoit-Browaëys, 2011). Le

⁵⁵ Une carte interactive des principaux laboratoires de biologie de synthèse est disponible sur le site de *Synthetic Biology Project*: <http://www.synbioproject.org/sbmap/>

« style » ou l' « esprit » ingénieur, essentiel à ces centres technologiques, y a ainsi joué un rôle fondateur. C'est cette dimension que nous entreprendrons maintenant d'analyser.

Extraire la complexité du vivant

Allier la biologie et l'ingénierie ou, comme certains l'ont présenté, « insérer » l'ingénierie dans la biologie (Heinemann et Panke, 2006), soulève bon nombre de problèmes épistémologiques. Le premier et le plus évident est que l'on distingue généralement ces deux disciplines par leurs buts respectifs, l'un étant de comprendre, l'autre de construire. La biologie de synthèse constituerait ainsi une sorte d'hybride entre science et technique, pour laquelle connaître et faire se distingueraient difficilement. Ainsi retrouve-t-on couramment des projets et des discours oscillant entre ces deux pôles : tantôt des promesses d'applications multiples pour la pharmaceutique et l'industrie chimique; tantôt des déclarations annonçant la fabrication de la vie par l'homme et le dépassement imminent des frontières du vivant. Cette hybridité est cependant la source de « tensions » épistémologiques au sein de la biologie de synthèse, car il n'est pas toujours clair que la construction technique ne se fait pas aux dépens d'une réelle compréhension du vivant (O'Malley 2009). Par exemple, il est courant de retrouver dans la construction de dispositifs ADN (*DNA-based device construction*) une stratégie consistant à extraire ou surmonter la complexité biologique afin d'optimiser l'efficacité technique de l'ingénieur. Or, il n'est pas évident que cette stratégie soit réellement une nouvelle façon de « connaître par le faire », et non un renoncement à connaître le fonctionnement du vivant dans sa pleine complexité (*Ibid.*).

Comment s'articule cette stratégie en question? Il est généralement admis que la première difficulté à laquelle doit faire face l'ingénieur qui se tourne vers la biologie est la complexité incomparable des systèmes auxquels il a affaire. Même un organisme simple, unicellulaire, comporte un circuit d'information qui reste encore difficilement mesurable. Non seulement le flot d'information qui circule dans une cellule est-il quantitativement important, mais plusieurs macromolécules ont de surcroît des fonctions multiples, rendant presque impossible une modélisation fidèle à la réalité. La situation est par ailleurs aggravée par le fait qu'un être vivant, contrairement à un système inerte, se reproduit et, éventuellement, se transforme. C'est pour ces raisons, notamment, que les biologistes de synthèse se sont jusqu'à maintenant limités à concevoir des circuits génétiques relativement

simples, introduits dans des organismes modèles bien connus, telle que *Saccharomyces cerevisiae* (la levure de boulanger) ou la bactérie *Escherichia Coli*. Si tous les biologistes de synthèse ne s'accordent pas sur la possibilité éventuelle de caractériser fidèlement tous ces échanges d'informations, la plupart sont cependant confiants quant à la possibilité de « surmonter » cette complexité :

(...) the ability to engineer biology in a directed and successful manner is still rather limited today and as a consequence, the complexity of things we can efficiently make is still quite small. Synthetic biology with its engineering vision aims to overcome the existing fundamental inabilities in system design and system fabrication, by developing foundational principles and technologies to ultimately enable a systematic forward-engineering of (parts of) biological systems for improved and novel applications. (Heinemann et Panke, 2006)

Notons que l'on retrouve implicitement, dans la description de cette stratégie, l'idée que la complexité des systèmes vivants actuels, plutôt que d'être caractérisée, doit être éliminée, ou du moins simplifiée. Il ne s'agit plus de décrire ce qui existe, mais de synthétiser des systèmes encore inexistants dans la nature. Cette simplification consiste-t-elle alors en l'aveu d'une insuffisance de notre aptitude à comprendre le vivant dans sa complexité et sa diversité? Si on en croit le discours orthodoxe de la biologie de synthèse, cette simplification n'est pas du point de vue théorique une abdication, mais plutôt une position méthodologique s'inscrivant dans la stratégie du « connaître par le faire ». Devant l'immensité des données et des interactions caractérisant les systèmes auquel elle fait face, la biologie traditionnelle, analytique, ne suffirait plus : la biologie de synthèse consisterait alors à concevoir des systèmes plus simples, dont tous les paramètres sont connus, puis à avancer pas à pas selon une méthode cartésienne; c'est-à-dire des objets les plus simples aux objets les plus complexes. On trouvera par exemple une mise en œuvre concrète de cette méthode dans l'approche qui consiste à concevoir des « génomes fonctionnels minimaux », c'est-à-dire de plus petite taille possible, pour en étudier les caractéristiques fondamentales. L'idée est réellement ici de démonter un génome, comme on démonte une machine, puis d'en identifier les composantes essentielles. L'équipe de Craig Venter, par exemple, a réussi en 2016 à synthétiser une cellule viable comprenant seulement 473 gènes, dont le deux-tiers ont une fonction connue (Hutchison et al., 2016). De cette façon, on espère réduire la complexité des circuits génétiques (ne serait-ce qu'en nombre de gènes), afin d'identifier et de caractériser les séquences génétiques minimales nécessaires au maintien de la vie. Par cette

simplification, les cellules ainsi modifiées seraient plus facilement prévisibles et contrôlables que des cellules « naturelles ».

Cependant, au-delà de ces fins théoriques, la « décomplexification » du vivant semble bien plus souvent servir en biologie de synthèse une ambition pratique. C'est en effet en soulignant les futures applications possibles que les ingénieurs, sur papier, font couramment la promotion de cette stratégie (O'Malley, 2009). La complexité du vivant y est avant tout présentée comme un obstacle à la construction de systèmes efficaces et utiles. Tom Knight, scientifique et ingénieur au MIT, abonde par exemple en ce sens en affirmant de façon radicale: « *An alternative to understanding complexity is to get rid of it* »⁵⁶. Le « comprendre », dans cet ordre d'idées, est subordonné au « faire ». L'introduction de principes d'ingénierie en biologie apparaît alors moins comme une méthode aux visées théoriques que comme une façon de prendre le vivant en main et de le maîtriser.

Un exemple de réduction de la complexité: la standardisation du vivant

Afin de mieux saisir comment et vers quelles visées s'effectue cette réduction de la complexité, nous examinerons maintenant, à titre d'exemple, l'un des principes ingénieurs les mieux établis et mis en œuvre en biologie synthétique : la standardisation de ses « matériaux », de ses techniques et de ses procédures. Cela nous permettra de mieux caractériser l'aspect ingénieur de la biologie de synthèse.

La standardisation est un prérequis de tout métier ingénieur, que l'on parle de génie mécanique, de génie électrique ou de génie informatique. Elle consiste à réduire la diversité (notamment celle des pièces) afin de normaliser un processus de construction. L'ingénieur n'a normalement pas à concevoir ni à fabriquer par lui-même ses pièces les plus standards, au même titre que le mécanicien n'a pas à fabriquer ses vis, ses écrous et ses boulons. Force est de constater, cependant, qu'en biologie deux pièces sont rarement équivalentes, pour des raisons que nous avons esquissées précédemment. C'est d'ailleurs, comme nous l'avons vu au chapitre 3, ce qui marquait pour Canguilhem la différence entre la machine et l'organisme : là où la machine est caractérisée par sa finalité rigide et sa prévisibilité, l'organisme est au contraire caractérisé par sa plasticité et son imprévisibilité.

⁵⁶ Cité par Maureen O'Malley (2009).

C'est pour ces raisons que les ingénieurs travaillant en biologie de synthèse ont parfois l'opinion qu'il faut éliminer cette plasticité et cette imprévisibilité en normalisant le vivant. Dans le cas de l'élaboration de réseaux d'ADN, ce processus de standardisation s'opère à plusieurs niveaux. D'abord au niveau des « pièces » biologiques constituant les circuits informationnels de l'ADN : ces matériaux de base incluent non seulement des séquences codantes, mais aussi notamment des enzymes, des promoteurs (séquence d'ADN sur laquelle se fixe l'ARN polymérase afin d'enclencher le processus de transcription) ou des terminateurs (séquence d'ADN marquant la fin du processus de transcription). Ensuite, la standardisation s'effectue aussi au niveau des dispositifs, puisque les systèmes de gènes ayant une fonction définie, comme le « *Toggle switch* » que nous avons présenté plus haut, sont, une fois modélisés, réutilisables par l'ensemble de la communauté scientifique. Ces pièces et ces dispositifs sont qualifiés de « bio-briques », non sans analogie aux blocs Lego, puisqu'ils sont les blocs de construction sur lesquels s'appuie couramment la biologie de synthèse. Ce processus de standardisation est effectué par des organisations telles que le *Registry of Standard Biological Parts* ou la *BioBricks foundation*, qui enregistrent et collectionnent ces séquences d'ADN pour l'usage de toute personne ou organisation ayant les qualifications requises pour s'en servir. À ce jour, le *Registry of Standard Biological Parts* possède par exemple plus de 20 000 « pièces » à la disposition des biologistes de synthèse⁵⁷. Les séquences d'ADN ainsi stockées sont notamment utilisées dans le cadre du concours iGEM (*International Genetically Engineered Machine*), une compétition prestigieuse regroupant des étudiants provenant de tous les continents, qui doivent fabriquer et tester des systèmes informationnels dans des cellules vivantes. Réciproquement, ce concours est également l'occasion pour les organisations de bio-briques d'enrichir leur banque de données (Bensaude-Vincent et Benoit-Browaeys, 2011).

Le processus de standardisation s'effectue également au niveau des pratiques et des procédures. Un exemple éloquent est celui du logiciel *Gene designer*, un outil à l'usage de biologistes amateurs ou professionnels disponible gratuitement sur internet⁵⁸. Ce logiciel dont l'interface est accessible et analogue à celles des logiciels utilisés en graphisme, permet de copier-coller, sélectionner ou modifier de manière variée des séquences de gènes afin de

⁵⁷ Voir http://parts.igem.org/Main_Page

⁵⁸ <https://www.dna20.com/resources/genedesigner>

concevoir rapidement et efficacement de nouveaux circuits fonctionnels. Une fois le circuit modélisé, il ne reste plus qu'à commander sur le web, via le logiciel, les bio-briques requises. Cette méthode est tout-à-fait analogue à celle utilisée en électronique : la plupart des disciplines ingénieurs ont en effet leurs propres logiciels visant à modéliser les circuits et à aider à la recherche de composants sur le net. Le logiciel *Digi-Key* est par exemple l'un des plus utilisés en électronique⁵⁹.

Enfin, on pourrait ajouter à cela le langage standardisé de la biologie de synthèse, par exemple le SBOL (*Synthetic Biological Open Language*)⁶⁰, encore une fois analogue à ce qui se fait en électronique. Au lieu de résistances, de transistor ou de condensateurs, on y retrouve formalisés sous forme graphique des promoteurs, des terminateurs ou encore des sites de restriction (voir Fig. 2). Ce langage s'inscrit dans une standardisation des procédures, permettant aux biologistes de synthèse de faciliter le *design* de réseaux génétiques.

 promoter	 primer binding site
 cds	restriction site
 ribosome entry site]] blunt restriction site
 terminator	 5' sticky restriction site
 operator	 3' sticky restriction site
 insulator	 5' overhang
 ribonuclease site	 3' overhang
 rna stability element	 assembly scar
 protease site	 signature
 protein stability element	 user defined
 origin of replication	

Figure 2: Synthetic Biological Open Language: <http://sbolstandard.org/visual/>

Toutes ces procédures de standardisation concourent ainsi à simplifier le travail de l'ingénieur en éliminant les aspects de la fabrication d'une nouvelle séquence de gènes qui ne sont pas liées à la conception rationnelle elle-même, telles que l'identification, le séquençage ou la synthèse d'ADN. Elles visent, en d'autres mots, à abstraire au maximum le

⁵⁹ <http://www.digikey.ca>

⁶⁰ <http://sbolstandard.org/>

processus technique de ses conditions matérielles. Également, de façon connexe, ces stratégies visent à rendre leur objet aussi stable, maîtrisable et prédictible qu'une machine. En faisant cela, l'idée est peut-être plus de transformer la biologie en un terrain propice pour l'ingénieur que de réellement allier les sciences du vivant à l'ingénierie. Aussi plusieurs biologistes de synthèses semblent-ils se considérer eux-mêmes davantage comme des ingénieurs que comme des biologistes.

Quelle vision de la technique pour la biologie de synthèse?

Les différents principes ingénieurs que nous avons évoqués visent au fond, comme nous l'avons vu, à faciliter la conception de machines biologiques. En réduisant au maximum la complexité du vivant, on espère ainsi rendre un nouveau domaine accessible au *design* d'objets à la fois techniques et organiques. Le terme « *design* », qui est souvent mobilisé sans questionnements pour promouvoir la spécificité de la biologie de synthèse, englobe ici au fond une foule de pratiques qui trouvent leur inspiration dans l'histoire récente de disciplines telles que l'informatique et l'électronique. La biologie de synthèse, en faisant usage récurrent de concepts tels que « circuits », « réseaux », « modules », ou « plateformes » emprunte son langage, mais aussi son esprit technique, à ces disciplines. Nous disons « esprit technique », puisque c'est surtout de l'idée générale d'un *design* qu'elle hérite, et non d'une pratique particulière. Or la notion de *design* suppose des techniques plus qu'elle n'est elle-même une technique, elle oriente de façon très générale le travail des ingénieurs. Par exemple, la standardisation globale des pièces électronique à partir des années 1970; l'arrivée de logiciels de modélisations et de simulations en ingénierie; ou encore l'usage de réseaux informatiques et de banques de données dans des domaines aussi divers que l'astronomie et la génomique, sont autant d'avancées techniques qui ont peu à peu facilité et normalisé l'adoption d'une telle approche. C'est ce caractère englobant du *design* qui permet selon le sociologue Adrian Mackenzie d'en parler comme d'une « méta-technique » (Mackenzie, 2010, p. 183) Comme nous l'avons vu dans le cas de la biologie de synthèse, travailler à faciliter le *design* implique une normalisation à plusieurs niveaux, qui passe par la standardisation des pièces, des outils utilisés et des procédures en général. Le concept de *design* n'est donc pas seulement un aspect technique de la biologie de synthèse; il oriente aussi l'évolution de son infrastructure et de ses méthodes. Plus encore, il normalise l'identité même de cette discipline puisqu'il permet, selon les discours de ses promoteurs, de la distinguer du génie génétique.

Or, référer à un *design*, c'est avant tout décrire une certaine conception de la relation entre la science et la technique. Le terme est très large et désigne un grand nombre d'idées connexes, comme en témoigne la multiplicité des traductions françaises. Pour ne citer que celles répertoriées par Daniel Becquemont dans un article sur l'histoire de ce concept (2010), on pourra retrouver des termes comme : « (...) conception, plan, intention, dessein, but, ordonnancement, architecture, dessin, agencement, (...) » (Becquemont, 2010, p. 81). Ce qui nous intéresse ici est que l'on peut faire ressortir de cet imposant champ lexical une vision de l'objet technique comme étant informé par la science et par la raison, celle-ci concevant intentionnellement un plan dont l'objet technique serait ensuite l'incarnation physique. Le terme « *design* » signifierait en ce sens « (...) à la fois le plan (la chose conçue), la réalisation de ce plan, et la chose réalisée » (*Ibid.*, p. 83). La notion de *design* implique donc sur le plan épistémologique une séparation nette, dans le processus technique, entre la raison (l'étape de la conception) et la matière (l'étape de fabrication), qui n'est pas sans évoquer un dualisme cartésien entre l'esprit et la matière.

Cette conception de la technique transparait clairement des discours de la biologie de synthèse. Une autre façon de la mettre en lumière est d'examiner comment la nature, et plus précisément l'évolution, y sont perçues et mises en rapport avec l'esprit humain. Il est fréquent, en effet, de trouver dans les écrits de scientifiques comme Drew Endy une opposition tranchée entre la rationalité de l'ingénieur et l'irrationalité de l'évolution. Les vivants actuels y sont souvent dépeints comme le résultat imparfait d'un enchaînement aveugle et irréflecti, auquel pourraient s'opposer les systèmes optimaux imaginés par l'être humain. Cette opposition, étudiée par le biologiste, philosophe et historien de sciences Michel Morange (Morange, 2013a) n'est pas sans s'appuyer sur la vision de l'évolution comme « bricolage », notion déjà évoquée par Darwin mais surtout popularisée par François Jacob dans les années 1970. L'évolution, comme le souligne Jacob, ne peut s'opérer qu'à partir de matériaux préexistants, ce qui la distingue nettement du *design* de l'ingénieur :

L'évolution ne tire pas ses nouveautés du néant. Elle travaille sur ce qui existe déjà, soit qu'elle transforme un système ancien pour lui donner une fonction nouvelle, soit qu'elle combine plusieurs systèmes pour en échafauder un plus complexe. Le processus de sélection naturelle ne ressemble à aucun aspect du comportement humain. Mais si l'on veut jouer avec une comparaison, il faut dire que la sélection naturelle opère à la manière non d'un ingénieur, mais d'un bricoleur; (...) (Jacob, 1981, p. 70).

L'évolution n'a donc aucun « *design* » préétabli, mais agence progressivement des matériaux préexistants. Même si Jacob n'entendait pas alors utiliser le terme « bricolage » dans un sens péjoratif, il demeure que lui et plusieurs autres biologistes ont reconnu certaines limites, dans le dernier quart du XX^e siècle, à l'action de la sélection. De façon notable, Stephen Jay Gould et Richard Lewontin ont mis la communauté scientifique en garde contre l'interprétation « panglossienne » du pouvoir de la sélection naturelle (Gould et Lewontin, 1979). Il est erroné, selon eux, de traiter systématiquement tout caractère comme étant une adaptation, puisque certains caractères peuvent n'être par exemple que des « contraintes architecturales » apparaissant avec le développement d'autres caractères. Il serait donc fallacieux de partir du principe que la fonction ou la structure devant nos yeux est la meilleure solution possible ou la plus optimale que nous pourrions imaginer.

Or, en mettant l'accent sur la métaphore du bricolage et sur ces limitations du pouvoir de la sélection, certains ingénieurs en viennent, en déformant un peu les propos de ces auteurs, à souligner l'imperfection, l'incomplétude et le caractère non-optimal des résultats de l'évolution. Appliquer l'ingénierie au vivant reviendrait alors, en suivant la métaphore jusqu'au bout, à insérer la rationalité dans un monde irrationnel ou, pour reprendre les mots de Drew Endy, à « se libérer de la tyrannie de l'évolution »⁶¹.

Ce discours de prise en charge rationnelle du vivant et de notre destin évolutif s'appuie par ailleurs sur la conception modulaire de l'organisme, qui comme nous l'avons vu est héritée en pratique de la biologie des systèmes et, sur le plan conceptuel, de l'électronique. Alors que les modules « naturels » bricolés par l'évolution sont imparfaits, ceux « artificiels » qu'introduiront les ingénieurs seront au contraire informés par la raison : « Parce qu'il est ingénieur et qu'il entend poursuivre un but, le spécialiste de biologie de synthèse peut combiner les « modules » en fonction d'un objectif précis...et donc faire mieux (et plus vite) que l'évolution et perfectionner la nature » (Larrère et Larrère, 2015, p. 199).

On voit ainsi comment le traitement du vivant comme une machine (dans ce cas-ci, une machine électronique) est, en biologie de synthèse comme dans le mécanisme critiqué par Canguilhem, le corolaire d'une conception réductrice de l'activité technique elle-même. Ce

⁶¹ Rapporté dans une entrevue au *New Yorker*, le 28 septembre 2009 (Specter, 2009, 28 septembre).

qui ressort de ces discours, c'est que les machines sont vues en biologie de synthèse comme étant l'application raisonnée d'un savoir ou, pour reprendre les mots de O'Malley, l'« instantiation de la connaissance » : « (...) *synthetic biology sets out from system design to gather and construct relevant components, and thereby create a biological machine that is regarded as the instantiation of knowledge* » (O'Malley, 2009, p. 380). Sur la base de la dichotomie évolution-ingénieur se trouvent formulées d'une part la puissance de la raison, qui est explicitement valorisée et mise en contraste avec le reste du monde non-humain; d'autre part la nécessité technique de considérer le vivant comme une machine, c'est-à-dire de le soumettre à la raison en lui conférant un caractère de prévisibilité et stabilité. La technique, de ce point de vue, n'est que le résultat collatéral de cette capacité que possède l'humain à penser et à maîtriser le monde naturel. C'est en évoquant la présence de la raison, la puissance de la science et l'imperfection de notre condition naturelle que l'on justifie l'approche mécaniste du vivant. L'intervention technique joue dans ce projet le rôle d'intermédiaire entre la pensée et le monde. En ce sens, il nous semble que la vision de la technique et de son rôle en général, telle qu'elle transparait dans les discours de la biologie de synthèse, soit bel et bien cartésienne.

Cependant, si l'ambition technique est cartésienne, il est important de souligner que la métaphysique en est assez éloignée. Il y a en effet une différence majeure avec le mécanisme classique qui ressort des discours que nous avons présentés : si les biologistes de synthèse soulignent constamment la nécessité d'introduire de nouvelles stratégies afin de traiter les vivants qu'ils modifient comme des machines, ils soulignent aussi constamment que cette nécessité est due à la difficulté de les traiter *a priori* de la même façon. C'est parce que les vivants se distinguent de nos machines par leur imprévisibilité, leur plasticité et surtout leur complexité, qu'il faut renoncer à les aborder en tant que tel de façon cartésienne. En traitant des propriétés émergentes, Drew Endy disait par exemple dans une entrevue de 2008 : « *I hate emergent properties. I like simplicity. I don't want the plane I take tomorrow to have some emergent property while it's flying* »⁶². Il ne s'agit donc pas de nier une certaine distance entre la vie et nos machines, mais de chercher à réduire cette distance en faisant ressembler les vivants aux machines qui nous sont familières. À ce titre, il semble que Descartes ait

⁶² Entrevue de 2008 accordée à the Edge Foundation (Brockman, 2008, 19 février)

d'ailleurs lui-même avoué les limites de son programme en soulignant, dans une lettre à Mersenne, l'impossibilité *pratique* de résoudre certains problèmes techniques liés au vivant. Bien entendu, la complexité du vivant n'a pas la même connotation pour Descartes que pour les biologistes de synthèse; elle se rapproche davantage de la perfection que du bricolage. Mais il demeure que les limites techniques que reconnaît Descartes sont à rapprocher du raisonnement que nous avons présenté. Le passage en question, cité par Canguilhem dans « Descartes et la technique », mérite ici d'être repris :

On peut bien faire une machine qui se soutienne en l'air comme un oiseau, *metaphysice loquendo*, car les oiseaux mêmes, du moins selon moi, sont de telles machines, mais non pas *physice ou moralier loquendo*, parce qu'il y faudrait des ressorts si subtils et ensemble si forts qu'ils ne sauraient être fabriqués par des hommes. (Canguilhem, 1937, p. 82)

Il semble bien que les biologistes de synthèse, de la même façon, reconnaissent des limites pratiques liées à la connaissance analytique du vivant. Cependant, armés de leurs principes ingénieurs, ils entendent surmonter ces limites en modifiant le vivant d'une manière que Descartes ne pouvait imaginer à une époque qui était bien entendu étrangère à la fois à nos concepts biologiques et à nos processus techniques. Pour prolonger la métaphore précédente, nous pourrions dire que le biologiste de synthèse, bien qu'admettant son incapacité à reproduire tous les ressorts impliqués dans le vol de l'oiseau, réalise qu'il ne lui est pas nécessaire de reproduire cette complexité pour construire une machine volante. Réduire la complexité c'est donc, d'une certaine manière, renoncer à une partie de l'expérience jugée inaccessible à un traitement technique; puis, par ruse, trouver le moyen de se détourner en partie de cette interdiction.

Cependant, la biologie de synthèse, au contraire de Descartes, ne dit rien *a priori* sur le statut ontologique des vivants. Il ne fait pas de doute, par exemple, que dans le passage précédant le vol des oiseaux demeure en principe (*metaphysice loquendo*) entièrement assimilable à un mécanisme. À l'inverse, la biologie de synthèse se limite à une position pragmatique, qui ne conserve du mécanisme que sa méthodologie et sa valeur heuristique. Au fond, les spécialistes de biologie de synthèse ne disent pas *nécessairement* que le vivant est une machine, mais ils s'entendent sur les stratégies qui permettront de le traiter comme tel. Il s'agit donc de ce que l'on pourrait nommer un « réductionnisme méthodologique »

visant à faciliter la construction de biotechnologies⁶³. C'est d'ailleurs sur cette base que Sune Holm, de l'Université de Copenhague, distingue la biologie de synthèse du mécanisme cartésien :

(...) synthetic biology is not mechanical biology and is best understood as an attempt at enhancing our ability to produce useful biotechnology in the face of the machine-unlikeness of natural living systems. While the vision of rationally designing living systems is consistent with the claim that organisms are machines, synthetic biologists do not in general assume an ontological reading of the organism-machine analogy. (Holm 2015, p.420-421)⁶⁴

Ce qui est emprunté au mécanisme cartésien en biologie de synthèse, c'est donc davantage un programme et une vision de la technique qu'une véritable ontologie du vivant⁶⁵. Comme plusieurs l'ont fait remarquer (Bensaude-Vincent et Benoit-Browaeys, 2011; Mackenzie, 2010; Deplazes-Zemp, 2010), ce programme est bel et bien promu, implicitement ou explicitement, par les ingénieurs-biologistes. En traitant le vivant comme une machine, on étend au vivant ce projet d'action rationnelle sur la nature. L'accessibilité grandissante d'un *design* d'objets biologiques, permise par la standardisation et la modélisation, vise à ouvrir à l'ingénieur des possibilités nouvelles pour construire et façonner le monde. De même, le traitement des entités biologiques comme des « plateformes », des « circuits », des « réseaux » ou des « châssis » suggère que celles-ci sont malléables et n'attendent qu'un esprit raisonné pour les modifier et les orienter vers des finalités humaines⁶⁶. Cependant, cette attitude est plus pragmatique que métaphysique. Tim Lewens,

⁶³ Nous nous rapportons à nouveau à la distinction établie par Ayala entre les différentes formes de réductionnisme biologique. Le réductionnisme méthodologique ne se prononce pas sur ce qu'*est* un vivant mais suppose que la méthode la plus efficace pour l'étudier passe par l'analyse de ses constituants inorganiques les plus simples (Ayala, 1987).

⁶⁴ C'est dans le même ordre d'idée que Maureen O'Malley écrit : « *This does not mean that there is no recognition of biological complexity by synthetic biologists – quite the opposite, in fact. But, in order to achieve the goal of construction designed and decomplexified systems, synthetic biologists believe that engineering of some sort is inevitable* » (O'Malley, 2011, p. 407). Notons que la position de Holm se veut une réponse à Nicholson (2013). Ce dernier voyait au contraire dans la biologie de synthèse une nouvelle instance de la philosophie mécaniste cartésienne et critiquait cette philosophie en mettant en lumière certaines différences fondamentales entre la machine et l'organisme.

⁶⁵ Il est permis de s'interroger sur l'éventuelle portée ontologique de ce réductionnisme méthodologique ou pragmatique. En effet, si une bactérie en venait à pouvoir être traitée « comme » une machine, il y aurait lieu de se demander ce qui nous empêche de l'assimiler véritablement à une machine. C'est en ce sens que Richard Jones, professeur à l'Université de Sheffield, écrit à propos du commentaire de Drew Endy : « (...) *since many suspect that life itself is an emergent property one could wonder how much of biology will be left after you've taken the emergence out* » (Jones, 2008).

⁶⁶ En ce sens, on peut dire que la biologie de synthèse s'inscrit dans le mouvement plus général des technologies émergentes, dont le programme de recherche NBIC, aux États-Unis, est un exemple paradigmatique. Misant sur la convergence entre nanotechnologies (N), biotechnologies (B), informatique (I) et sciences cognitives (C), les promoteurs de ce projet multidisciplinaire proclament haut et fort que les problèmes de l'humanité

de l'Université de Cambridge, souligne lui aussi cette particularité. Selon lui, les aspirations des biologistes de synthèse à rationaliser le monde correspondraient ainsi plutôt à un idéal vers lequel il faudrait tendre, et non à la proclamation de la toute-puissance de l'Homme à dominer la nature : « *[The synthetic biology methodology] is better understood as indicative of an underlying awareness of human limitations, rather than as expressive of an objectionable impulse to mastery over nature* » (Lewens, 2013, p. 641).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons concentré notre attention sur les discours de la biologie de synthèse, plus précisément sur ceux entourant le *design* et la construction de dispositifs ADN, et nous avons montré qu'ils traduisent une certaine vision du vivant et de la technique. En voulant concevoir de nouveaux circuits génétiques fonctionnels et utiles pour l'homme, la biologie de synthèse traite *de facto* le vivant comme une machine, c'est-à-dire comme un objet décomposable en parties standardisées, prévisibles et maîtrisables. Comme nous l'avons vu, pour s'étendre au monde vivant, ce programme doit cependant passer par un processus de réduction de la complexité, ce qui indique que les ingénieurs œuvrant en biologie de synthèse sont tout à fait conscients des difficultés de traiter ainsi le vivant sans l'introduction préalable de principes d'ingénierie. Ce qu'il y a donc de mécaniste en biologie de synthèse, c'est une vision de la technique comme instanciation de la raison et un projet d'action sur le monde, mais pas nécessairement une vision réductionniste du vivant. En ce sens, il est pertinent de voir dans ces discours que nous avons présentés une approche pragmatique visant à faciliter le *design* d'objets techniques, mais qui a très peu à dire sur une ontologie de la vie. Il importera, dans les chapitres à venir, d'aborder la biologie de synthèse au-delà de ses discours et de questionner les présupposés philosophiques qui lui sont sous-jacents.

concernant la santé, la sécurité et même la pauvreté sont à quelques décennies d'être éradiqués par l'évolution incessante des technologies. Ce que ces discours ont en commun avec la biologie de synthèse, c'est de considérer que le monde est plastique, malléable suivant un processus raisonné, et que l'esprit humain peut ainsi se libérer des contraintes que lui impose la nature. Comme nous l'avons vu, la biologie de synthèse partage à la fois ce programme et cette vision du monde. Pour une analyse de ces technologies émergentes, voir : Bensaude-vincent, 2004.

Chapitre 5 – Entre connaissance et savoir-faire

Canguilhem affirmait, dès le début du texte « Machine et organisme », que le problème philosophique auquel il s'intéressait alors lui semblait être inséparable du problème des rapports entre science et technique. À la suite des considérations précédentes, il nous apparaît en effet qu'un questionnement sur le vivant en biologie de synthèse ne saurait faire l'économie d'une réflexion sur le sens de l'activité technique. En voulant rapprocher le vivant de la machine afin de le rendre disposé à un traitement ingénieur, la biologie de synthèse mobilise ce faisant une vision cartésienne de la technique, c'est-à-dire une vision de la technique comme application raisonnée et finalisée d'un savoir. Or, il est loin d'être évident que les discours de la biologie de synthèse correspondent en tous points à ses pratiques concrètes. La figure de l'ingénieur ne peut pas aussi facilement être identifiée à celle de la raison, puis opposée à celle incarnée, matérielle et imparfaite de la nature.

Ce chapitre sera une critique de cette façon d'envisager l'action technique. Non seulement l'activité de l'ingénieur ne peut-elle être considérée hors du monde, mais le vivant ne saurait lui non plus se soumettre totalement à une technique visant à le diviser et à l'analyser. Cette remise en question sera pour nous l'occasion de montrer que la frontière entre le vivant et l'artificiel tend à s'estomper avec les objets techniques de la biologie de synthèse; non pas en raison d'une réduction du vivant à l'artificiel, mais en raison d'un rapprochement de ces objets vers le vivant lui-même.

C'est d'abord à la figure de l'ingénieur que nous nous intéresserons. Nous montrerons qu'une certaine distance sépare les discours et les pratiques de la biologie de synthèse, et qu'un certain aspect bricoleur relevant de l'expérience et de l'essai-erreur demeure irréductible au sein de ses processus techniques. Ensuite, nous questionnerons la position selon laquelle les résultats de l'évolution seraient forcément des systèmes inefficaces, ou du moins non optimaux, par rapport aux produits de l'ingéniosité humaine. Dans cette section, nous montrerons au contraire comment ces systèmes dans toute leur complexité sont couramment utilisés pour explorer des solutions techniques originales. Cette double remise en question des présupposés présents dans les discours de la biologie de synthèse nous conduira enfin à voir dans certaines techniques de la biologie de synthèse, ainsi que dans

certaines discours marginaux, un renoncement au modèle technique cartésien en faveur d'une technique plus « ouverte » au vivant et à ses potentialités.

Le bricolage de l'ingénieur

Au cours du chapitre précédent, nous avons présenté la vision de la technique telle qu'elle est véhiculée par la biologie de synthèse, dans ses ambitions, ses discours et ses projets. Or, plusieurs éléments nous permettent de suggérer qu'il y aurait un décalage entre ce premier niveau de discours et les processus concrets qui jusqu'à maintenant ont lieu dans les laboratoires de la biologie de synthèse⁶⁷. La conception visible, présentée parfois de façon officielle, suggère une version idéalisée de l'ingénieur qui au fond repose sur une certaine idée de la science comme activité « pure » et détachée du monde. L'ingénieur est celui qui mobilise l'intelligence humaine dans le cadre d'un *projet* d'intervention dans le monde. Il se rapproche plus du démiurge que de l'artisan, au sens il établit un plan, un *design*, avant de réaliser (ou de faire réaliser par d'autres) son objet technique. L'accent mis sur l'aspect intellectuel du processus technique peut alors nous empêcher d'envisager celle-ci du point de vue qui était celui de Canguilhem, c'est-à-dire comme étant en continuité biologique avec le vivant. Nous voudrions suggérer que la technique en biologie de synthèse se situe en fait quelque part entre cette version idéalisée de l'ingénieur et un savoir-faire technique relevant davantage de l'expérience ou du bricolage.

Ce n'est pas un fait inconnu que la nature se dérobe parfois aux volontés et aux prévisions des ingénieurs. Même dans les disciplines présentées comme des réussites rendues possibles par les progrès du savoir humain, une composante technique d'un tout autre ordre demeure à l'œuvre, au moins en partie. Il n'y a pas un seul domaine où l'on n'explore pas à tâtons, où l'on n'essaie pas en se trompant à plusieurs reprises avant d'acquérir une expérience pratique, c'est-à-dire un savoir-faire irréductible aux principes et aux lois des manuels d'enseignement. Par exemple, le clonage ayant donné naissance à la célèbre brebis Dolly, présenté comme une réussite de manipulation génétique, a tout de même nécessité des essais infructueux sur 277 cellules-œufs avant de donner naissance à un être vivant viable (Larrère et Larrère, 2015). Une grande part de cette réussite repose en effet sur des processus

⁶⁷ Pour une réflexion sur le décalage entre les discours et les pratiques scientifiques, voir le livre de Bruno Latour (Latour, 1989).

complexes qui ne dépendent pas directement du généticien, soit parce qu'ils sont encore mal compris ou soit parce qu'ils sont techniquement inaccessibles. Le microbiologiste qui désire s'adonner au clonage ou à la transgénèse doit donc se faire bricoleur et passer par un bon nombre d'échecs avant d'arriver à ses fins.

Un exemple récent, qui concerne l'outil de manipulation génétique CRISPR-Cas9, permet de montrer que même les travaux de laboratoire n'échappent pas à une dimension technique relevant davantage de l'expérience que du savoir théorique. CRISPR-Cas9 est un système de défense d'origine bactérienne au potentiel révolutionnaire pour le génie génétique, qui est souvent présenté comme une simple paire de ciseaux permettant de couper le génome à n'importe quel endroit désiré. Or, dans un article récent de la revue « Science », le journaliste Jon Cohen testait en laboratoire ses capacités à utiliser efficacement cette technique sans formation préalable, tout en étant accompagné d'un biologiste moléculaire d'expérience⁶⁸. Dès la première étape consistant à transférer un court segment d'ADN d'un tube à un autre, le journaliste échouait le processus de découpage du génome sans même s'en rendre compte. Cet échec était évidemment imputable au manque d'expérience du journaliste en matière de manipulations en laboratoire, expérience qui ne peut s'acquérir que par un tout autre chemin que celui de la connaissance théorique. Le biologiste qui accompagnait Cohen lui avait très bien expliqué les dessous théoriques des différentes étapes de cette expérience, et il ne pouvait d'ailleurs pas fournir d'explications plus précises à l'insuccès de Cohen que celle d'une inhabileté ou d'une maladresse dans la manipulation effectuée. Les expérimentateurs chevronnés savent ainsi qu'un long processus de tâtonnements et d'essais-erreur est nécessaire avant d'acquérir le savoir-faire leur permettant de mener à bien leurs expériences.

Dans un esprit semblable, Maureen O'Maley propose de voir dans la biologie de synthèse une part de ce que les informaticiens appellent du « *kludging* », qui pourrait être traduit par « bricolage », « bidouillage » ou, en bon québécois, « patentage ». Pour ce qui est du domaine informatique, cette expression désigne une façon d'opter pour une attitude très pragmatique en focalisant sur les résultats (par exemple, le bon fonctionnement d'un logiciel)

⁶⁸ Cohen, J. (2016, 3 novembre). « One of our reporters tried to do CRIPR. He failed miserably », *Science*, disponible en ligne sur : <http://www.sciencemag.org/news>

même si cela est fait aux dépens de l'élégance ou même de la rationalité des moyens employés. De fait, la plupart des programmes informatiques nécessitent après leur conception un certain nombre de correctifs (couramment appelés « *patch* ») visant à surmonter les erreurs et les irrégularités. Pour ce faire, le « *kludging* » est un moyen efficace et couramment utilisé, qui s'avère bien souvent corriger les défauts d'un logiciel sans même que l'on comprenne nécessairement pourquoi cela a fonctionné. En laissant une liberté d'action aux programmeurs ou aux bricoleurs de tout genre sur les moyens utilisés pour parvenir à leurs fins, non seulement peut-on arriver à une solution satisfaisante face à un problème complexe, mais on peut aussi potentiellement y arriver plus rapidement.

De la même façon, les dispositifs conçus par les biologistes de synthèse ont souvent besoin de « *kludging* ». Par exemple, l'un des exploits techniques de la biologie de synthèse – souvent considéré comme son plus grand succès – est la modification par l'équipe de Jay Keasling en 2006 d'une souche de levure, afin que celle-ci synthétise un composé précurseur de l'artémisinine (Ro et al., 2006; Keasling, 2008). L'intérêt de cette réussite est que l'artémisinine est une molécule efficace dans le traitement du paludisme, et c'est pourquoi d'ailleurs l'équipe de Keasling bénéficia d'une bourse de 42 millions de dollars de la fondation Bill & Melinda Gates pour réaliser cette synthèse (Sanders, 2004). Or, pour arriver à modifier le métabolisme cellulaire de la levure afin qu'elle effectue les réactions désirées, il ne suffisait pas d'y insérer les bons gènes et d'attendre de voir le résultat : les chercheurs ont dû effectuer un bon nombre de modifications *ad hoc* visant à réguler ces réactions, le plus souvent d'une façon exploratoire et en étant bien loin de saisir tous les rouages menant à la synthèse désirée (O'Malley, 2009). Reste que les travaux de Keasling n'en demeurent pas moins une réussite : les composés précurseurs de l'artémisinine ont bel et bien été synthétisés par les levures, ouvrant la porte à la possibilité d'une production de masse de ce traitement contre le paludisme. Les techniques utilisées, bien que relevant du « *kludging* », n'en demeurent pas moins d'une efficacité admirable. Plus encore, elles sont à envisager comme étant à la source de solutions innovantes, et O'Malley n'hésite pas d'ailleurs à en parler comme d'un « art » : « *Kludging should not be interpreted as a failure of synthetic biology, but as a highly creative and effective process* » (O'Malley, 2009).

Dans un autre article (2011), O'Malley ajoute aux côtés du « *kludging* » les techniques d'« exploration » et d'« itérativité » que l'on retrouve en biologie de synthèse. L'exploration est à une stratégie consistant à ne pas attendre d'avoir un objectif prédéterminé avant d'entreprendre l'investigation d'objets biologiques. Loin de se limiter à la biologie de synthèse, cette stratégie caractérise également d'un bon nombre de développements scientifiques qui ont suivi certaines inventions techniques, comme le microscope ou la machine à vapeur. Canguilhem, comme nous l'avons vu, n'avait pas manqué de souligner cette dimension exploratrice de la technique. Pour ce qui est de la biologie de synthèse, on retrouvera un exemple de cette stratégie dans les tentatives de description du « bruit » biologique (Guru et Chatterjee, 2013). L'étude des interactions aléatoires entre les molécules d'une cellule, généralement conçues comme échappant à la prédiction scientifique, a en effet mené à force de tâtonnements à de nouveaux outils technologiques permettant contre toute attente de mieux comprendre comment ces bruits affectent divers phénomènes biologiques (O'Malley, 2011, p. 407). L'itérativité, quant à elle, désigne la stratégie consistant à partir de points de départ incomplets ou imparfaits qui, mis ensembles, mèneront à une connaissance plus complète de l'objet étudié. En partant d'un modèle peu efficace ou mal compris, il est ainsi possible, en combinant ce modèle à d'autres stratégies, d'obtenir des solutions techniques efficaces : « *Synthetic biology beautifully embodies the pragmatic nature of iterative scientific practice. Through iteration of exploratory, experimental, constructive and interpretive activities, synthetic biology's practitioners can generate useful knowledge, however imperfect their starting points* » (*Ibid.*, p. 409).

Ces différentes stratégies diffèrent de façon importante du schéma méthodologique traditionnel reliant de façon linéaire observation – hypothèse – expérimentation. Cependant, pour qu'il y ait une quelconque valeur scientifique aux différentes techniques exploratoires de la biologie de synthèse, il est important qu'il y ait une suite théorique à ces différents tâtonnements. Comme le souligne le biologiste Steven A. Benner: « *Nothing of value comes unless the tinkering is followed by studies of what happened* » (Benner et al., 2011, p. 374). Prenant en exemple ses propres tentatives de synthétiser un système capable d'évolution darwinienne, Benner montre en détails comment des stratégies exploratoires suivies de remaniement théoriques se sont avérées pertinentes pour faire avancer son projet. Sans cette

dimension théorique, la biologie de synthèse risquerait justement de se limiter à n'être que du « bricolage » sans conséquence.

En traitant ainsi de l'aspect exploratoire de la biologie de synthèse, il est possible d'envisager sous un nouvel angle la phrase de Feynman : « *What I cannot create, I do not understand* » (O'Malley, 2011). Plutôt que de voir dans le processus reconstruction technique la preuve de sa compréhension analytique exhaustive, il est possible d'envisager ce processus comme étant lui-même une forme originale de « savoir-faire ». Plusieurs affirmations antérieures de Feynman suggèrent d'ailleurs que c'est en ce sens qu'il faudrait interpréter cette célèbre phrase. Au lieu d'y voir une nouvelle annonce de la maîtrise du monde par la puissance de la raison, il peut être utile d'y voir au contraire la prise en compte des limites d'une connaissance analytique dans l'activité technique en général.

Outre cet irréductible « savoir-faire », une autre caractéristique notable (qui comme nous le verrons, lui est liée) tend à modifier l'image idéalisée de l'ingénieur présentée par la biologie de synthèse. Le contraste avec l'évolution est en effet souvent justifié par le fait que cette dernière procède à partir de matériaux et de structures préexistants, et est donc restreinte par les possibilités que l'histoire évolutive a mises à sa disposition. L'ingénieur, au contraire, pourrait à volonté revenir au « *blackboard* », choisir ses matériaux et revoir son plan de conception. Or, il n'est pas vrai que le processus de construction technique est à ce point exempté des contingences de l'histoire. L'ingénieur, forcément, ne réinvente pas la roue à chaque invention, et s'appuie au moins en partie sur des modèles techniques préexistants. On peut vouloir repenser les caractéristiques d'une voiture et améliorer sa performance, mais on ne va pas élaborer de nouveau chaque pièce, réinventer les progrès passés en matière d'aérodynamique ou de suspension, puis remettre en question le choix de tous les matériaux qui sont généralement utilisés dans l'industrie automobile. Un design aussi « optimal » et « rationnel » que nous voudrions risque malheureusement de n'avoir que peu de succès s'il n'est pas adapté au milieu dans lequel il sera commercialisé, ne fût-ce qu'en raison des habitudes et des dispositions de ses destinataires.

Autrement dit, l'ingénieur fait lui aussi face à des contingences historiques. Il y aurait sans doute ici un parallèle à faire avec la notion de « milieu technique » d'André Leroi-Gourhan, que nous avons évoqué au chapitre 3. Celui-ci dénonçait lui aussi l'idée d'une

invention « pure » en soulignant l'importance de contextualiser l'innovation technique. Or, ce contexte dont parle Leroi-Gourhan est dépendant d'une histoire technique qui a à voir avec des problèmes concrets, auxquels des humains ont répondu non seulement par leur ingéniosité, mais aussi par leurs erreurs, leurs tâtonnements et leur savoir-faire – comme dans l'exemple du « *kludging* » en biologie de synthèse. « On n'a jamais rencontré un outil créé de toutes pièces pour un usage à trouver sur des matières à découvrir » écrivait Canguilhem en citant Leroi-Gourhan dans « Machine et organisme » (Canguilhem, 2003, p.13). Cela est vrai non seulement pour les disciplines qui, comme l'astronomie ou la géométrie, trouvent leurs racines dans les pratiques concrètes liées à l'orientation ou à l'irrigation, mais aussi pour les technologies émergentes, qui s'appuient sur une multiplicité de techniques qui sont autant d'histoires et de contingences. La biologie de synthèse, avec ses emprunts à l'informatique, à l'électronique, à la biochimie et aux différentes techniques de génie génétique, n'y fait pas exception.

Au fond, même une technique aussi sophistiquée que la biologie de synthèse, présentée comme l'irruption de la rationalité dans le monde vivant, doit faire face à des problèmes concrets, explorer à tâtons une foule de possibilités, et acquérir une forme d'expérience pratique. La distinction claire entre le savoir de l'ingénieur et le savoir-faire de l'artisan est plus brouillée que ce que l'on voudrait croire. Cela ne signifie pas que la connaissance rationnelle, scientifique, n'informe pas la technique d'une façon peut-être plus manifeste en ingénierie qu'en d'autres domaines. Mais il est certain que les discours de la biologie de synthèse ont trop souvent tendance à dénigrer la dimension « savoir-faire », conçue comme une simple application ou comme une formalité de construction, alors qu'elle a quelque chose de constitutif dans le processus technique.

L'origine de cette dimension qui tend à mettre en valeur l'authenticité de l'activité technique est, comme nous l'avons vu avec Canguilhem, à chercher dans le biologique et non dans la science elle-même. Entre le tour de main de l'artisan et celui de l'expérimentateur en laboratoires, il n'y a pas de rupture; il y a une continuité biologique ponctuée d'avancées scientifiques. Rappelons que, de façon analogue, Canguilhem envisageait la médecine comme une technique ou un art « au carrefour de plusieurs sciences » (Canguilhem, 2013, p. 8). Bien qu'étant informée par la raison et par les succès incomparables de la médecine

scientifique, l'activité médicale procédait néanmoins, logiquement et chronologiquement, d'un besoin proprement vital. De la même façon, peut-être serait-il plus approprié de situer la biologie de synthèse quelque part entre cet idéal de l'ingénieur qu'elle véhicule dans ses discours, et une technique qui est au fond en continuité avec les tâtonnements du vivant humain s'attachant à régler les problèmes d'ordre vital que le monde dresse devant lui.

La nature contre l'ingénieur?

Comme nous avons pu le constater avec le « *kludging* », une technique dont tous les paramètres ne sont pas connus et maîtrisés n'est pas forcément synonyme d'inefficacité. Ainsi, l'ingénieur n'est pas aussi éloigné du bricoleur que l'on voudrait bien le croire, et c'est pourquoi la valorisation non questionnée des dispositifs de la biologie de synthèse par rapport aux œuvres de la nature doit être remise en question. Inversement, nous verrons maintenant que les résultats du bricolage de la sélection naturelle ne sont pas non plus aussi « sous-optimaux » que le suggèrent certains discours. Cette réhabilitation du processus de l'évolution aura, comme nous le verrons, une incidence sur les modèles techniques envisageables pour la biologie de synthèse.

Nous avons montré, au dernier chapitre, comment la notion de bricolage a déjà été utilisée en tant que métaphore pour illustrer l'évolution darwinienne. Ce que les auteurs ayant mobilisé cette image avaient en tête, à commencer par Darwin lui-même, c'est avant tout l'importance de considérer l'aspect historique de la constitution du vivant afin de comprendre son état actuel (Morange, 2013a). Les systèmes biologiques auxquels nous avons affaire sont le résultat de contingences : ils auraient pu connaître une histoire totalement différente. En cela, le mécanisme de la sélection naturelle n'est pas complètement différent de notre exemple précédant concernant la conception d'une voiture, au sens où ces deux processus ne peuvent partir de zéro et sont dépendants d'une série d'évènements passés. Ainsi, il n'y a pas de plan prédéfini à la transformation des espèces, et c'est pourquoi on ne peut comprendre convenablement telle fonction ou telle structure sans faire appel à leur histoire respective. Les critiques faites à la thèse adaptationniste (par exemple, celle de Gould et Lewontin, 1979) vont en ce sens, et dénoncent les tendances à postuler qu'un trait est une adaptation sans prendre la peine d'introduire une dimension historique pouvant inclure éventuellement une part de hasard. C'est d'ailleurs pour cette raison que la méthodologie de la biologie des

systèmes, qui consiste à caractériser le « *design* » de réseaux cellulaires sans nécessairement prendre en compte leur histoire évolutive, pourrait éventuellement s'avérer problématique (Braillard, 2009).

Comme le souligne Michel Morange dans plusieurs articles sur le sujet, ce bricolage n'est cependant pas synonyme d'inefficacité⁶⁹. Notamment, la « sur »complexité qu'implique le bricolage évolutif, qui souvent est opposée à la simplicité et à l'élégance des modèles de l'ingénieur, peut résulter en une robustesse accrue des systèmes biologiques. La dynamique complexe menant du génotype au phénotype peut par exemple permettre à un organisme d'être insensible à certains changements (par exemple une mutation) qui dans d'autres cas pourraient être délétères. Or, ces chemins extrêmement complexes auraient été difficilement imaginables si l'évolution ne procédait pas d'une façon analogue à un « bricoleur ». C'est ce qui conduit Morange à souligner le côté positif de la métaphore du bricolage :

It is interesting to notice that the notion of tinkering does not exclude this creative side: a tinkerer is often more creative than an engineer. He or she finds original, unorthodox ways to circumvent a difficulty that an engineer would not have imagined, or would have rejected a priori. But this positive side of tinkering was dismissed in favor of its negative one. (Morange 2013a)

Cela ne revient pas à faire de l'évolution un processus parfait et finalisé, mais simplement à reconnaître que les vivants actuels sont le résultat d'une histoire sélective complexe leur ayant conféré, forcément, une certaine robustesse. Après tout, il faut dire que l'efficacité impliquée par la sélection naturelle est implicitement reconnue à travers les techniques utilisées dans l'industrie chimique (par exemple, avec l'utilisation d'enzymes), ou encore en génie génétique. La plupart des techniques du génie génétique consistent en effet à instrumentaliser certaines propriétés du vivant lui-même, notamment les enzymes de restrictions que l'on a d'abord trouvées chez certaines bactéries. Plus récemment, la technique impliquant CRISPR-Cas9, évoquée plus haut, consiste elle aussi à utiliser une enzyme d'origine bactérienne. Chez la bactérie *S. Pyogenes*, il s'agit à l'origine d'un mécanisme de défense visant à identifier et détruire une séquence d'ADN étranger, par exemple celui d'un virus. Une fois instrumentalisée en laboratoire puis brevetée, on obtient

⁶⁹ Morange (2012), (2013a). Voir également l'entrée « bricolage » dans le *dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences* de Dominique Lecourt (1999).

alors une technique de manipulation génétique au potentiel jusqu'alors inégalé. Toutes ces techniques – et bien d'autres encore – trouvent au fond dans le vivant un mécanisme d'une efficacité redoutable qu'il s'agit de réutiliser à des fins humaines. Ici encore, les résultats de l'évolution s'avèrent loin d'être sous-optimaux.

D'où la légitimité et la pertinence de ce qu'on appelle le « biomimétisme ». Au-delà de son instrumentalisation directe, le monde vivant peut servir d'inspiration aux ingénieurs de tous genres. On retrouve souvent par exemple l'anecdote selon laquelle le vol des oiseaux aurait inspiré les premiers engins volants des frères Wright⁷⁰. Plus près de nous et de façon plus explicite, la capacité adhérente des pattes du Gecko est devenue l'un des exemples privilégiés pour vulgariser les nanotechnologies émergentes, et sert effectivement d'inspiration pour certaines inventions d'échelle nanométrique⁷¹. Encore plus récemment, des chercheurs de l'Université d'Harvard ont conçu le premier robot entièrement « mou », c'est-à-dire fabriqué en matériaux souples, qu'ils ont baptisé « octobot ». Ce robot à l'apparence d'une pieuvre partage certaines caractéristiques avec la matière organique, notamment une relative plasticité de structure que les robots « rigides » traditionnels ne pourraient atteindre (Wehner, M. et al., 2016). Le domaine de l'intelligence artificielle s'inspire, lui également, du processus de sélection naturelle pour concevoir des robots ayant une capacité « évolutive ». À l'aide d'algorithmes inspirés de l'évolution, on introduit une variabilité laissée au hasard, combinée à mécanisme de sélection des robots dont la variabilité a par exemple conduit à mieux accomplir une tâche donnée. Cette méthode permet d'explorer un large éventail de solutions auxquelles l'ingénieur n'aurait pas forcément pensé *a priori* (Bredèche, 2009). Elle permet, en un mot, d'introduire une certaine *plasticité* à nos machines. Dans tous ces exemples, on est en présence d'une créativité des moyens permise par une technique plus souple et directement inspirée du vivant.

À la lumière de nos derniers exemples, on voit qu'il est fallacieux d'opposer, sans nuances, l'ingénieur et la nature. D'un côté, le métier d'ingénieur implique parfois un savoir-faire irréductible au seul savoir théorique, et ce savoir-faire n'est pas pour autant le signe

⁷⁰ Par exemple, la couverture du livre grand public sur le biomimétisme, *Quand la nature inspire la science*, présente une superposition d'un oiseau et d'un modèle d'avion. (Fournier, 2016)

⁷¹ Voir par exemple le « Geckskin™ » développé en 2012 à l'Université de Massachusetts à Amherst: <https://geckskin.umass.edu/>

d'un échec technique. Inversement, certains mécanismes résultants de l'évolution, même incompris, peuvent légitimement et efficacement être instrumentalisés à des fins humaines. Par ce double rapprochement, on constate que le « faire » peut ainsi parfois très bien et de façon assumée se passer d'une part du « connaître » qui le guide à l'occasion.

La biologie de synthèse au-delà des machines

La biologie de synthèse, par ses pratiques, peut très bien s'inscrire dans cette dernière ligne de pensée. Thomas Heams, biologiste moléculaire à AgroParis Tech, est d'avis que l'évolution, loin de devoir être considérée comme un obstacle à surmonter, pourrait être elle-même instrumentalisée et dirigée en biologie de synthèse (Heams, 2009). En fait, persister à traiter leurs objets d'étude comme des machines au sens classique du terme, sans prendre en compte leur paramètre évolutif ou en voulant l'écarter, pourrait même au contraire conduire les biologistes de synthèse à des limites ou à des impasses. L'évolution permet au vivant, comme nous l'avons vu, d'explorer des possibilités nouvelles et inédites. Pourquoi alors, au lieu de chercher à se débarrasser des aléas de l'évolution, ne pourrait-on pas chercher à les orienter? Ce genre de méthode, comme le souligne Heams, a déjà été utilisé de façon fructueuse dans la conception de médicaments. La biologie de synthèse pourrait, elle aussi, être appelée à concevoir ses techniques avec plus de modestie, en abandonnant une part de son désir de maîtriser tous les paramètres au profit de solutions nouvelles et originales rendues possibles par les contingences de l'évolution⁷².

Le même raisonnement peut d'ailleurs être utilisé pour traiter de la complexité du vivant en général. Il s'avère de plus en plus nécessaire, par exemple, de prendre en compte le contexte cellulaire lorsque l'on veut intégrer de nouveaux gènes à un organisme (Güttinger, 2013). Les cellules ne sont pas toutes identiques, et possèdent un certain nombre d'aléas en raison, par exemple, de la position et du nombre de protéines qu'elles contiennent. Ces paramètres complexes viennent ajouter une certaine imprévisibilité aux projets de la biologie de synthèse. Cependant, cela ne veut pas dire que l'on ne peut pas s'accommoder ou même profiter de cette imprévisibilité, ne serait-ce qu'en optant pour des techniques se rapprochant davantage d'un « *kludging* ». De fait, il est de plus en plus admis que même les composantes standardisées fournies aux biologistes de synthèse ont généralement besoin de ce genre

⁷² Pour l'utilisation d'évolution dirigée en biologie de synthèse, voir: Dougherty et Arnold, (2009).

d'intervention lorsqu'elles doivent être assemblées dans un système complexe. Roberta Kwok, dans un article publié dans « Nature » en 2010, énonçait 5 « dures vérités » auxquelles devait maintenant faire face la biologie de synthèse. Malgré les nombreuses promesses énoncées depuis le début des années 2000, il s'avère que les composantes supposées être standardisées restent en grande partie très mal caractérisées. De plus, même dans les cas où les composantes sont très bien connues, leur intégration dans un système plus large résulte souvent en des conséquences imprévisibles (Kwok, 2010). Dans un article plus récent, Manuel Porcar, chercheur à l'Université de Valencia, soutient dans le même sens que la fameuse standardisation promise par la biologie de synthèse se révèle aujourd'hui insuffisante, mais que cette insuffisance n'est pas forcément à voir comme un échec (Porcar, 2016). Après plus de quinze ans de standardisation, il s'avère en effet toujours impossible de concevoir sur papier un réseau métabolique qui serait prédictible. Pourtant, cela n'empêche pas les ingénieurs d'en construire avec succès. Aussi Porcar soutient-il une attitude pragmatique qui renoncerait en partie à l'attitude rationaliste défendue par les fondateurs de la biologie de synthèse :

I strongly believe that SynBio will remain synthetic and biological even if it renounces its obsession with strict standardization and moves into mixed rational-evolutionary design approaches. It is the purpose that matters most, not the techniques. The future of SynBio is bright; there is no need to hype its present form. So, let us eradicate prejudices and take advantage of evolution to build, as best we can, the improved life forms that humanity needs in these difficult times. (Porcar, 2016, p. 108)⁷³

Dans le même ordre d'idées, mais à un tout autre niveau, le contexte environnemental devient lui également de plus en plus pris en compte par les biologistes de synthèse. Certaines bactéries fabriquées et modifiées, par exemple celles qui pourraient détecter ou lutter contre la pollution, seront éventuellement appelées à interagir non seulement entre elles, mais aussi avec un environnement différent de celui du laboratoire. Cette composante environnementale est maintenant reconnue et intégrée aux recherches de biologie de synthèse, ce qui indique selon Thomas Heams un certain renoncement à ses ambitions premières de maîtrise du vivant: « Que des dynamiques écologiques et évolutives,

⁷³ Luis Serrano, dans un article de 2007 de *Molecular System Biology*, abonde dans le même sens: « *What is important and very much encouraging is that even without fully understanding how a living cell operates, we can still redesign it in a meaningful way. In a similar way that we can now design proteins with new functions, even if we do not yet fully understand how it folds and how it performs its function, it is possible to introduce new functions or modify existing ones in cells without a complete understanding of the system and without having a complete list of standardized components.* » (Serrano, 2007, p. 2)

et leur modélisation, soient convoquées dans cet univers d'ingénieurs rêvant de précision est un signe que l'on ne peut aussi aisément que prévu faire fonctionner le vivant avec des lois qui ne sont pas les siennes » (Heams, 2009, p. 428).

Autrement dit, certains éléments semblent indiquer que la biologie de synthèse pourrait s'orienter vers la reconnaissance d'une complexité qui, plutôt que d'être maîtrisée, éliminée ou même surmontée, pourrait être utilisée d'une façon originale. Cette attitude pragmatique et décomplexée, quoique marginale, a été effectivement défendue dans les dernières années par certains bio-ingénieurs qui en viennent à parler d'une « seconde vague » de biologie de synthèse (Purnick et Weiss, 2009). Il est de plus en plus reconnu que les principes de conception élaborés par les pionniers de la biologie de synthèse s'avèrent insuffisants pour construire des dispositifs complexes : « *It is possible that existing engineering design principles are too simplistic to efficiently create complex biological systems and have so far limited our ability to exploit the full potential of this field* » (Porcar et Weiss, 2009, p. 412). Devant ces difficultés, des approches différentes et moins restrictives sont adoptées par cette seconde vague de biologie de synthèse. Il apparaîtrait très peu légitime, par exemple, de se passer des outils que peuvent fournir l'évolution au nom d'un principe selon lequel les techniques de l'ingénieur se devraient d'être rigoureusement prédictibles. À l'inverse de Descartes, qui considérait le savoir-faire des artisans comme inférieur à sa propre méthode en raison de l'absence d'un savoir théorique sous-jacent, certains ingénieurs semblent inverser ce système de valeur, assumant pleinement le potentiel technique lié à l'instrumentalisation des formes vivantes sans chercher à les diviser intégralement.^{74 75}

⁷⁴ A. Moya, N. Krasnogor, J. Pereto et A. Latorre, dans un article intitulé « *Goethe's dream* », proposent eux aussi de voir dans l'évolution récente de la biologie de synthèse une tentative de comprendre des systèmes complexes qui ne passe pas par l'analyse, mais par une prise en compte plus large et plus générale du contexte de ces systèmes. Les plus récentes avancées en bio-informatique permettent par exemple de simuler le comportement cellulaire ainsi que les conséquences d'éventuelles interventions dans la cellule. Cette méthodologie, contrairement à la première, ne rejette pas l'idée de propriétés émergentes. Par ces avancées, la biologie de synthèse en arriverait à une sorte de dualité entre une vision « réductionniste » et une vision « intégrative » du vivant (Moya et al., 2009). Pour une perspective semblable en ce qui a trait à la biologie des systèmes complexes, voir également l'article de Powell et Dupré (2009).

⁷⁵ Notons que le concept d'évolution pourrait aussi être mobilisé en un second sens, davantage métaphorique, pour illustrer la diversité des moyens utilisés par les biologistes de synthèse. Le pluralisme méthodologique de la biologie de synthèse pourrait être ainsi interprété comme une tentative de produire une variabilité de moyens en vue de « sélectionner » les biotechnologies les plus efficaces.

Plasticité et biologie de synthèse

Par ce double rapprochement, il semble difficile d'interpréter la biologie de synthèse selon le modèle technique cartésien, qui opposerait de façon dualiste le génie humain d'un côté et la nature instrumentalisée de l'autre. Dans cette section, nous voudrions montrer que la position de Canguilhem, qui posait justement des limites à ce modèle technique dans « Machine et organisme », trouve un appui important et particulièrement explicite dans la biologie de synthèse. En effet, le finalisme de l'action technique tend par ce double rapprochement à se discerner plus difficilement du finalisme de l'artifice. Avec la biologie de synthèse, la technique elle-même est en quelque sorte vivante; les « mécanismes » du vivant, avec leurs caractéristiques et leurs fonctions particulières, sont eux même instrumentalisés dans le cadre d'une activité technique. L'affirmation de Canguilhem selon laquelle « Un outil, une machine ce sont des organes, et des organes sont des outils ou des machines » (Canguilhem, 2003, p.148) prend ici toute sa signification.

Il est pertinent de mettre en lien cet effacement des frontières entre le vivant et l'artifice avec le continuum que posait Canguilhem entre la machine et l'organisme. Canguilhem, rappelons-le, ne posait pas de différence ontologique entre la machine et l'organisme, au sens où il ne posait pas deux ordres d'entités répondant à des lois différentes. Mais il ne cherchait pas pour autant à affirmer le pouvoir explicatif absolu de la physico-chimie; il visait au contraire à inscrire le mécanisme dans la vie, à montrer que les machines sont elles-mêmes le témoin de la normativité du vivant. Par cette explication, Canguilhem donnait un sens nouveau aux analogies entre le vivant et la machines, car ces analogies ne consistaient plus alors à réduire l'un à l'autre, comme dans l'explication mécaniste, mais à montrer qu'il existe une continuité reliant le finalisme biologique à la finalité de l'objet technique.

Ce qui caractérisait les pôles de cette continuité, c'était la rigidité du finalisme dans la machine et sa plasticité, sa malléabilité dans l'organisme. Or, les nouvelles technologies que nous avons abordé, et à plus forte raison la biologie de synthèse, tournent en quelque sorte leur regard vers la plasticité. Cette plasticité se révèle prometteuse tant sur le plan de la conception technique (avec les techniques de *kludging*) que sur le plan du fonctionnement des objets techniques (avec par exemple les bactéries instrumentalisées à des fins humaines).

Il est possible d'interpréter certaines des dernières avancées comme étant un renoncement partiel à la rigidité impliquée par le programme technique qu'envisageait Descartes. Certains ingénieurs, assumant les limites du rêve de maîtrise et de connaissance cartésien, se tournent vers les potentialités technique plus plastiques – mais moins réductibles à l'analyse – du vivant

Le corolaire de ce renoncement est qu'il devient en quelque sorte explicite que l'organisme est véritablement premier dans l'activité technique de la biologie de synthèse. Si les biologistes de synthèse élaboraient les fonctions de leurs bactéries de façon purement analytique, à la façon d'un ingénieur en électronique, on pourrait considérer que la vie serait désormais bel et bien réduite à ses composantes. Or, ceux-ci optent pour un regard plus large, un regard « synthétique », qui tient compte des caractéristiques particulières que nous attribuons à la vie. Pour atteindre une certaine plasticité dans la conception d'un objet technique, il faut que cet objet présente une certaine indépendance par rapport à son concepteur. La reconnaissance de cette indépendance, du moins en ce qui a trait à la biologie de synthèse, est aussi la reconnaissance d'une normativité propre à cet objet technique. Il est vrai que le concept de « vie » lui-même demeure très ambigu dans l'esprit de la plupart des biologistes, qui préfèrent parler de caractéristiques spécifiques au vivant telles que la capacité à évoluer ou la présence d'un métabolisme (Steizinger, 2016). Mais il n'en demeure pas moins que l'activité technique des biologistes de synthèse consiste à faire accomplir par des vivants des tâches diverses à partir de mécanismes qui sont déjà présents et souvent incompris. Dans une approche technique qui serait analytique, les fonctions seraient à penser et à inventer, mais dans une technique instrumentalisant le vivant, les fonctions sont déjà présentes; elles sont à manipuler, à modifier ou à orienter. Le but visé par notre technique doit alors faire avec les mécanismes déjà finalisées du vivant. Rappelons que Canguilhem évoquait déjà la possibilité de ce rapprochement entre technique et vie, en citant les ingénieurs du MIT qui, avec la bionique, se mettaient « à l'école de la vie » (Canguilhem, 2003, p.163). La biologie de synthèse est tout à fait en continuité avec l'esprit technique de ces disciplines, et c'est dans cet ordre d'idées qu'il nous semble pertinent de l'envisager comme une démonstration concrète des idées de Canguilhem. C'est d'ailleurs, il nous semble, ce que suggère brièvement Michel Morange: « *In synthetic biology, the power to generate mechanistic devices is a property of organisms. And the work of synthetic biologists*

is only to use and extend this capacity of organisms; a vision which is not very different from the conception of the relations between organisms and machines elaborated by Georges Canguilhem » (Morange 2009, p.29).

C'est dans un sens similaire que le philosophe Axel Gelfert propose de voir dans les objets de la biologie de synthèse des incarnations (« *embodiment* ») de connaissance biologique qui demeurent partiellement autonomes; de façon analogue aux « oncosouris », ces souris génétiquement modifiées afin de développer plus facilement des cancers. De la même façon, les bactéries modifiées issues de la biologie de synthèse possèdent une relative indépendance par rapport à leurs « constructeurs », ne serait-ce qu'en raison de leur éventuelle capacité à évoluer et à se reproduire. Elles sont à la fois des objets techniques et des êtres vivants qui échappent en partie à notre contrôle:

Whereas in both cases the reliable performance of its function is key to an artifact's so being credited, synthetic biological artifacts retain an additional degree of autonomy in virtue of their 'inherited' properties of evolvability and self-reproduction which, as noted earlier, are not—or at least not yet—easily exhausted by a list of technical specifications. (Gelfert, 2013, p. 149)

Ainsi, le fait que nos machines tendent aujourd'hui à être difficilement discernables de la vie ne montre pas que nous aurions accompli une réduction du vivant grâce au pouvoir de notre connaissance. Bien au contraire, ce rapprochement mène à la démonstration inverse; il consiste en un certain aveu d'impuissance de l'analyse et de la connaissance objective à saisir à elles-seules le vivant. Cela ne signifie pas que nous devrions abandonner les principes d'ingénierie qui sont légitimement promus dans les discours des biologistes de synthèse. Rendre compte de la normativité du vivant n'était d'ailleurs pas, pour Canguilhem, une façon d'invalider la connaissance objective : « Ces affirmations n'entraînent aucune interdiction », disait-il après avoir soutenu que les « formes vivantes » ne pouvaient être saisies dans une division (Canguilhem, 2003, p. 14). De même, la biologie de synthèse a sans doute tout à gagner à formaliser, à analyser et à standardiser. Mais cela n'élimine pas le fait que ses applications sont désormais vivantes, et qu'en cela il est tout à fait légitime d'assumer l'antériorité de notre activité technique sur la connaissance des mécanismes du vivant. Il s'agit au fond, pour reprendre les mots de Canguilhem, de « (...)compléter l'explication des mécanismes (y compris les mécanismes de la vie), ce qui relève de la science, par une compréhension de la construction des machines prise comme faits culturels et non plus

physiques, ce qui suppose la réinscription des mécanismes dans l'organisation vivante comme condition nécessaire d'antériorité » (Canguilhem, 2015 [1947], p.320).

Il demeure donc selon nous pertinent de rendre compte de cette dimension vivante et indépendante que sont appelés à occuper nos machines. Une foule de techniques, comme nous l'avons vu, tendent aujourd'hui à être à la fois vivantes et artificielles. Certes, cette dualité n'est pas nouvelle, et peut dans une certaine mesure être appliquée par exemple à l'agriculture ou aux animaux domestiques. Les humains n'ont pas attendu la génétique pour modifier génétiquement les vivants qu'ils employaient pour leur activité technique. Mais cette dualité entre vie et artifice est particulièrement accusée avec les biotechnologies. Le philosophe et historien des sciences Hans-Jörg Rheinberger y voit d'ailleurs, dans un article de la revue « Science in context » (Rheinberger, 1995), un phénomène radicalement nouveau et sans précédent dans l'histoire humaine. Alors que la biologie moléculaire cherchait auparavant à analyser et à se faire une représentation « extracellulaire » des mécanismes fondamentaux du vivant, l'arrivée du génie génétique a inversé cette ambition; c'est désormais à partir de *projets* techniques finalisés que l'on synthétise des molécules qui seront réintroduites pour jouer un rôle dans un organisme qu'il ne s'agit plus de décomposer. Les techniques de la biologie moléculaire deviennent ainsi au service de projets humains plutôt que d'être, comme autrefois, au service de l'analyse des constituants de l'organisme. Ce pouvoir de modifier, par la technique, les instructions mêmes du vivant, est selon Rheinberger véritablement inédit dans l'histoire : « *For the first time in all time, it is on the level of instruction that metabolic processes are becoming susceptible to manipulation* » (Rheinberger, 1995, p. 252). C'est ainsi le vivant dans son intégralité qui, par le biais de ces nouvelles technologies, est instrumentalisé d'une façon radicalement nouvelle. L'organisme devient lui-même, dans sa *totalité*, un milieu technique. Ce retournement vers le vivant, sans être un renoncement à la connaissance analytique, montre néanmoins les limites d'une conception cartésienne de la technique attachée à connaître et à agir de façon prévisible sur une matière passive. De même, les « machines » de la biologie de synthèse, étant eux-mêmes vivantes, ne peuvent guère être aujourd'hui perçues comme la simple application d'un savoir théorique.

Conclusion

Contrairement à ce qui est couramment véhiculé dans certains discours de la biologie de synthèse, l'ingénieur correspond très peu en réalité à cette figure abstraite qui, armée de son savoir, modèlerait selon sa volonté une nature passive. En examinant les processus techniques concrets de l'ingénieur, nous avons pu constater que cette vision dualiste tient très peu en pratique. D'une part, une dimension savoir-faire demeure, même dans les laboratoires, irréductible au seul savoir théorique. D'autre part, il n'est pas vrai que les biologistes de synthèse attendent d'avoir rigoureusement décomposé et analysé le vivant avant d'entreprendre leur activité technique. Au contraire, le vivant dans son intégralité sert aujourd'hui à la fois de modèle, d'outil et de milieu technique pour l'ingénieur, celui-ci instrumentalisant d'une manière inédite les potentialités propres au monde biologique. Ce regard porté sur les pratiques conduit selon nous à mieux percevoir cette nécessité, dont parlait Canguilhem, de reconnaître la normativité du monde vivant, ainsi que l'origine vitale de tout mécanisme. Les dispositifs de la biologie de synthèse, dans la mesure où ils sont eux-mêmes vivants, sont par le fait même normatifs et irréductibles à l'analyse, témoignant des limites techniques de la conception cartésienne.

Conclusion – Remettre le mécanisme à sa place

« dans la vie et pour la vie »

Bien que comparer le vivant à des objets techniques semble être une inclination récurrente dans l'histoire humaine, identifier la vie à une machine est une attitude récente, historiquement associée au dualisme cartésien, à une vision de la technique comme produit d'un savoir humain et, parfois, à une philosophie réductionniste du vivant. Certains de ces éléments peuvent être retrouvés en biologie de synthèse. Ils transparaissent, de façon explicite ou implicite, dans les discours qui l'accompagnent. Nous entreprendrons ici de synthétiser ces éléments :

L'approche la plus courante et la plus médiatisée de la biologie de synthèse, d'abord institutionnalisée au MIT, se veut méthodologiquement réductionniste. Selon cette approche, le vivant doit être autant que possible rendu accessible à un traitement technique correspondant à un paradigme ingénieur. Pour ce faire, les biologistes de synthèse entendent « surmonter » la complexité du vivant en introduisant divers principes et règles de constructions qui faciliteront le *design* de réseaux de gènes fonctionnels. Cette position est promue de façon parfois explicite, dans les discours des pionniers de la biologie de synthèse comme Drew Endy, Tom Knight ou Jay Keasling (Knight, 2003; Endy, 2005; Keasling, 2008), et dans divers commentaires scientifiques (Brent, 2004; Heinemann et Panke, 2006; Andrianantoandro, 2006; Forster et Church, 2007; Voigt, 2007); mais aussi de façon parfois plus implicite, dans l'application de diverses stratégies de standardisation (*Registry of Biological Parts*; *BioBricks foundation*; concours iGEM; logiciel *Gene designer*).

Pour ce qui est d'une ontologie du vivant, on chercherait en vain une position commune à tous les biologistes de synthèse. On peut cependant identifier, dans l'attitude que nous avons décrite, une position résolument pragmatique. C'est dans la mesure où le vivant « naturel » n'entre pas dans des cadres techniques prévisibles, contrôlés, qu'il s'avère nécessaire de chercher les moyens de l'y faire entrer. On reconnaît donc au vivant une certaine non-ressemblance avec les machines, sans juger nécessaire ni pertinent de statuer sur l'origine ou la nature de cette non-ressemblance. L'important est de chercher à surmonter cette limite, perçue comme un obstacle, afin de produire des biotechnologies utiles et

fonctionnelles. Sans emprunter la métaphysique cartésienne, cette première approche retient donc néanmoins le projet technique associé à Descartes, soit celui d'une maîtrise technique du monde vivant rendue possible par la science et la raison. Une bonne machine, selon cette vision, est une machine dont on connaît les rouages et dont on peut rigoureusement prévoir le fonctionnement.

Parallèlement à ce portrait global, on peut identifier dans certaines pratiques de la biologie de synthèse – ainsi que dans certains discours encore marginaux – une approche de la technique s'insérant difficilement dans ce paradigme ingénieur. Sans renoncer aux principes d'ingénierie mentionnés ci-haut, certains biologistes assument de façon décomplexée un ensemble de techniques qui instrumentalisent le vivant sans nécessairement chercher à le décomposer. La complexité, selon cette approche, est perçue comme un outil au service de l'ingénieur. Anna Deplazes-Zemp, dans un article sur les diverses conceptions de la vie en biologie de synthèse, résume cette idée de façon originale : « (...) *“life” is not understood as a property that is automatically associated with nature anymore but primarily as the property of technological products* » (Deplazes-Zemp, 2010, p. 768). La vie est alors prise pour point de départ et peut servir à la fois d'outil, de modèle ou de milieu technique. Des propriétés diverses associées à la vie sont ainsi instrumentalisées, comme en témoignent les techniques de *kludging* ou d'évolution dirigée. Cette dimension « bricoleuse », exploratrice, permet de composer avec des totalités parfois trop complexes pour être modélisées. Elle donne par ailleurs souvent lieu à des résultats qu'une approche purement analytique n'aurait pu espérer atteindre.

Cette dernière vision actualise selon nous la version canguilhemienne d'une technique puisant dans le vivant ses mécanismes. Le rapport technique à la vie, dans ce qui a été qualifié de « seconde vague » de biologie de synthèse (Purnick et Weiss, 2009), traduit une attitude considérant la normativité du vivant comme un outil de base qu'il ne s'agit pas nécessairement de réduire à ses composantes. Non pas au sens où les biologistes percevraient maintenant dans la vie une âme ou une force vitale, mais au sens où certains d'entre eux adopteraient désormais pour point de départ un niveau plus complexe que le niveau analytique; niveau où une « vision » globale rend compte d'une totalité.

Nous avons vu que selon Canguilhem, le sens biologique est ainsi perdu lorsqu'on l'on tente de réduire un fait vital à l'analyse de ses constituants. Les vivants correspondent à des « formes » et à des « totalités » qui « (...) peuvent être saisies dans une vision, jamais dans une division » (Canguilhem, 2003, p. 14). De la même façon, les biologistes de synthèse renoncent en partie à diviser lorsque vient le temps d'instrumentaliser la vie à des fins pratiques. Ils orientent des tendances plus qu'ils n'inventent rationnellement des mécanismes. Des fonctions déjà présentes dans le vivant sont ainsi modifiées pour s'aligner aux finalités techniques de l'être humain. Loin d'être une vision de la technique comme instantiation d'une connaissance, on assiste à une technique véritablement « à l'école de la vie ». Renonçant en partie à l'exigence rationaliste voulant que l'on divise avant de fabriquer, cette approche n'attend pas toujours la science pour tirer avantage du vivant, agissant ainsi avec la témérité qui selon Canguilhem témoignait de l'origine vitale de la technique.

C'est en ce sens, il nous semble, qu'il faut interpréter le « vitalisme » de Canguilhem. Ce vitalisme n'est au fond que la reconnaissance, au niveau de complexité qui est le nôtre, d'une activité normative se distinguant de la matière inerte. Il nous semble qu'il faut insister sur ce point. Ce qui choque parfois avec l'analogie mécaniste, c'est qu'elle semble tenir notre propre normativité pour illusoire. Cependant, même dans l'éventualité où il serait démontré que les caractéristiques que l'on prête à la vie trouveraient leur origine dans leurs composantes physico-chimiques, cela ne diminuerait en rien leur aspect émergent, c'est-à-dire leur aspect nouveau et imprévisible. Si on prouvait que l'auto-organisation du vivant procède historiquement de l'inertie, on montrerait un fait nouveau et extraordinaire; on pourrait alors dire que, dans ce monde, d'un fait peut naître une valeur. Au même titre qu'une analyse physico-chimique du monoxyde de dihydrogène n'enlève rien à l'authenticité des propriétés que nous prêtons à l'eau, une explication de l'origine de la vie n'enlèverait rien, par exemple, au caractère fondamentalement normatif que nous prêtons généralement au vivant.

C'est ici que réside toute la pertinence de la philosophie biologique de Canguilhem. Il s'agit de reconnaître que la vie explore, risque, et n'attend pas toujours la raison pour intervenir dans le monde. Cette attitude peut devenir objet de dévalorisation pour une philosophie rationaliste; c'est ainsi parfois que l'on interprète par exemple les passages ou

Descartes traite de la technique et des artisans. Pourtant, Canguilhem a bien souligné que Descartes lui-même considérerait positivement une foule de techniques et de savoir-faire relevant avant tout de l'expérience vécue. Réhabiliter cette dimension ne constitue ainsi pas une dévalorisation de la raison, mais un rappel des origines et de la place même du rationalisme. C'est un regard vivant, agissant sur des totalités, qui prévaut dans l'activité technique; la science ne vient qu'en second lieu augmenter les possibilités de notre pouvoir d'action sur la matière. Cela nous rappelle que l'être humain n'est pas un sujet hors du monde, mais un être vivant faisant partie intégrale du monde. On peut bien expliquer, mais quand vient le temps d'agir, une dimension vitale demeure irréductible. Il nous semble légitime de traiter philosophiquement de cet aspect vécu, sans quoi il faudrait renoncer à une part importante de l'expérience humaine.

C'est en gardant cette perspective en arrière-plan que nous traiterons ici brièvement de la portée normative de nos conclusions. Les différentes conceptions de la technique que nous avons décrites, comme toute conception du monde, ne sont pas neutres ou sans incidence par rapport à la pratique. Elles supposent un rapport moral au monde. Elles s'accompagnent par exemple de choix techniques, de décisions et de promesses diverses.

En premier lieu, l'attitude que l'on adoptera par rapport à ces nouveaux objets issus de la biologie de synthèse sera susceptible d'avoir une incidence sur le statut qui leur sera attribué. Ce statut, qui concerne avant tout les questions de propriété, est traditionnellement pensé selon les pôles « artificiel » et « naturel ». Selon ce point de vue, ce qui est produit par la nature échapperait en principes à la brevetabilité, alors que les fabrications humaines pourraient au contraire faire l'objet d'une revendication de propriété. Cette classification simpliste s'est déjà avérée problématique dans les dernières années avec l'essor de différentes biotechnologies, et a donné lieu à des difficultés d'interprétation concernant par exemple la brevetabilité de génomes, de plantes, de bactéries ou même de souris (Bensaude-Vincent et Benoit-Browaëys, 2011, p. 91). Généralement, la brevetabilité du vivant nécessite que l'on considère que ce vivant est réellement une « invention » humaine, c'est-à-dire qu'il soit vu « comme un assemblage de pièces détachées susceptibles d'être fabriquées » (Bensaude-Vincent et Benoit-Browaëys, 2011, p. 94). En ce sens, peut-on réellement considérer de cette façon les résultats de la biologie de synthèse qui, comme nous l'avons vu, échappent souvent

à un tel contrôle et à une telle rigidité? Peut-on appeler machine au sens classique du terme une bactérie qui porterait un tant soit peu de l'autonomie que nous attribuons aux êtres vivants? Inversement, que signifierait « créer » la vie, si l'organisme obtenu répondait aux critères stricts de prévisibilité que l'on est en droit d'attendre exclusivement d'un objet inerte? Dans cet ordre d'idées, Anna Deplazes-Zemp et Markus Huppenbauer soulignent par exemple que l'emploi du terme « machine » est généralement associé à un objet dont la finalité est étroitement liée à l'être humain, alors que l'on sera plus enclins à parler d'« organisme » pour un être autonome qui échapperait pleinement à notre contrôle et à notre pouvoir de prévision. Ainsi aura-t-on tendance par exemple à appeler « machine vivante » un circuit génétique minimal et fonctionnel; alors qu'inversement on nommera « organisme artificiel » un être vivant et autonome dont l'origine est cependant humaine, telle que le serait par exemple une éventuelle cellule synthétique (Deplazes-Zemp et Huppenbauer, 2009).

À cet égard, le continuum que met en lumière Canguilhem entre l'organisme et la machine nous semble plus pertinent qu'un clivage strict entre « naturel » et « artificiel ». De plus en plus, certains objets seront appelés à brouiller ces frontières traditionnelles, précisément parce que les constructions humaines emprunteront davantage à la plasticité typiquement associée à la vie. La plasticité de la vie suppose une certaine autonomie, une finalité indépendante de celle de l'homme. Inversement, la rigidité des machines suppose un contrôle plus étroit des paramètres, permis notamment par la standardisation des pièces. Entre les deux, il n'y a pas de coupure, mais une extériorisation progressive de la finalité en dehors de l'être humain, allant dans le sens de l'organique à la technique. En plaçant les différentes réalisations de la biologie de synthèse le long de ce continuum, on comprend mieux le sens de l'activité technique, et on évite en partie les difficultés liées à l'attribution d'un statut d'artificialité. Une machine n'est pas plus « artificielle » qu'un animal ayant subi un grand nombre de sélections artificielles, ce qui ne veut pas dire qu'il n'y a pas pour autant un large écart entre ces deux entités. Une machine n'a pas de finalité inhérente, elle ne peut tomber malade, instituer des normes, apprécier ni déprécier son expérience. Il vaut mieux s'efforcer

de comprendre où, entre ces deux extrêmes, se situe l'entité biologique que l'on étudiera, qu'il s'agisse d'une cellule synthétique, d'une bactérie modifiée ou d'un animal de ferme⁷⁶.

En second lieu, les vues que nous avons adoptées incitent à modifier notre attitude fondamentale vis-à-vis notre activité technique. Pour les raisons exposées plus haut, il nous semble avisé, sans cesser de rationaliser nos techniques, de renoncer en partie à une certaine illusion de maîtrise intégrale du monde vivant. L'idée selon laquelle les éventuels organismes produits par la biologie de synthèse et disséminés dans l'environnement seraient équivalents à des OGM « sécurisés », c'est-à-dire prévisibles et contrôlables, nous semble être une idée dangereuse et illusoire⁷⁷. Drew Endy et Rober Carlson, deux pionniers dans le domaine, assurent à l'inverse que ces organismes agiront selon les prévisions, pour la raison apparemment évidente qu'ils auront été conçus rationnellement (Bensaude-Vincent et Benoit-Browaeyns, 2011, p. 76). Pourtant, dans la mesure précisément où ces derniers sont vivants, il semble difficile d'écarter aussi facilement la possibilité d'une mutation inattendue, d'une interaction imprévue avec l'environnement ou encore d'une évolution incontrôlée. Cette attitude à la fois optimiste et rationaliste, loin de se limiter à la biologie de synthèse, nous semble être également caractéristique d'un bon nombre de promesses associées aux technologies émergentes. Que l'on parle de nanotechnologies, de sciences cognitives ou de géo-ingénierie, la tendance est en effet à affirmer la capacité de la raison humaine à comprendre et à dominer la matière. Cette conception écarte le fait que, par la technique, l'humain est avant tout en relation à un milieu, et que cette dimension implique une large part d'expérience, d'exploration, d'essais et d'erreurs.

C'est pour ces raisons qu'il nous paraît plus adéquat d'opter pour une conception relationnelle de l'activité technique, particulièrement en ce qui a trait aux techniques prenant pour objet le vivant. La vie, précisément parce qu'elle institue des normes, échappe au genre de prévision que rendrait possible par exemple une loi mécanique. Cette constatation ne doit pas mener à des interdits catastrophiques, mais simplement inciter à une forme de prudence

⁷⁶ Il nous semble que Tim Lewens, de l'Université de Cambridge, en arrive à une position semblable en décrivant une « continuité de conception »: « *We can now see more generally that there is a continuum between 'pure' forms of natural evolution at one extreme, where no intentional agency influences the evolution of a lineage, and efforts at fully formalised and standardised rational design processes at the other.* » (Lewens, 2013, p. 643)

⁷⁷ Sur les enjeux de biosécurité relatifs à la biologie de synthèse, voir : Méthot (2014).

que nous qualifierions d'analogue à la prudence aristotélicienne, c'est-à-dire relevant en partie de l'expérience et du vécu.

Pour ce faire, la notion de « pilotage » théorisée par Catherine et Raphael Larrère (Larrère et Larrère, 2015) fournit des lignes directrices concrètes pour réintégrer nos pratiques techniques à une conscience des limites de notre maîtrise du monde. Plutôt que d'envisager la technique comme un moyen de domination de la nature, le pilotage implique de considérer celle-ci comme un partenaire avec lequel il faut composer. Comme dans les cas paradigmatiques de l'agriculture, de la domestication des animaux ou de la fermentation contrôlée, la notion de partenaire implique la reconnaissance que certains paramètres, indépendants de nous, échappent par le fait-même à notre contrôle. Il ne s'agit alors pas d'imposer notre volonté à une nature passive et indépendante, mais plutôt d'orienter des phénomènes déjà présents, de « faire-faire » et de « faire-avec » (Larrère et Larrère, 2015, p. 15) La reconnaissance de cet aspect de la technique implique par exemple la prise en compte de contextes sociaux ou environnementaux échappant en principes à une analyse intégrale, nécessitant par le fait même la mobilisation de l'expérience vécue autant que de la connaissance scientifique. Cette notion de pilotage, par ailleurs, nous semble en parfait accord avec la vision de la technique de Canguilhem, au sens où celle-ci implique elle également une dimension synthétique et créatrice.

Il s'agit au fond, contre une tendance que nous avons pu identifier en biologie de synthèse mais que l'on pourrait étendre à bien d'autres domaines, de reconnaître à la fois les limites de l'analyse et la valeur de l'expérience vécue. Or, comme l'a bien montré Canguilhem, cette seconde dimension peut difficilement se passer de notions normatives. L'« exigence » de sens et de finalité que défendait Canguilhem en traitant du vivant n'est rien d'autre que la reconnaissance d'une certaine légitimité à cet aspect vécu. La vie, lorsque l'on opte pour ce point de vue, ne consiste pas simplement à subir des états de fait, mais au contraire consiste à exiger, sous forme de dépréciations et de valorisations, certains états ou certaines formes de l'existence. La simple reconnaissance de ces normes suffit, à l'inverse de la philosophie mécaniste, à refuser d'identifier vivant et matière inerte; à refuser de réduire le vivant à des lois. Il nous semble que cette tentative de Canguilhem de reconnaître la normativité de la vie, sans pour autant postuler une force vitale ni interdire à la science de

traiter des organismes, trouve encore toute sa légitimité et son actualité dans le contexte de la biologie de synthèse. Nous croyons que cette dernière, comme toute technique et comme toute science, doit être ainsi pensée dans son origine et son rôle vital, c'est-à-dire remise à sa place « dans la vie et pour la vie » (Canguilhem, 2005, p. 320).

Bibliographie

- Adrianantoandro, E., Basu, S., Karig, D. K., Weiss, R. (2006). « Synthetic biology: new engineering rules for an emerging discipline », *Molecular Systems Biology*, 2, 1-14.
- Ayala, F.J. (1987). « Biological Reductionism : The Problems and Some Answers », dans Yates F.E., Garfinkel A., Walter D.O., Yates G.B. (dir.), *Self-Organizing Systems*, Life Science Monographs Series, 315-324.
- Bachelard, G. (1975). *La formation de l'esprit scientifique*, Paris : Vrin. [1938]
- Bachelard, G. (2012). *Le nouvel esprit scientifique*, Paris : Presses Universitaires de France. [1934]
- Balmer, M., Martin, P. (2008). *Synthetic Biology: Social and Ethical challenges*, Londre: BBSRC.
- Beaude, J. « MÉCANISME, philosophie ». In Universalis éducation [en ligne]. *Encyclopædia Universalis*, consulté le 28 avril 2017. Disponible sur <http://www.universalis-edu.com/acces/bibl.ulaval.ca/encyclopedie/mecanisme-philosophie/>
- Becquemont, D. (2010). « 'Design', histoire du mot et du concept : sciences de la nature, théologie, esthétique », dans Jean Gayon et Armand de Ricqlès (dir.), *Les fonctions : des organismes aux artefacts*, Paris : Presses Universitaires de France, 81-96.
- Bedeau M., Humphreys, P. (2008). *Emergence. Contemporary Readings in Philosophy of Science*, MIT Press.
- Benner, S. A., Sismour, A. M. (2005). « Synthetic biology », *Nature reviews Genetics*, 6(7), 533-543.
- Benner, S. A., Yang, Z., Chen, F. (2011). « Synthetic biology, tinkering biology, and artificial biology. What are we learning? », *Comptes Rendus Chimie*, 14, 372-387.
- Bensaude-Vincent, B. (2004). *Se libérer de la matière ? Fanstasmes autour des nouvelles technologies*, Paris : INRA.
- Bensaude-Vincent, B. (2013). « Discipline-building in synthetic biology », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 122-129.
- Bensaude-Vincent, B., Benoit-Browaey, D. (2011). *Fabriquer la vie : Où va la biologie de synthèse?*, Paris : Éditions du Seuil.
- Bergson, H. (1941). *L'Évolution créatrice*, Paris : Presses Universitaires de France.
- Boudry M., Pigliucci, M. (2013). « The mismeasure of machine: Synthetic biology and the trouble with engineering metaphors », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 660-668.
- Braillard, P-A. (2009). « La biologie des systèmes peut-elle se passer d'une vision évolutive? », dans Thomas Heams, Phillippe Huneman, Guillaume Lecointre et Marc Silberstein (dir.) *Les mondes darwiniens: l'évolution de l'évolution*, Paris : Syllepse, 317-336.

- Braunstein, J-F. (2000). « Canguilhem avant Canguilhem », *Revue d'histoire des sciences*, 53(1), 9-26.
- Bredèche, N. (2009). « Évolution de robots autonomes et autres créatures artificielles », dans Thomas Heams, Phillippe Huneman, Guillaume Lecointre et Marc Silberstein (dir.) *Les mondes darwiniens: l'évolution de l'évolution*, Paris : Syllepse, 1043-1072
- Brent, R. (2004). « A partnership between biology and engineering », *Nature Biotechnology*, 22(10), 1211-1214.
- Brockman, J. (2008, 19 février). « Engineering biology: A talk with Drew Endy », *Edge*, Disponible sur: <https://www.edge.org/documents/archive/edge237.html#endy>
- Campbell, N., Reece, Jane B. (2007). *Biologie, 3e édition*. Adaptation française de René Lachaine et Michel Bosset, Saint Laurent : Éditions du Renouveau Pédagogique Inc.
- Campos, L. (2009). « That was the Synthetic Biology that was » dans Schmidt M., Kelle A., Ganguli-Mitra A., de Vriend H. (eds), *Synthetic Biology. The technoscience and its societal consequences*, Dordrecht, Springer, 5-21.
- Canguilhem, G. (1937). « Descartes et la technique », *Travaux du IXe congrès international de philosophie*, Ie partie, Paris : Hermann.
- Canguilhem, G. (1977). *La formation du concept de réflexe aux XVIIe et XVIIIe siècles*, Paris : Vrin. [1955]
- Canguilhem, G. (1983). *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris : Vrin. [1968]
- Canguilhem, G. (1989). « Vie », *Encyclopædia Universalis*, 2e éd., Paris. [1955]
- Canguilhem, G. (2002). *Écrits sur la médecine*, Paris : Éditions du Seuil.
- Canguilhem, G. (2003). *La connaissance de la vie*. Paris : Vrin. [1952]
- Canguilhem, G. « RÉGULATION, épistémologie ». In Universalis éducation [en ligne]. *Encyclopædia Universalis*, consulté le 28 avril 2017. Disponible sur <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/regulation-epistemologie/>
- Canguilhem, G. (2009). *Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie : nouvelles études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris : Vrin. [1977]
- Canguilhem, G. (2013). *Le normal et le pathologique*, Paris : Presses Universitaires de France. [1966]
- Canguilhem, G. (2015). *Œuvres complètes Vol. 4 : Résistance, philosophie biologique et histoire des sciences (1940-1965)*, textes présentés et annotés par Camille Limoges, Paris : Vrin.
- Canton, B., Labno, A., Endy, D. (2008). « Refinement and standardization of synthetic biological parts and devices », *Nature Biotechnology*, 26(7), 787-793.
- Chauviré, C. (1979). *L'essayeur de Galilée*, Paris : Belles lettres.
- Cohen, J. (2016, 3 novembre). « One of our reporters tried to do CRISPR. He failed miserably », *Science*, Disponible sur: <http://www.sciencemag.org/news>
- Comte, A. (1975). *Cours de philosophie positive*, Paris: Hermann. [1835]

- Daston, L., Galison, P. (2012). *Objectivité*. Dijon : Presses du réel.
- Deplazes-Zemp, A., Huppenbauer, M. (2009). « Synthetic organisms and living machines: Positioning the products of synthetic biology at the borderline between living and non-living matter », *Systems and Synthetic Biology*, 3(1-4), 55-63.
- Deplazes-Zemp, A. (2010). « The conception of life in synthetic biology », *Science and Engineering Ethics*, 18, 757-774.
- Descartes, R. (1996). *Œuvres de Descartes XI*, publiées par Charles Adam et Paul Tannery, Paris : Vrin.
- Descartes, R. (2009). *Œuvres complètes I*, sous la direction de Jean-Marie Beyssade et Denis Kambouchner, Paris : Galimard.
- De Vriend, H. (2006). *Constructing life: Early social reflections on the emerging field of synthetic biology*, The Hague: Rathenau Institute; Working Document 97.
- Dougherty, M. J., Arnold, F. H. (2009). « Directed evolution: New parts and optimized function », *Current Opinion in Biotechnology*, 20(4), 486-491.
- Duchesneau, F. (1982). *La physiologie des lumières. Empirisme, modèles et théories*, The Hague; Boston: M. Nijhoff.
- Elowitz, M. B., Leibler, S. (2000). « A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators », *Nature*, 403, 335-338.
- Endy, D. (2005). « Foundations for engineering biology », *Nature*, 438(7067), 449-453.
- Fagot-Largeault, A. (2016) *Georges Canguilhem, philosophe de la médecine (Québec, 20 juin 2016)*, conférence présentée à la faculté de philosophie de l'Université Laval.
- Ferber, D. (2004). « Microbes made to order », *Science*, 303, 158-160.
- Fournier, M. (2016). *Quand la nature inspire la science*, Toulouse : Éditions Plume de Carotte.
- Gayon, J. (2003). « Bachelard et l'histoire des sciences », dans Jean-Jacques Wunenburger (dir.), *Bachelard et l'épistémologie française*, Paris, Presses universitaires de France.
- Gayon, J. (2008). « The Concept of Individuality in Canguilhem's Philosophy of Biology », *Journal of the history of biology*, 31, 305-325.
- Gayon J., De Ricqlès A. (2010). *Les fonctions : Des organismes aux artefacts*, Paris : Presses universitaires de France.
- Gelfert, A. (2013). « Synthetic biology between technoscience and thing knowledge », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 141-149.
- Gibson, D.G. et al. (2010). « Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome », *Science*, 329: 5987, 52-56.
- Giroux, E. (2010). *Après Canguilhem: définir la santé et la maladie*, Paris : Presses universitaires de France.

- Gould, S. J., Lewontin, R. C. (1979) « The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme », *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 205(1161), 581-598.
- Guru, E., Chatterjee, S. (2013). « Study of biomolecular network in *Escherichia Coli* », *International Journal of Biophysics*, 3(1), 38-50.
- Güttinger, S. (2013). « Creating parts that allow for rational design: Synthetic biology and the problem of context-sensitivity », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 199-207.
- Hacking, I. (2007). « Canguilhem parmi les cyborgs » dans Jean-François Braunstein (dir.), *Canguilhem : Histoire des sciences et politique du vivant*, Paris, Presses Universitaires de France, 113-141.
- Heams, T. (2009). « De quoi la biologie synthétique est-elle le nom? », dans Thomas Heams, Philippe Huneman, Guillaume Lecointre et Marc Silberstein (dir.) *Les mondes darwiniens: l'évolution de l'évolution*, Paris : Syllepse, 637-686.
- Heinemann, M., Panke, S. (2006). « Synthetic biology – putting engineering into biology », *Bioinformatics*, 22(22), 2790-2799.
- Holm, S. (2015). « Is synthetic biology mechanical biology? », *History and Philosophy of the Life Sciences*, 37(4), 413-429.
- Hutchison C. A. et al. (2016). « Design and synthesis of a minimal bacterial genome », *Science*, 351(6280), 1414-1426.
- Jacob, F. (1970). *La logique du vivant : Une histoire de l'hérédité*, Paris : Gallimard.
- Jacob, F. (1981). *Le jeu des possibles: Essai sur la diversité du vivant*, Paris : Fayard.
- Jones, R. (2008). « Drew Endy on engineering biology », *Softmachine* (blog), disponible sur: <http://www.softmachines.org/wordpress/?p=389>.
- Kastenhofer, K. (2013). « Two sides of the same coin? The (techno)epistemic cultures of systems and synthetic biology », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 130-140.
- Kay, Lily E., (2000). *Who wrote the book of life? A history of the genetic code*, Stanford, Stanford University Press.
- Keasling, J. D. (2008). « Synthetic biology for synthetic chemistry », *ACS chemical biology*, 3(1), 64-76.
- Keller, E. F. (2003). *Le siècle du gène*, Paris : Galimard.
- Keller, E. F. (2004). *Expliquer la vie : Modèles, métaphores et machines en biologie du développement*, Paris : Galimard.
- Keller, E. F. (2009). « Knowing as making, making as knowing: the many lives of synthetic biology », *Biological Theory* 4(4), 333-339
- Knight, T. (2003). *Idempotent vector design for standard assembly of biobricks*, MIT Synthetic Biology Working Group.
- Koyre, A. (1988). *Du monde clos à l'univers infini*, Paris : Galimard.

- Kuhn, T. S. (2016). *La révolution copernicienne*, Paris : Belles lettres.
- Kwok, R. (2010) « five hard truths for synthetic biology », *Nature*, 463, 288-290.
- Latour, B. (1989) *La science en action*, Paris : Éditions La Découverte.
- Larrère C., Larrère R. (2015). *Penser et agir avec la nature*, Paris : Éditions La Découverte.
- Le Blanc, G. (2002). *La vie humaine : anthropologie et biologie chez Georges Canguilhem*, Paris : Presses Universitaires de France.
- Le Blanc, G. (2007). *Canguilhem et les normes*, Paris : Presses Universitaires de France.
- Le Blanc, G. (2010). *Canguilhem et la vie humaine*, Paris : Presses Universitaires de France.
- Lecourt, D. (dir.) (2006). *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Quadrige.
- Lecourt, D. (1972). *Pour une critique de l'épistémologie (Bachelard, Canguilhem, Foucault)*, Paris : F. Maspero.
- Leroi-Gourhan, A. (1973). *Évolution et Technique*, Paris : Éditions A. Michel.
- Lewens, T. (2013). « From bricolage to BioBricks™: Synthetic biology and rational design », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 641-648.
- Mackenzie, A. (2010). « Design in synthetic biology », *Biosocieties*, 5(2), 180-198.
- Malaterre, C. (2013a). « Life as an Emergent Phenomenon: From an Alternative to Vitalism to an Alternative to Reductionism », dans S. Normandin & C. T. Wolfe (dir.), *Vitalism and the Scientific Image in Post-Enlightenment Life Science, 1800-2010*. Dordrecht: Springer Science+Business, 155-178.
- Malaterre, C. (2013b). « Synthetic Biology and Synthetic Knowledge », *Biological Theory*, 8, 346-356.
- Mayr, E. (1961). « Cause and effect in biology », *Science*, 134(3489), 1501-1506.
- Méthot, P.-O. (2013). « On the genealogy of concepts and experimental practices: rethinking Georges Canguilhem's historical epistemology », *Studies in History and Philosophy of Science*, 44, 112-123.
- Méthot, P.-O. (2015). « Science and science policy: regulating 'select agents' in the age of synthetic biology », *Perspectives on Science*, 23(15), 280-309.
- Morange, M. (2003). *Histoire de la biologie moléculaire*, Paris : Découverte. [1994]
- Morange, M. (2009). « A critical perspective on synthetic biology », *Hyle*, 15, 21–30
- Morange, M. (2012). « Synthetic Biology: A Bridge Between Functional and Evolutionary Biology », *Biological Theory* 4(4), 368-377.
- Morange, M. (2013a). « Comparison between the work of synthetic biologists and the action of evolution: engineering versus tinkering », *Biological Theory* 8(4), 318-323.
- Morange, M. (2013b). « Synthetic Biology: A Challenge to Mechanical Explanations in Biology? », *Perspectives in Biology and Medicine* 55(4), 543-553.

- Moya, A., Krasnogor, N., Pereto, J., Latorre, A. (2009). « Goethe's dream. Challenges and opportunities for synthetic biology », *EMBO Reports*, 10, 28-32.
- Mukherji, S., Oudenaarden, A. V. (2009). « Synthetic biology: understanding biological design from synthetic circuits », *Nature Reviews Genetics*, 10, 859-871.
- Nicoglou, A. (2015). « The Evolution of Phenotypic Plasticity: Genealogy of a Debate in Genetics », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 50, 67-76.
- Nicoglou, A. (2018). « The Concept of Plasticity in the History of the Nature-Nurture Debate in the Early Twentieth Century », dans Stephanie Lloyd et al. (dir.), *The Palgrave Handbook of Biology and Society*, Londres: Palgrave Macmillan, 97-122.
- Nicholson, D. J. (2013). « Organisms \neq Machines », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(4), 669-678.
- O'Malley, M. A., Powell, A., Davies, J. F., Calvert, J. (2007). « Knowledge-making distinctions in synthetic biology », *Bioessays*, 30(1), 57-65.
- O'Malley, M.A. (2009). « Making knowledge in synthetic biology: design meets kludge », *Biological Theory*, 4(4), 378-389.
- O'Malley, M. A. (2011). « Exploration, iterativity and kludging in synthetic biology », *Comptes Rendus Chimie*, 14, 406-412.
- OPECST (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) (2012). *Rapport sur les enjeux de la biologie de synthèse*, disponible sur : <http://www.senat.fr/opecest/>.
- Parizeau, M-H. (2010). *Biotechnologie, nanotechnologie, écologie : entre science et idéologie*, Versailles : Éditions Quae.
- Parizeau, M-H. (2014). « La nature ingénieure et les finalités éthiques de la biologie de synthèse », dans Magnin T., Monsan P. (éd.). *Actes du colloque Éthiques des technologies du vivant*, Institut interdisciplinaire d'Études épistémologiques, Paris : Vrin, 109-132.
- Piglucci M., Boudry M., (2013). « The mismeasure of machine: Synthetic biology and the trouble with engineering metaphors », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 44, 660-668
- Porcar, M. (2016). « Synthetic biology: From having fun to jumping the gun », *Nanoethics*, 10, 105-109.
- Powell, A., Dupré, J. (2009). « From molecules to systems: the importance of looking both ways », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 40, 54-64.
- Purnick, P. E., Weiss, R. (2009). « The second wave of synthetic biology: from modules to systems », *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 10(6), 410-422.
- Rheinberger, H. J. (1995). « Beyond nature and culture: a note on medicine in the age of molecular biology », *Science in context*, 8(1), 249-263.
- Ro et al. (2006). « Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast », *Nature*, 440, 940-943.

- Roth, X. (2013). « Le jeune Canguilhem, lecteur de Bergson », *Dialogues*, 52, 625-647.
- Sanders, R. (2004, 13 décembre). *\$43 million grant from Gates Foundation brings together unique collaboration for antimalarial drug*, UC Berkeley News, Disponible sur : http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2004/12/13_gates.shtml
- Serrano, L. (2007). « Synthetic biology: Promises and challenges », *Molecular system biology*, 3:158.
- Specter, M. (2009, 28 septembre). « A life of its own: Where will synthetic biology lead us? », *The New Yorker*, URL: <http://www.newyorker.com/magazine/2009/09/28/a-life-of-its-own>
- Steizinger, J. (2016). « Engineers of Life? A Critical Examination of the Concept of Life in the Debate on Synthetic Biology », dans Krisin Hagen, Margret Engelhard et Georg Toepfer (dir.), *Ambivalences of creating life: Societal and philosophical dimensions of synthetic biology*, Cham (Suisse): Springer, 275-292.
- Voigt, C. A. (2006). « Genetic parts to program bacteria », *Current Opinion in Biotechnology*, 17, 548-557.
- Wade, N. (2010, 20 mai). « Researchers says they created a “Synthetic Cell” », *New York Times*, Disponible sur: <http://www.nytimes.com/2010/05/21/science/21cell.html>
- Wehner, M. et al. (2016). « An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots », *Nature (journal)*, 536(7617): 451–455.
- Wolfe, C. T. (2015). « The discreet charm of eighteenth-century vitalism and its avatars », version originale anglaise d'un chapitre publié en italien dans P. Pecere (ed.), *Il libro della natura*, vol. 1, Rome: Carroci, 273-299.
- Wolfe, C. T. (2016). « The Return of Vitalism: Canguilhem and French Biophilosophy in the 1960s », article disponible sur <http://ugent.academia.edu/CharlesWolfe>.

Sites internet de référence:

Synthetic Biology Project : Carte interactive des laboratoires de biologie de synthèse :

<http://www.synbioproject.org/sbmap/>

Registry of Biological Parts:

http://parts.igem.org/Main_Page

BioBricks foundation:

<https://biobricks.org/>

Synthetic Biology Open Language (SBOL)

<http://sbolstandard.org/>

Logiciel *Gene Designer*

<https://www.dna20.com/resources/genedesigner>

Geckskin™

<https://geckskin.umass.edu/>

Logiciel *Digikey*:

<http://www.digikey.ca>