

PRÉFACE

De nouveaux langages pour expliquer le vivant

Alors que le xx^e siècle naissait à peine, et quelques années seulement après les découvertes de Darwin, un autre géant des sciences révolutionnait les sciences du vivant. D'Arcy Thompson proposait un nouveau langage pour expliquer les formes du vivant : les mathématiques. Depuis fort longtemps les mathématiques étaient utilisées pour mesurer, quantifier, décrire les organismes et leurs structures. Mais les explications causales, y compris la théorie de la sélection naturelle à l'époque, s'exprimaient en langage naturel, sous la forme du verbe. Conscient que les mécanismes à l'origine des formes du vivant étaient variés et incluaient des processus biophysiques complexes au-delà de la sélection naturelle, D'Arcy Thompson montra pourquoi il était nécessaire d'utiliser aussi les mathématiques pour *exprimer et expliquer* les processus de morphogénèse. Ainsi, l'explication des formes des coquillages, des méduses, des ailes de libellules, des radiolaires, des cornes de béliers, ou des squelettes des dinosaures, devait au moins en partie s'exprimer sous la forme d'équations décrivant des processus de croissance contraints par les lois de la physique. L'identification d'avantages reproductifs ne pouvait suffire à expliquer l'origine de ces formes.

Plus tard, autour des années 1950, un second langage vint compléter celui des mathématiques : les algorithmes. Certains modèles mathématiques de la formation de structures, tant en physique qu'en biologie, étaient trop complexes pour qu'on puisse en déduire, par pur raisonnement mathématique, leurs comportements. L'invention de l'ordinateur, ainsi que de la théorie des algorithmes qui les faisaient fonctionner, ouvrit une nouvelle possibilité : celle de décrire les processus de morphogénèse comme des processus algorithmiques d'interactions entre les constituants des

systèmes, et de les simuler numériquement. Cette approche se révéla particulièrement utile pour étudier et expliquer les phénomènes de morphogenèse dans les systèmes comportant un grand nombre de composants en interactions non linéaires. Dans beaucoup de ces systèmes, l'ordre apparaît spontanément. Des macrostructures se forment à partir de microstructures qui n'en contiennent pas le plan : c'est l'auto-organisation. Ainsi, aux côtés des physiciens Lorenz et Fermi qui utilisèrent l'ordinateur pour modéliser des phénomènes climatiques ou les interactions entre particules magnétisées, deux figures fondatrices de l'informatique suivirent les pas de D'Arcy Thompson. Alan Turing exprima et étudia, sous la forme d'algorithmes, comment des réactions chimiques peuvent spontanément former des motifs comme les points, les bandes ou les spirales sur la peau des léopards et des poissons, ou encore modéliser la manière dont la symétrie sphérique d'une cellule œuf peut se briser lors de la gastrulation et permettre à l'embryon de prendre progressivement forme. Ces travaux, comme ceux de D'Arcy Thompson, eurent par la suite une influence considérable sur l'évolution de l'embryologie et de la biologie (même si elle fut parfois indirecte). John von Neumann quant à lui montra comment des structures algorithmiques pouvaient s'autoreproduire, formulant ainsi des questions épistémologiques profondes sur la nature de la vie.

Le cerveau ainsi que les représentations cognitives et les comportements qu'il engendre sont probablement les structures les plus complexes que nous connaissons. C'est donc sans surprise que de larges communautés de chercheurs utilisent aujourd'hui les mathématiques, les algorithmes et les ordinateurs pour les modéliser. L'une des facultés humaines les plus remarquables est celle du langage. D'où vient-il ? Comment s'est-il formé ? Comment une langue nouvelle se forme-t-elle ? Plusieurs scientifiques, dont Michael Studdert-Kennedy, Björn Lindblom, James Hurford, Luc Steels, ont proposé l'idée que des langues nouvelles pouvaient s'auto-organiser au cours d'interactions locales entre les individus, un peu comme les motifs sur la peau des léopards se forment à partir d'interactions moléculaires.

En particulier, Luc Steels a eu un rôle pionnier et visionnaire, montrant comment les modèles algorithmiques, ainsi que leurs extensions robotiques permettant de pleinement considérer le rôle du corps, pouvaient constituer un langage scientifique essentiel pour comprendre les origines du langage naturel. C'est lui qui m'a fait découvrir cette perspective fascinante et dans laquelle s'inscri-

vent les travaux que je présente dans ce livre. En m'accueillant dans son équipe, au Sony Computer Science Laboratory à Paris, il a joué un grand rôle dans l'établissement des fondations scientifiques de ces travaux. Je l'en remercie et lui exprime toute ma reconnaissance.

Ce livre ainsi se focalise sur un sujet particulier, et relatif à la parole, l'un des piliers du langage : Comment les structures de la parole, telles les voyelles ou la réutilisation combinatoire des phonèmes pour composer des syllabes, se sont-elles formées ? Comment une communauté d'individus peut-elle « inventer » un nouveau répertoire de vocalisations ? Quel rôle l'auto-organisation a-t-elle pu avoir dans la morphogenèse et l'évolution de la parole ? Suivant la vision méthodologique que je viens de décrire, ce livre étudie ces questions à la lumière de la construction et de l'étude de modèles informatiques et robotiques. Le lecteur cependant ne trouvera pas de réponses définitives à ces questions. Un long chemin reste à faire devant ces défis considérables. Le lecteur pourra plutôt découvrir comment l'utilisation de modèles algorithmiques, de ce nouveau langage, permet de reformuler ces questions, de les regarder d'un œil neuf, et d'apercevoir les contours d'hypothèses nouvelles sur les origines de la parole.

Certains des travaux décrits dans cet ouvrage ont été commencés en 1999, au Sony Computer Science Laboratory, et publiés dans une première édition (anglaise) en 2006¹. Il s'agit principalement des modèles présentés aux chapitres 6, 7 et 8, dans lesquels est étudiée la formation spontanée de vocalisations digitales et partagées dans une population d'individus babillants. Ces travaux ont ensuite été étendus de manière substantielle dans deux directions, qui ont dirigé la réécriture de plusieurs parties et des extensions importantes dans cette nouvelle édition. D'abord, la réflexion sur les hypothèses évolutionnaires, parfois nouvelles, vers lesquelles pointent ces modèles, a été largement approfondie. En particulier, l'étude du rôle du babillage, de l'exploration spontanée des vocalisations, et de l'imitation vocale à l'échelle évolutionnaire a été à l'origine d'une nouvelle série de modèles remplaçant ces mécanismes dans le cadre plus général du développement sensori-moteur et social de l'enfant, à l'échelle de l'épigenèse. Ainsi, avec Frédéric Kaplan, nous avons élaboré des modèles robotiques des motivations

1. Oudeyer P.-Y. (2006), *Self-Organization in the Evolution of Speech*, Oxford University Press.

intrinsic, poussant un organisme à explorer « par curiosité » son propre corps et ses relations avec son environnement. Cela nous a permis de montrer, comme l'explique le chapitre 9, comment le babillage et l'imitation vocale pourraient être des effets collatéraux de mécanismes développementaux plus généraux, ouvrant ainsi la voie à des hypothèses originales sur l'évolution de la parole. Ensuite, avec Clément Moulin-Frier, nous avons étudié plus précisément comment ces mécanismes d'exploration pouvaient auto-organiser certaines structures de développement vocal que l'on observe chez l'enfant.

Ces travaux sur la modélisation informatique du rôle de l'auto-organisation dans l'évolution de la parole s'inscrivent par ailleurs en complément de ceux de plusieurs groupes de recherche qui ont exploré, ou explorent, des voies similaires, et qui ont contribué à forger la vision que je présente dans ce livre. En particulier : à Grenoble, Ahmed-Reda Berrah, Pierre Bessière, Louis-Jean Boë, Julien Diard, Hervé Glotin, Rafael Laboissière, Clément Moulin-Frier, Jean-Luc Schwartz ; à Lyon Christophe Coupé, Jean-Marie Hombert, Egidio Marsico, François Pellegrino ; à Bruxelles, Bart de Boer ; à Yale, Catherine Browman, Louis Goldstein et Michael Studdert-Kennedy ; à Édimbourg, James Hurford.

La préparation de cet ouvrage ainsi que les travaux récents qui sont présentés doivent aussi beaucoup à Claude Kirchner et Isabelle Terrasse, qui ont su créer les conditions idéales pour leur réalisation à Inria. L'équipe Flowers qui m'entoure a aussi été d'une aide précieuse, tant scientifique que pratique, et j'en remercie tous ses membres.

La publication d'un livre de sciences abordant des questions fondamentales mais forcément un peu ardues, et sous un format accessible à un public varié, n'est pas une affaire facile. J'ai eu la chance de rencontrer trois personnes qui l'ont rendue possible, chacune à leur manière, mais toutes les trois en prenant le temps de s'intéresser à ce travail et en m'accordant leur enthousiasme : Mikhaïl Gromov et Michel Cassé, dont les efforts pour relier les sciences mathématiques au vivant et à l'homme font écho à l'universalisme de D'Arcy Thompson ; et Odile Jacob, qui avec son équipe mène un travail magnifique et salutaire de diffusion des sciences.

Enfin, je remercie tout particulièrement ma femme Cécile et mes enfants Adèle, Théophile et Arthur, pour l'énergie et la lumière qu'ils me donnent chaque jour, et qui m'ont guidé tout au long de l'écriture de ce livre.