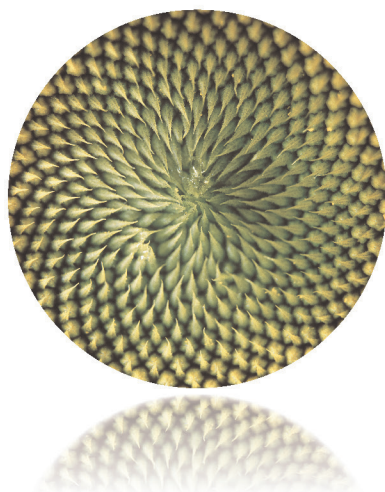


JEAN AUDOUZE, GEORGES CHAPOUTHIER
DENIS LAMING & PIERRE-YVES OUDEYER

Mondes mosaïques

Astres, villes,
vivant et robots



CNRS EDITIONS

Présentation de l'éditeur

JEAN AUDOUZE, GEORGES CHAPOUTHIER
DENIS LAMING & PIERRE-YVES OUDEYER

Mondes mosaïques

Astres, villes,
vivant et robots



2014

Astres, villes, vivant, robots : quatre objets d'études apparemment profondément différents les uns des autres. Et pourtant, les analogies sont nombreuses. Tous ont un rapport très fort à la simplicité – la Nature, comme les hommes, choisit les procédés les plus simples possibles –, à la symétrie, à la cohérence. Tous sont soumis à l'entropie – le désordre les gagne –, tous ont une complexité qui s'accroît selon une évolution tout à la fois darwinienne – qui conduit, par sélection, à une meilleure adaptation – et en mosaïque – juxtaposition d'entités de même ordre de complexité qui, tout en conservant une autonomie certaine, sont intégrées dans des structures plus vastes, où le tout est supérieur à la partie.

L'architecture des astres, des villes, des robots, est donc éminemment semblable à celle des systèmes les plus complexes qu'il nous soit donné d'appréhender : les organismes vivants. Dire que la complexité du vivant mime celle du monde matériel revient à constater que le cerveau, construit sur les mêmes bases que le reste de l'Univers, peut intégrer les lois du monde, et ainsi créer des villes ou de l'intelligence artificielle fondées sur ces mêmes lois.

Un dialogue entre quatre disciplines en apparence étrangères les unes aux autres, riche d'enseignements et propre à susciter les questionnements et les débats.

Jean Audouze est astrophysicien, Georges Chapouthier biologiste et philosophe, Denis Laming architecte, et Pierre-Yves Oudeyer spécialiste de l'intelligence artificielle.

Mondes mosaïques

Astres, villes, vivant et robots

Jean Audouze, Georges Chapouthier,
Denis Laming et Pierre-Yves Oudeyer

Mondes mosaïques

Astres, villes, vivant et robots

CNRS ÉDITIONS

15, rue Malebranche – 75005 Paris

Collection « Le Banquet scientifique »
dirigée par Jean Audouze

© CNRS Éditions, Paris, 2015

ISBN : 978-2-271-08858-1

ISSN : 2109-8638

Sommaire

Sommaire	5
Avant-propos	9
L'Univers	15
Nos moyens de scruter l'Univers progressent de façon très rapide.....	16
L'Univers est « structuré » – La structure en mosaïque....	30
L'Univers et l'ensemble de ses composantes évoluent avec le temps.....	45
L'évolution darwinienne, symétrique et esthétique de l'Univers, « mortel » comme le reste.....	55
Les relations subtiles entre l'Univers, l'Animal, la Machine et la Ville	56
La Ville	59
Naissance, croissance et mort de la Ville	61
Naissance d'une ville du temps des Romains, naissance de la complexité	72
L'étymologie révèle la pluralité des raisons qui ont poussé l'homme à se regrouper	73
Apparition de la brique	74
La maison et le monument.....	76
Rythme d'une ville et moment esthétique.....	77
La complexité et le sacré.....	78
Ville ancienne, ville circulaire.....	80
Développement de la Ville en accéléré : du compliqué au complexe.....	83
La Tour de Babel, mythe d'une actualité inouïe	89
Densité, proximité, promiscuité, densité réelle et densité perçue.....	91

Mixité des fonctions, mixité des formes, mixité sociale..	92
L'arbre et la forêt.....	92
Intuition trompeuse et densité.....	94
Densité et unité.....	96
Le simple, le compliqué et le complexe.....	97
Conception architecturale et complexité.....	98
Le lien plus fort que l'objet.....	99
Aération de la cité.....	100
Efficacité, efficience et résilience.....	101
Deux logiques de conception des cités : euclidienne ou fractale.....	104
La ville éclatée.....	104
Analyse fractale.....	105
Densité et mixité.....	109
Taille optimale d'un quartier.....	110
Complexité croissante et émergence du « néo-futurisme »	112
La « ville creuse » et la comédie humaine.....	116
Les règlements d'urbanisme.....	117
Haute qualité environnementale et bâtiments publics.....	117
SimCity et autres jeux.....	119
Les villes en compétition mondiale.....	121
De la ville numérique à la ville intelligente.....	122
Conclusion.....	125
Architecture de la complexité chez les animaux.....	129
Qu'est-ce qu'un animal ?.....	129
Les étages du monde vivant.....	132
Diversité et complexité.....	133
Le modèle de la mosaïque.....	135
Des cellules vivantes aux populations.....	137
Du cerveau à la pensée.....	138
Mosaïques cérébrales.....	140
Douleur et épilepsie.....	143
Mosaïques de la pensée : les mémoires.....	145

La conscience.....	149
Le langage.....	151
La reproduction asexuée et la non-séparation des unités de la mosaïque.....	154
Un trait essentiel du vivant : l'évolution.....	155
L'œuvre de Richard E. Michod.....	158
L'évolution de la pensée.....	160
Et l'être humain dans tout cela ?.....	161
L'architecture de la complexité du vivant.....	164
Le destin des êtres vivants.....	166
Déterminisme et autonomie.....	169
Quand les machines créent leur propre complexité.....	171
Matière et vivant : des mosaïques sans artisan.....	172
Les machines de Conway : le jeu de la vie.....	178
Les robots, mosaïques incarnées en mouvement.....	180
Marcher plus vite que son cerveau.....	183
Le comportement comme une mosaïque auto-organisée.....	187
Curiosité artificielle et développement cognitif chez les robots.....	191
L'origine des langues : une mosaïque culturelle ?.....	198
L'évolution des machines : des organes aux organismes artificiels.....	204
En guise de conclusion.....	209
Les auteurs.....	213

Avant-propos

Depuis toujours, l'homme a été frappé par la complexité et la diversité des êtres et des choses qui peuplent son environnement. Complexité et diversité du ciel étoilé au-dessus de sa tête. Complexité et diversité des êtres vivants qui peuplent avec lui la terre et avec lesquels il a entretenu, au cours de son histoire, des rapports de coopération ou de lutte. Complexité croissante de ses habitats et de ses villes, ainsi que des machines qu'il conçoit et construit. De ce point de vue, on constate depuis cinquante ans un essor sans précédent des prouesses techniques des scientifiques et des ingénieurs qui bénéficient comme tout l'ensemble des activités humaines des progrès de l'informatique et de l'accès aux nouvelles technologies de l'information et de la communication (sites internet, réseaux sociaux, messagerie électronique...).

Doué d'un puissant cerveau, capable de transmettre aux générations successives, de manière cumulative, le bénéfice de ses connaissances, l'être humain a pu interpréter, par sa science, certaines organisations de l'environnement où il vit. À partir de ce savoir scientifique, il a été capable de construire des instruments et des outils, souvent complexes et diversifiés. Parmi ces productions humaines, nous avons retenu ici deux exemples où complexité et diversité prennent une grande ampleur : l'urbanisme et la robotique.

Nous voici donc confrontés à quatre grands domaines – l'Univers, l'être vivant, la ville et la machine – où s'expriment, de manière manifeste, les articulations de la complexité. Peut-on analyser ces quatre domaines de manière relativement aisée, trouver, presque paradoxalement, dans leur complexité apparente des bases plus simples, ramener leur extrême diversité à de grands principes généraux ? Et jusqu'où va la complexité

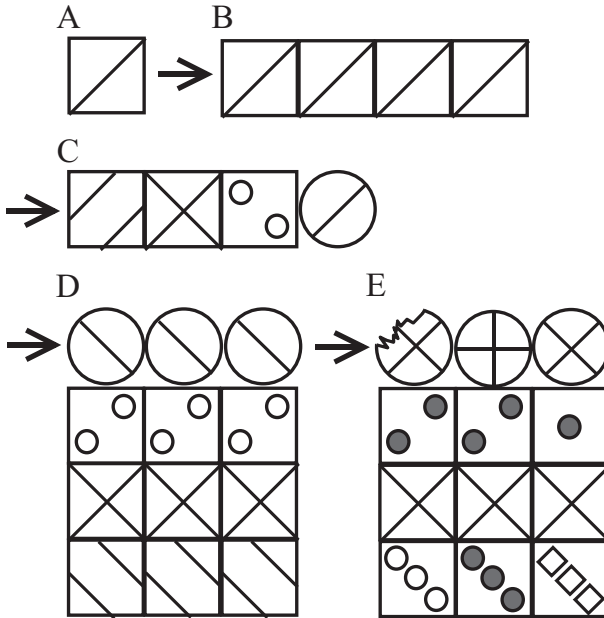
dans les artefacts – robots ou villes – créés par les humains ? Les robots peuvent-ils atteindre une complexité qui leur est propre, agir d'une manière que l'on n'a pas programmée ? Les villes, qui sont très souvent des palimpsestes sur lesquels différentes générations ont laissé leurs empreintes, sont-elles susceptibles de progrès à une époque où la migration des populations vers les mégapoles semble inexorable ?

Ce sont quelques-uns des thèmes qui ont guidé l'écriture de ce livre, où un astrophysicien, un biologiste, un roboticien et un architecte viennent confronter leurs points de vue.

L'un des points de départ de ces réflexions a été l'analyse de Georges Chapouthier, de la complexité des êtres vivants en termes de « mosaïques ». Dans l'émergence de la complexité des organismes vivants, deux grands principes semblent intervenir de manière répétitive : la « juxtaposition » d'éléments de même nature, puis leur « intégration » dans des ensembles plus complexes, dont ils constituent alors des parties. Par « éléments de même nature », il faut entendre des éléments du même degré de complexité, comme des cellules pour constituer un tissu de l'organisme ou comme des organismes pour constituer une population ou une société. Une interprétation schématique de l'application de ces principes deux fois de suite est proposée dans la figure ci-contre.

Georges Chapouthier¹ a proposé, pour ces ensembles, le terme de « mosaïques ». En art, une mosaïque est un ensemble qui intègre de petits éléments, les « tesselles », qui conservent leurs caractéristiques individuelles de forme ou de couleur. L'idée est que, dans les « mosaïques du vivant », le « tout » constitué par chaque étage (cellule, organe, organisme, population...) laisse une large autonomie de fonctionnement à ses parties. La même construction « en mosaïque » a pu être pro-

1. G. Chapouthier, *L'homme, ce singe en mosaïque*, Odile Jacob, Paris, 2001.



La juxtaposition d'éléments (A) donne un ensemble (B), où les éléments n'interagissent pas les uns avec les autres (B). L'intégration conduit ensuite à un ensemble plus complexe (C), où les éléments interagissent les uns avec les autres, tout en conservant une certaine autonomie (« mosaïque »). On peut ensuite, à nouveau, juxtaposer des ensembles (C) pour constituer les ensembles (D), puis les intégrer jusqu'à obtenir les ensembles (E). Adaptée d'après G. Chapouthier, *L'homme, ce singe en mosaïque*, Odile Jacob, Paris, 2001.

posée par la linguiste Stéphane Robert² pour la complexité du langage, où l'énoncé d'une phrase, issu de la juxtaposition d'éléments sémantiques (les mots), intègre finalement un sens global, tout en laissant une autonomie de signification aux mots qui la composent.

2. S. Robert, G. Chapouthier, «La mosaïque du langage», *Marges linguistiques* (revue online), 2006, 11, pp. 153-159, <http://www.revuetexto.net/Archives/Archives.html>

Cette vision de la « complexité en mosaïque », issue du vivant, compatible avec l'évolution darwinienne, mais qui propose, au-delà de la sélection naturelle, des principes généraux de cheminement vers la complexité et la diversité, peut-elle trouver une utilisation plus générale ? Peut-on, dans l'esprit d'Aristote, concevoir que les schémas qui sous-tendent le vivant puissent aussi s'appliquer à l'évolution du cosmos ? Le cosmos subit-il une évolution de caractère darwinien ? Peut-on imaginer que dans les productions technologiques de l'homme, comme la robotique ou l'architecture, se développe la même logique en mosaïque que celle qui préside au fonctionnement des organismes mais qu'on retrouve aussi dans les règles du langage ? Comme on le constatera à la lecture des pages qui suivent, ces types d'organisation et d'évolution affectent tout à la fois l'Univers, le Vivant, la Ville et la Machine : chacun d'entre eux a une histoire marquée par un début ou une naissance, une évolution lente ou rapide et une fin à plus ou moins brève échéance. Par ailleurs les lois de la thermodynamique qui prescrivent que le désordre augmente au cours du temps s'appliquent également à l'Univers, au vivant, à la ville et aux machines. Cependant, en ce qui concerne L'Univers, cette détérioration prend effet sur le très long terme et, dans le cas du vivant, de la ville et des machines, c'est-à-dire des sous-systèmes notamment dissipatifs, beaucoup d'ordre spontané prend naissance à des échelles moindres et, par conséquent, l'entropie diminue localement : c'est peut-être là une des constatations les plus extraordinaires qui rassemblent l'Univers, le vivant, les machines et les villes, qui, avant de mourir, donnent lieu à la formation de structures fascinantes.

L'occasion nous a été donné ici de montrer l'importance du temps et de l'espace dans ces quatre domaines : dans un livre en tous points remarquable paru en 1999 et dont le titre est *La sculpture du vivant : le suicide cellulaire ou la mort créatrice*, Jean-Claude Ameisen démontre que l'évolution d'une cellule vivante dépend de sa localisation : une même cellule pourra

durer longtemps en un point déterminé et, au contraire, mourir rapidement si elle se transporte ailleurs. Les concepts de symétrie (ou d'asymétrie) et de géométrie jouent un rôle essentiel non seulement dans la structuration de ces quatre entités, mais également dans leur évolution.

Ce sont ces réflexions qui, dans l'analyse détaillée des quatre grands domaines évoqués, constituent la trame de cet ouvrage. Nous espérons que sa lecture offrira de nouvelles manières de concevoir la complexité du monde auquel nous appartenons et que nous modelons en partie par l'émergence des villes et la production des machines.

L'Univers

Jean Audouze

Qu'y a-t-il de commun entre l'Univers, l'animal, la machine et la ville? À priori pas grand-chose si l'on prend en considération les différences d'échelle ou encore le fait que l'on cherche à rapprocher deux concepts « naturels », l'Univers et l'animal, à deux types de « constructions » humaines. Le propos de cet ouvrage et de chacun des chapitres consacrés à l'un de ses termes, en l'occurrence ici à l'Univers, est de démontrer le contraire et que des constatations identiques ou analogues peuvent s'appliquer à chacun d'eux.

Je vais donc m'attacher à démontrer les propositions suivantes qui nous paraissent s'appliquer non seulement à l'Univers, mais également à l'animal, à la machine et à la ville :

1. Notre appréhension de ces différentes entités a progressé de façon considérable au cours du temps et notamment au cours des dernières années. Les quatre termes deviennent de plus en plus complexes en même temps que nos analyses deviennent plus performantes.

2. L'Univers est constitué de structures emboîtées : l'on peut évoquer la mosaïque, faite d'éléments distincts qui se juxtaposent, mais qui ne s'explique pas en faisant simplement la somme des dits éléments.

3. L'Univers évolue au cours du temps.

4. Pour chacune de ces catégories, l'évolution est « darwinienne » : l'Univers « s'adapte », et seules vont subsister les structures les plus « robustes ». Maupertuis (1698-1759) édicta en physique le principe de « moindre action » qui constitue l'un

des fondements de la mécanique moderne : l'Univers recherche l'équilibre et des situations « stables », même s'il est en mouvement et en évolution permanents.

5. Je suis personnellement frappé de constater que ce qui est le mieux « réussi » dans ces quatre domaines est aussi ce qui est le plus harmonieux et le plus symétrique.

6. Ces quatre entités subissent les lois de la thermodynamique qui est une façon compliquée de parler du changement et de son sens. L'entropie (le désordre) augmente ; elles se « détériorent » ; elles vieillissent ; elles sont « mortelles ».

NOS MOYENS DE SCRUTER L'UNIVERS PROGRESSED DE FAÇON TRÈS RAPIDE

Le concept d'Univers a évolué dans le temps au gré des développements instrumentaux qui ont rendu nos capacités d'observation plus performantes. Jusqu'à l'avènement de la lunette astronomique en 1609¹, grâce à G. Galilée (1564-1642) qui braqua cette année-là pour la première fois cet instrument vers le ciel, l'Univers se limitait pratiquement à la Terre et la Lune, au Soleil et à cinq planètes, évoluant à l'intérieur d'une sphère constellée de quelques milliers de points lumineux, les étoiles visibles à l'œil nu. Un important changement de perspective fut apporté par N. Copernic (1473-1543) qui fit passer le centre de l'Univers de la Terre au Soleil. Durant le XVII^e siècle, I. Newton (1642-1727) et N. Cassegrain (1625-1712) inventèrent le principe du télescope où un miroir concave vient remplacer la lentille convexe objective de la lunette. De plus J. Kepler (1571-1630) découvrit au début de

1. C'est pour marquer le 40^e anniversaire de cette entrée de l'astronomie dans l'ère instrumentale que l'Union astronomique internationale et l'Unesco convinquirent les Nations unies de déclarer que 2009 serait l'Année mondiale de l'Astronomie.

ce siècle les lois régissant le mouvement des planètes autour du Soleil, découverte mise à profit ultérieurement par Newton qui établit sa théorie de la gravitation universelle en constatant que ces mouvements et la chute des corps procédaient d'un seul et même phénomène.

Au XVIII^e siècle, W. Herschel (1738-1822), qui mit en évidence l'existence de la planète Uranus, et le philosophe Kant (1724-1804), qui s'intéressa à l'astronomie au cours de sa jeunesse, conçurent la notion de galaxies qu'ils appelèrent « univers-îles » et qu'ils imaginaient à l'extérieur du voisinage du Soleil. Il faut attendre le début du XX^e siècle et l'astronome américain H. Shapley (1885-1972) pour que soit mise en évidence, en 1914, la forme de notre Voie Lactée et démontré que le centre de cette dernière se trouve à une distance de 30 000 années-lumière dans la direction du Sagittaire. E. Hubble (1889-1953), qui travaillait à l'Observatoire du mont Wilson, au nord de Los Angeles, et ses collègues, démontrèrent l'existence de nombreuses galaxies autour de la nôtre. Hubble et M. Humason (1891-1972) prouvèrent en 1929 l'expansion de l'Univers observable à partir de la détermination de la vitesse de fuite des galaxies lointaines qui s'avère proportionnelle à leur distance par rapport à nous.

Il en est donc de l'Univers dans son ensemble comme de l'animal, de la machine et de la ville : nos connaissances à son sujet ont fortement progressé très récemment pour les raisons suivantes :

1. Les lunettes astronomiques, et surtout les télescopes, ont « grandi », et plus la surface collectrice du télescope est importante, plus il est sensible à des rayonnements de plus en plus faibles. Alors que le diamètre du télescope du mont Wilson au début du XX^e siècle était de 2 mètres, les télescopes Keck de l'université de Californie et du Caltech ont 10 mètres de diamètre cent ans plus tard. L'Europe et les États-Unis se préparent à construire des télescopes de 30 à 100 mètres de diamètre qui seront opérationnels dans environ une trentaine d'années.

2. Le domaine de visibilité de nos yeux et des télescopes optiques est étroit : la lumière bleue-violette a une longueur d'onde² de $0,4 \mu$; la lumière rouge, une longueur d'onde de $0,8 \mu$. Notre œil est particulièrement sensible à la longueur d'onde du jaune ($0,55 \mu$) ; ce qui fait dire à Michel Cassé qu'il a été conçu pour contempler le Soleil dont la majorité de la lumière est émise dans cette couleur. La lumière visible ne représente donc qu'une faible portion de ce que l'on appelle le spectre électromagnétique – le mot spectre désignant l'étendue en longueurs d'onde différentes d'un ensemble de rayonnements. De plus, on sait, depuis l'élaboration par J. Maxwell (1831-1879) des équations qui caractérisent et unifient les phénomènes électriques et magnétiques, que la lumière est de même nature que le déplacement des charges électriques ou magnétiques. Il existe donc des rayonnements plus énergétiques et donc d'une longueur d'onde plus faible que celles de la lumière visible : c'est le cas de l'ultraviolet, du rayonnement X et de ce que l'on appelle le rayonnement gamma (émis par exemple lors de la désintégration de certains éléments radioactifs), encore plus énergétique que le rayonnement X. Du côté des rayonnements faiblement énergétiques, on trouve l'infrarouge (que chacun de nous émet, d'où l'utilité des caméras infrarouge), les ondes micrométriques (émises par exemple dans les fours à micro-ondes de nos cuisines), les ondes millimétriques, enfin les ondes radio rendues visibles depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale grâce à la construction de nombreux radiotélescopes qui marquent l'avènement de la radioastronomie, à laquelle on doit, entre autres, la découverte des quasars³, des

2. La lumière peut être considérée à la fois comme un jet de particules (les photons) et comme un phénomène ondulatoire. La longueur d'onde est la distance qui sépare deux maxima ou deux minima de cette onde. Sa fréquence est le nombre d'oscillations perçues par seconde.

3. Les quasars sont connus depuis le début des années 1960. Un quasar (acronyme de « *quasi stellar object* » – objet quasi-stellaire) est un noyau de

Les auteurs

Jean Audouze est astrophysicien, directeur de recherche émérite au CNRS et directeur de la collection «Le Banquet Scientifique» à CNRS Éditions.

Georges Chapouthier est biologiste et philosophe et directeur de recherche émérite au CNRS. Il est spécialiste de l'animal auquel il consacre de nombreux ouvrages.

Denis Laming est architecte de réputation internationale (concepteur du Futuroscope et de nombreux grands équipements en France et à l'étranger). Il est le promoteur du mouvement «néofuturiste» en architecture.

Pierre-Yves Oudeyer est directeur de recherche à l'Inria et spécialiste reconnu au plan national et international en robotique et intelligence artificielle.

