

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur : ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite de ce travail expose à des poursuites pénales.

Contact : portail-publi@ut-capitole.fr

LIENS

Code la Propriété Intellectuelle – Articles L. 122-4 et L. 335-1 à L. 335-10

Loi n° 92-597 du 1^{er} juillet 1992, publiée au *Journal Officiel* du 2 juillet 1992

<http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg-droi.php>

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse 1 Capitole

Présentée et soutenue par
Thomas BRETON

Le 9 mai 2019

**Essai sur une complémentarité art-sciences : "seconde
interactivité", de la déconstruction à l'évolution.**

Ecole doctorale : **EDMITT - Ecole Doctorale Mathématiques, Informatique et
Télécommunications de Toulouse**

Spécialité : **Informatique**

Unité de recherche :

IRIT : Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

Thèse dirigée par
Yves DUTHEN

Jury

M. Stéphane DONCIEUX, Rapporteur

Mme Chu-Yin CHEN, Rapporteur

M. Don FORESTA, Examineur

Mme Myriam DESAINTE-CATHERINE, Examinatrice

M. Hervé LUGA, Examineur

M. Yves DUTHEN, Directeur de thèse

Abstract

This manuscript presents, in a duality form, a progression of Art and Sciences, in a historically, conceptually, and practical standpoint as well. From a theoretical thought, a second interactivity artwork has been created: *Mélancolie des étoiles*, in cooperation with Edwige Armand, PhD graduate in art, who is the originator of the piece. Its implementation requires the use and development of computer tools as well as their sharing. But, in the aim to maintain consistency, all that is purely technical is relayed in annexes.

A part is devoted to the connection between Arts and Sciences, as a parallel to a particular worldview. In a historically then conceptually standpoint, from paradigmatic changes (Thomas Samuel Kuhn [111]) up to the transition from the first to the second cybernetics, initiated by Heinz von Foerster [86, 87] and developed by Edgar Morin [131, 135], in relation with the necessary evolution towards complex thought. It focuses on the evolution of both scientific and philosophical concepts of which a model can be shared by a whole community before becoming definitely obsolete, like determinism.

A second one presents the digital work developed in this project. Starting from the idea of language deconstruction (Jacques Derrida [64, 65]), especially the opposition of language to reality (Henri Bergson [19, 23]), this part develops the progression that led to the work *Mélancolie des étoiles*. The voice of the audience, broken down into phonemes, is represented by colored touches in the role of cells. They have to learn to survive while being faced with conflicting goals. The scientific implications are presented, exposing its implementation at the level of speech recognition, image synthesis, massively parallel programming and artificial life.

The conclusion comes back to cybernetics by a connection with artificial life and second interactivity artworks (in the meaning of Edmond Couchot [55, 56]) with the emergence of complexity. It questions the issues of both scientific and artistic practices, from some idea of progress, research or education (Paul Feyerabend [79, 83]). And more generally what methods and practices generate as ethical responsibility.

Résumé

Ce manuscrit expose, sous forme de dualité, un cheminement de l'art et des sciences, autant historiquement, conceptuellement, que d'un point de vue pratique. Autour d'une réflexion théorique, est développée une œuvre de la seconde interactivité, *Mélancolie des étoiles*, en coécriture avec Edwige Armand, artiste plasticienne docteure en art et dont elle en est l'initiatrice. Sa mise en place a nécessité l'emploi et le développement d'outils informatiques, ainsi que leur mise en commun. Mais, pour conserver une cohérence au propos, tout ce qui est d'ordre purement technique a été relayé en annexes.

Une partie est consacrée au rapport des arts et des sciences, comme un parallèle à une certaine vision du monde. D'un point de vue historique puis conceptuel, des changements paradigmatiques (Thomas Kuhn [111]) jusqu'au passage de la première à la seconde cybernétique, initiée par Heinz von Foerster [84, 87] et développée par Edgar Morin [131, 135], en rapport avec la nécessaire évolution vers la pensée complexe. Elle s'attache à l'évolution des concepts tant scientifiques que philosophiques dont un modèle peut être partagé par toute une communauté avant de devenir définitivement caduque, à l'instar du déterminisme.

Une deuxième présente l'œuvre numérique développée dans ce projet. Partant de l'idée de déconstruction du langage (Jacques Derrida [64, 68]), et plus particulièrement de l'opposition du langage à la réalité (Henri Bergson [19, 23]), cette partie développe le cheminement qui a amené à la pièce *Mélancolie des étoiles*. La voix des spectateurs, décomposée en phonèmes, est matérialisée par des touches colorées ayant le rôle de cellules. Elles devront apprendre à survivre, tout en étant confrontées à des buts antagonistes. Les implications scientifiques y sont présentées, exposant sa mise en œuvre aussi bien au niveau de la reconnaissance vocale, de la synthèse d'images, de la programmation massivement parallèle que de la vie artificielle.

La conclusion revient sur les cybernétiques par un rapprochement avec la vie artificielle et les œuvres de la seconde interactivité (au sens d'Edmond Couchot [55, 56]) avec l'émergence de la complexité. Elle s'interroge sur les problèmes liés aux pratiques aussi bien scientifiques qu'artistiques, d'un point de vue d'une certaine idée de progrès, de la recherche ou de l'éducation (Paul Feyerabend [79, 83]). Et plus généralement ce que méthodes et pratiques engendrent en tant que responsabilité éthique.

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier l'école doctorale EDMITT, l'IRIT et l'Université Toulouse 1 Capitole de m'avoir accueilli durant toutes ces années. Mes pensées vont aussi vers l'ensemble du personnel qui a su me tirer d'affaire dans le dédale administratif avec ses embranchements et bifurcations.

Merci à Chu-Yin Chen et Stéphane Doncieux d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse, et surtout pour leurs remarques et retours. Merci aussi à tous ceux qui ont pris le temps de me lire, bien plus nombreux que je n'aurais pu le penser. Un merci tout particulier à feu Jean-Paul Confais, linguiste, pour son intérêt et son soutien.

Ce travail n'aurait pu voir le jour sans Edwige Armand que je ne saurais assez remercier. Premièrement pour nos discussions et enfin pour sa confiance malgré des débuts pour le moins chaotiques et sinueux. Merci encore pour Henri Bergson, Jean-Marie Schaeffer et Jacques Derrida, qui m'ont amené à bien d'autres lectures et questionnements. Merci alors à Yves Duthen, mon directeur de thèse, d'avoir accepté ce changement de cap et la prise de risque qu'apportait ce sujet. Ce qui est remarquable, c'est d'avoir été témoin de son intérêt grandissant autour de cette thématique où Edwige Armand, Chu-Yin Chen, Don Foresta et Thierry Besche, pour ne citer qu'eux, ont joué un grand rôle dans cet engagement.

Merci à mes collègues, anciens et nouveaux, pour la bonne ambiance qui a perduré ces nombreuses années. En particulier à Paul, rare personne que je croisais systématiquement à l'université le samedi, quand j'y allais, à une certaine époque. Merci à toi pour ton soutien depuis les premières heures et au plaisir de libations à venir. Merci aussi à ceux qui m'ont soutenu et aidé, la liste serait longue, mais je tiens tout de même à le faire pour Бабушка, Paul, Edwige, Gérard, Amina, Jean-Claude, Antoine, Anthony, Raphaël, John, Caroline, Audren, Bernard, Alexis et Mado qui ont eut à affronter mes maudits escaliers. Merci aussi à Romain et Romain pour la finesse de leur goût dans leur spécialité respective.

Merci aussi à tous mes proches que je n'ai que trop peu pu voir ces dernières années, en particulier Manue, Maja, Marie, Marcellin, Wapeto, Bastien, Phi, Claire. Merci aussi

à ceux qui sont venus et à ceux qui se sont excusés de ne pouvoir le faire. Juliette, Hugo, Manu, Nath, Nicolas, Angela, David, Sylvain, votre soutien m'a été précieux.

Enfin un remerciement quelque peu particulier à tous les médecins de différentes spécialités, chirurgiens, kinés, merci Karine, infirmiers, merci Virginie, et personnel médical qui ont dû m'accompagner à de si nombreuses reprises.

Pour terminer j'aimerais remercier tous ceux qui font avancer la réflexion, aux artistes qui s'engagent, aux scientifiques qui prennent le recul salutaire qui seul permet d'échapper aux ornières, aux penseurs qui s'investissent entièrement à leur tâche. En un mot à ceux qui nous révèlent que tout ce que nous croyons n'est pas, tout en nous rappelant notre responsabilité.

Table des matières

Introduction	3
I Art et Sciences, un partage de l'Histoire	5
1 Première période	7
1.1 Preamble	7
1.2 Origine	9
1.3 Renaissance	13
1.4 XVII ^{ème} , le grand siècle	21
2 Seconde période	27
2.1 XVIII ^{ème} , le siècle des lumières	27
2.2 XIX ^{ème} siècle et Révolutions	31
2.3 Époque contemporaine	42
2.4 Ère numérique	53
3 Art, Science, parallèle ou réflexivité ?	61
3.1 Science et "vérité"	61

3.2	Science et intentionnalités	68
3.3	Art et intentionnalités	73
II	Mélancolie des étoiles	79
4	Motivations	81
4.1	Contexte	81
4.2	La langue et les mots	83
4.3	Le réel et la réalité	87
5	Implémentation	91
5.1	Des phonèmes aux virus	91
5.2	Interactivité	94
6	De la parole aux phonèmes	99
6.1	Contexte	100
6.2	Les phonèmes du français	102
6.3	CMU Sphinx	104
7	Représentation des cellules	107
7.1	Triangulation automatique	108
7.2	Déformations de Bézier	110
7.3	Mutation As Rigid As Possible	113
7.4	Reproduction	114

7.5	Rendu	117
8	Évolution et comportement	119
8.1	Comportement	119
8.2	Virus et antagonismes	120
8.3	Vie et mort	121
8.4	Expérimentation	122
	Conclusion	
	Vie artificielle et art numérique	131
	Du simple au complexe	131
	Cybernétiques	131
	Du déterminisme à l'indétermination	134
	Complexification	139
	Conclusion	147
A	Mélancolie des étoiles	155
A.1	Schéma de fonctionnement	156
A.1.1	Prise en charge de la reconnaissance vocale	158
A.1.2	Déroulement du programme	159
B	As Rigid As Possible	161
C	Optimisation des déformations de Bézier sur GPU	165

Table des figures

1.1	Vénus de Hohle Fels (Allemagne), datant de plus de 35 000 ans	10
1.2	Lorenzo Ghiberti : La porte du paradis (1425 - 1452)	14
1.3	Jean Fouquet : Charité Saint Martin (1452 - 1460)	16
1.4	Raphaël : L'école d'Athènes (1509)	17
1.5	Leonardo da Vinci et ses machines volantes	18
1.6	Johannes Vermeer : L'art de la peinture (1665-1666)	24
2.1	Jean-Honoré Fragonard : Le verrou (1774-1778)	28
2.2	Jean-Siméon Chardin : La bulle de savon (1734)	29
2.3	Francisco de Goya : Saturne dévorant un de ses fils (1823)	33
2.4	Eugène Delacroix : Les scènes des Massacres de Scio (1824)	34
2.5	Jean-Auguste-Dominique Ingres : Odalisque à l'esclave (1842)	36
2.6	Édouard Manet : Le déjeuner sur l'herbe (1863)	38
2.7	Claude Monet : La grenouillère (1869)	39
2.8	Pablo Picasso : portrait d'Ambroise Vollard (1910)	46
2.9	Marcel Duchamp : Nu descendant un escalier n° 2 (1912)	48

2.10	Max Ernst : La Vierge corrigeant l'enfant Jésus devant trois témoins : André Breton, Paul Éluard et le peintre (1926)	50
2.11	Arman : Long Term Parking (1982)	55
2.12	Nicolas Schöffer : Tour cybernétique (1956)	56
2.13	Edmond Couchot et Michel Bret : Les pissenlits (1988-2005)	57
3.1	Les Shadoks : "À nos hardis marins perdus dans le cosmos." (1968)	64
3.2	Paul Cézanne : Mont Sainte-Victoire (1887)	75
5.1	Touches colorées	93
5.2	Touches colorées infectées	93
5.3	Touches colorées en apoptose	94
5.4	Edwige Armand, Thomas Breton : <i>Mélancolie des étoiles</i> , 2017	97
6.1	Les voyelles du français, classées selon les deux premiers formants	102
6.2	Zones de dispersion des voyelles non nasales du français selon le plan F1/F2 (échelle de Bark).	103
7.1	Exemples de triangulation automatique	109
7.2	Courbe de Bézier à quatre points de contrôle	110
7.3	Surface de Bézier bicubique	111
7.4	Extrait de courbe sinusoïdale paramétrique	112
7.5	Reproduction d'une cellule souche	116
8.1	Expérimentation sans apprentissage.	123
8.2	Expérimentation sans apprentissage préalable, trois heures après.	124

8.3	Expérimentation sans apprentissage préalable, quatre heures après.	125
8.4	Expérimentation avec apprentissage préalable.	126
8.5	Expérimentation avec apprentissage préalable, pics.	127
8.6	Thomas Breton <i>et al.</i> : <i>Fire Spread</i> , logiciel de simulation de propagation de feu dans le quartier des Carmes à Toulouse (2009)	136
8.7	Chu-Yin Chen : <i>Light Alive in situ</i> , 2007	137
8.8	P. Prusinkiewicz, J. Hanan : <i>A three-dimensional rendering of the Mycelis models</i>	138
8.9	Robot modulaire virtuel de huit entités et courbes de progression suivant les générations.	140
8.10	Michel Bret, Marie-Hélène Tramus : <i>La funambule virtuelle</i> , 2002	142
8.11	Michel Bret, Marie-Hélène Tramus : <i>Danse avec moi</i> , 2002-2006	143
8.12	Chu-Yin Chen : <i>Vita-Morph</i> , 2009	144
A.1	Installation de <i>Mélancolie des étoiles</i> à la Nuit des chercheurs à Albi (2017)	156
A.2	Schéma de fonctionnement de <i>Mélancolie des étoiles</i>	157
A.3	Algorithme simplifié de la reconnaissance vocale.	158
B.1	Exemples de déformations par VARMIN, RBF, GRAD, ROTINV et PRIMO	162
B.2	Calcul des poids $w_{i,j} = w_{j,i} = \frac{1}{2}(\cot(\alpha_{i,j}) + \cot(\beta_{i,j}))$	163
B.3	Déformation ARAP initiale, après une itération et quatre itérations	164
C.1	Temps de calcul moyen sur CPU et GPU en fonction du nombre de cellules.	166

Avant-propos

À défaut de se cloisonner à une discipline spécifique, ce travail est le fruit de rencontres, discussions, et se caractérise par la création d'une œuvre en commun avec une artiste plasticienne, Edwige Armand, docteure en art. Loin de fractionner chaque domaine, c'est dans l'échange et la communication qu'a pu évoluer cette pièce, mouvante, changeant au fil du temps. Si de plus en plus de conférences tentent de lier ces deux disciplines, que de plus en plus de liens se tissent entre laboratoires de recherche, plus particulièrement entre arts, sciences et informatique, l'idée première de la pièce revient à Edwige Armand qui, me faisant prendre conscience que "l'art [...] est une urgence sociale"¹, est parvenue à replacer l'art dans son actualité.

Comme le rappelle Don Foresta, "l'Art et la Science sont les deux outils perceptuels complémentaires pour comprendre notre monde"². Plutôt que d'opposer ces deux domaines de recherche, il est ici question d'un cheminement, d'une appréhension où le partage prime sur l'appropriation. La pratique qui en a résulté est le fruit d'échanges plutôt que l'utilisation - l'asservissement - d'un domaine sur un autre, pratique malheureusement courante. À noter aussi que les références renvoient à la bibliographie en fin de manuscrit, mais que certains articles n'y sont pas mentionnés pour ne pas l'alourdir artificiellement. De même, chaque lien à une page Internet a été vérifiée à la date du 15 janvier 2018 qui n'est donc pas mentionnée dans les renvois. Enfin, les dates des références correspondent à celle de leur première édition originale, si elle est connue. Celle-ci pourra être différente pour un même ouvrage, par exemple 1924 pour le premier *Manifeste du surréalisme* et 1930 pour le second.

¹"L'art ne doit pas être réservé à une élite mais est une urgence sociale." Propos tenus pour la défense d'une école de préparation aux Beaux Arts menacée de fermeture.

²"Art and Science form the two complimentary perceptual tools for understanding our world." *In Empathy and the Network*, 2011. [89, p. 29]

*La réalité est une croissance
perpétuelle, une création qui
se poursuit sans fin.*

Henri Bergson

L'évolution créatrice, 1907

Introduction

L'interdisciplinarité est une pratique qui tend à se répandre alors même que les domaines de recherche vont vers une surspécialisation. Il n'en reste pas moins important de préciser que cette conduite est loin d'être anodine, qu'il ne suffit pas seulement d'éprouver un intérêt mais bien d'adopter "d'autres types d'explication et d'autres questionnements³." D'où une première difficulté lorsqu'il s'agit de s'adresser à des spécialistes de domaines différents, à laquelle s'ajoute les pratiques usuelles de chaque partie. Si en informatique une part non négligeable comporte un côté technique, en art l'aspect théorique est primordial. Enfin, pour la quantité même à produire, un manuscrit de thèse ne devant pas dépasser un certain nombre de pages en informatique, de l'ordre de la moitié de ce qui peut être attendu en art.

Ainsi, une grande part de la première partie, relevant d'un caractère historique en art et en science n'aura que peu ou pas d'intérêt pour un spécialiste, mais elle m'a paru nécessaire pour montrer un cheminement et fournir des exemples permettant de contrecarrer certaines idées reçues et autres préjugés dont peuvent faire l'objet aussi bien l'art que la science. De plus, pour prétendre aborder un domaine de recherche aussi distinct du mien qu'est l'art, il me semble important d'avoir, au minimum, quelques bases et repères historiques. Cette approche permettra en outre de montrer que si "les évolutions de l'art et de la science ne sont ni parallèles ni linéaires⁴", les influences mutuelles entre les deux sont essentielles. Le dernier chapitre de cette partie tentera de préciser les apports de l'un et de l'autre autour de notions comme la "vérité" ou l'intentionnalité.

La deuxième partie présente les fondements et les interrogations qui ont mené à la réalisation de *Mélancolie des étoiles*, en commun et à l'initiative d'Edwige Armand. Partant d'une réflexion sur l'opposition entre les mots et la "réalité", du fonctionnement de

³Michel Morange, *À quoi sert l'histoire des sciences ?* 2008. [129, p. 45]

⁴Jean-Pierre Changeux, *Raison et Plaisir*, 2002. [47, p. 145]

l'intelligence humaine et de ses limites, liant "le même au même"⁵, nous avons développé l'idée que ces mots représentent une forme virale. Cela se traduit par la conception d'une pièce où le spectateur, invité à parler, verra ses dires décomposés en phonèmes présentés sous la forme de touches colorées ayant des caractéristiques de cellules artificielles. Les différentes approches qui ont été menées y seront présentées avec les contraintes et les choix opérés afin de permettre d'appréhender le fonctionnement interne de la pièce sans s'appesantir sur les aspects techniques, relayés en annexes.

La dernière partie est avant tout une conclusion générale. Elle reprend le caractère historique de la première pour introduire un parallèle entre la cybernétique et le développement de l'informatique, plus spécialement de la vie artificielle. Elle s'appuie alors sur la notion de complexité, au sens où l'entend Edgar Morin, "*Complexus* signifie ce qui est tissé ensemble"⁶, pour amener à un changement paradigmatique. Elle présente l'opposition apparente entre surspécialisation et interdisciplinarité et revient sur les réflexions qui ont mené à *Mélancolie des étoiles* dans le contexte actuel, celui d'une époque en plein bouleversement.

⁵Henri Bergson, *L'évolution créatrice*, 1907. [23, p. 201]

⁶Edgar Morin, *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*, 1999. [133, p. 17]

Première partie

Art et Sciences, un partage de l'Histoire

*S'il y avait une seule vérité,
on ne pourrait pas faire cent
toiles sur le même thème.*

Pablo Picasso



Première période

1.1 Préambule

S'il est commun de dire que l'art s'applique à représenter et renouveler des visions du monde en s'appuyant sur les sciences, ce rapport n'est pas si trivial et occulte la nature même de ces deux champs exploratoires. D'après Le Petit Robert 2009, l'art serait lié à la "Représentation du Beau", "Expression par les œuvres de l'homme, d'un idéal esthétique ; ensemble des activités humaines créatrices visant à cette expression. (Diderot, 1767)" et la science à l'"Ensemble des connaissances", plus précisément comme "Ensemble des travaux des sciences ; connaissance exacte, universelle et vérifiable exprimée par des lois.(1751)" Outre le caractère très réducteur dans un cas et plus qu'ambitieux dans l'autre, il semblerait que tout oppose ces deux domaines.

Pourtant, l'histoire nous livre des exemples où il serait bien délicat de formaliser des frontières. Ainsi, loin de cette vision purement académique, ancrée dans les institutions, il serait profitable de rappeler les dires de Jean-Marie Schaeffer : "Vouloir réduire l'esthétique à l'artistique n'est qu'une tentative (vouée à l'échec) de nier cette différence

qui fait de l'art une réalité sociale plutôt qu'une activité solipsiste¹." La notion d'art est relative à une époque, une société, une culture. Un même objet pouvant être "considéré" comme de l'art par une population et aucunement par une autre, ou encore changer de statut au fil du temps. En donner une définition globale est une entreprise périlleuse et dépend aussi du point de vue où l'on se place². Qualifier un objet d'artistique est une question ouverte, qui a fait l'objet de nombreuses études de la part de nombreux spécialistes de différents domaines.

Concernant la science, l'exercice est relativement plus abordable en prenant quelques précautions. On peut trouver par exemple celle-ci : "(Depuis le XIX^{ème} siècle) Ensemble des connaissances d'un domaine donné³." Il faudrait néanmoins préciser ce que sous-entend "connaissance", comme "connaissance falsifiable" au sens de Karl Popper⁴ et y ajouter "au moins en termes probabilistes" depuis l'avènement de la théorie quantique. Pour qualifier une proposition de scientifique il faut la replacer à une époque donnée, celle-ci pouvant changer de statut au cours du temps (passer de vraie à fausse, falsifiable ou non, indéterminée ou encore indéterminable). Enfin, et plus important encore, concernant la prétention de la science à comprendre et expliquer la réalité, ce ne peut rien être d'autre qu'un vain espoir⁵. Toute théorie est une conception, une construction de l'esprit, notion qui sera développée au troisième chapitre.

Ce chapitre et le suivant sont consacrés à une description, non exhaustive, d'une part de ce qui est communément considéré comme faisant partie du domaine artistique, et d'autre part à ce qui se rapporte aux sciences, essentiellement aux sciences physiques, et à la mathématique, cette dernière étant historiquement très liée à celles-ci. Le but est d'en retirer de la matière afin de tenter, au quatrième chapitre, d'en dévoiler certains principes et de mettre à mal les nombreux préjugés accolés à ces deux domaines. Le lecteur familier à l'art n'y apprendra sans doute pas grand chose de ce côté, mais pourra suivre, en rapport aux faits marquants de l'histoire, une certaine forme d'évolution. Les autres pourront, je l'espère, y trouver quelque brîbe d'éclaircissement et des références pour la suite.

¹Jean-Marie Schaeffer, *Les célibataires de l'art*, 1996. [166, p. 351]

²Edmond Couchot, *La nature de l'art*, 2012. [55, p. 228, 177-230]

³D'après le dictionnaire philosophique en ligne : <http://dicophilo.fr/definition/science/>

⁴Karl Popper, *Les deux problèmes fondamentaux de la théorie des sciences*, 1999. [150]

⁵Plus encore, la science nous éloigne de la réflexion. Ainsi que Xavier Lambert le relate : "La science n'a pas pour fonction de nous amener à nous interroger sur le réel puisqu'au contraire, elle nous en livre des explications." In Xavier Lambert, *Le corps multiconnexe vers une poïétique de l'oscillation ?* 2010. [113, p. 92]

1.2 Origine

Cette section s'attelle à une tâche démesurée qui serait de décrire les notions d'art et de science et leur proposer une origine, si tant est que ce soit possible. Ce n'est pas son ambition et elle s'attache plutôt à voir, jusqu'au Moyen Âge, comment pouvaient être perçues ces notions.

En grec, le mot art (τέχνη) exprime aussi l'industrie, et par extension métier, profession, ou encore toute espèce d'art, de science ou de connaissance, traité sur un art, sur une science⁶. Ainsi, originellement, les notions d'art et de science sont liées. L'origine latine (*ars*) définit l'habileté, le métier, la connaissance technique et le mot art n'est apparu dans la langue française que depuis le XI^{ème} ou XII^{ème} siècle⁷. Il est donc important de préciser quelle notion on emploie puisqu'il est admis aujourd'hui que certaines œuvres sont considérées comme artistiques alors que ce concept n'avait aucun sens pour leurs créateurs. Aussi, quand bien même il n'est possible d'user que de suppositions concernant la préhistoire, lorsqu'il est question d'art rupestre, il serait plus opportun, plutôt que de dire art, de reprendre l'expression d'Edmond Couchot qui parle d'"inducteurs esthétiques intentionnels"⁸.

En grec, le mot esthétique (αἰσθητική) désigne la faculté de sentir, de percevoir par les sens, dérivé de αἰσθητικός, qui a la faculté de percevoir par les sens, par l'intelligence⁹. Le Petit Robert 2009 nous propose, en tant qu'adjectif, "Relatif au sentiment du beau", conception plus proche de ce qui est communément accepté. Cependant, la qualification d'art, qui est toujours une bonification, ne pourrait se résoudre à une définition formelle, une classification forcément stricte et réductrice. Cette notion a fait l'objet de multiples dissertations au cours des siècles de la part de philosophes et d'historiens sans pour autant aboutir. Cependant, il en ressort qu'il s'agit d'une notion subjective liée à la faculté de jugement. Parler uniquement d'esthétique n'est donc pas suffisant, que penser sinon de l'art conceptuel comme *Fontaine*, l'urinoir de Marcel Duchamp¹⁰? Ou alors redéfinir l'esthétique, ne pas la limiter à un objet mais à une intentionnalité, quelle soit artéfactuelle ou cognitive. Pour reprendre les termes de Jean-Marie Schaeffer, "la valeur d'une œuvre d'art ne saurait être que la valeur instrumentale - esthétique ou autre - qu'elle possède pour le sujet qui la crée ou pour celui qui l'appréhende"¹¹.

⁶C. Alexandre, *Dictiscience Grec-Français*, 1850. [5, p. 1419]

⁷Edmond Couchot, *op. cit.* [55, p. 33]

⁸*Ibid.* [55, p. 55]

⁹C. Alexandre, *op. cit.* [5, p. 39]

¹⁰Marcel Duchamp (1887-1968).

¹¹Jean-Marie Schaeffer, *op. cit.* [166, p. 209]



FIGURE 1.1 : Vénus de Hohle Fels (Allemagne), datant de plus de 35 000 ans

Edmond Couchot nous indique, aux précautions historiques et interprétationnelles près, que l'on trouve la trace de "conduites esthétiques opératoires" il y a environ 75 000 ans¹². On retrouve aussi les premières peintures pariétales il y a 60 000 ans, avec un souci du détail et d'élaboration, "de soucis de la forme", allant grandissant les 30 000 années suivantes. S'il est difficile de donner une interprétation à l'intentionnalité de ces conduites, nous pouvons néanmoins affirmer qu'elles avaient un sens. En témoigne la Vénus de Hohle Fels (Figure 1.1) en ivoire de mammouth, découverte en Allemagne fin 2008 par Nicholas J. Conard¹³. Elle témoigne d'un rapport à la fertilité et a en même temps révolutionné nos croyances sur la confection d'artéfacts dont les archéologues n'avaient trouvé de trace "que" depuis 27 000 ans.

¹²Edmond Couchot, *op. cit.* [55, p.55]

¹³Nicholas J. Conard. *A female figurine from the basal Aurignacian of Hohle Fels Cave in southwestern Germany.* In *Nature*, 459, march 2009. [51, p. 248-252]

À cette époque où il est délicat de parler d'art et de science, il semble que ces notions soient liées. Il s'agit avant tout de technique, de fabrication d'outils, alors qu'aucune science n'est encore formalisée. Avant même la découverte de l'écriture dont l'origine est attribuée aux Mésopotamiens vers 3 500 ou 4 000 ans avant notre ère et dont les tablettes servaient à tenir une comptabilité, l'Homme avait des connaissances scientifiques avancées qui lui ont permis la construction d'édifices comme la pyramide de Khéops, environ mille ans auparavant. Et ce n'est qu'en Grèce antique qu'apparaissent les premières réelles formalisations avec la naissance de la démonstration mathématique. Durant cette période, il est communément admis que les Grecs étaient de piètres calculateurs, alors qu'ils excellaient en géométrie, astronomie et arithmétique. Témoin, Thalès de Milet, au VI^{ème} siècle avant notre ère, puis Leucippe et Démocrite pour leur théorie atomique du monde, abandonnée ensuite pour n'être reprise qu'au début du XIX^{ème} siècle. Ou encore Euclide avec son célèbre ouvrage, *Les éléments*¹⁴, référence en géométrie.

À partir de l'Antiquité, la science est liée à la réflexion philosophique et se confond avec elle. L'art est avant tout représentation du Beau, relativement aux Dieux. En grec, le beau (*καλός*) exprime l'harmonie, ce qui procure du plaisir¹⁵. Pour Platon, outre son pamphlet sur Hippias¹⁶ où la question est sans réponse, le Beau est la science même, plus encore la philosophie : "Commencer par les beautés d'ici-bas, et de s'élever jusqu'à la beauté suprême, [...] aux belles sciences, jusqu'à ce que de science en science on parvienne à la science par excellence, qui n'est autre que la science du beau lui-même, et qu'on finisse par le connaître tel qu'il est en soi¹⁷." Notion importante car à partir de là et durant de nombreux siècles, le beau est considéré comme absolu, et beau "en soi". Aussi, dans le *Phédon*, il indique que "s'il existe quelque chose de beau en dehors du beau en soi, cette chose n'est belle que parce qu'elle participe de ce beau en soi, et je dis qu'il en est de même de toutes choses¹⁸." Et il précise encore dans *Le banquet* : "beauté [...] qui existe éternellement et absolument par elle-même et en elle-même¹⁹." Ou, pour reprendre Edmond Couchot, "dans l'Antiquité, science et art dans leur acception moderne, fondus dans une même quête de la connaissance et de la vérité, ne se distinguent pas : ce qui est beau est vrai, ce qui est vrai est beau²⁰."

À la fin de l'Antiquité et durant tout le Moyen Âge, l'art est essentiellement lié au divin, "contemplation du monde spirituel des essences divines²¹." C'est aussi le moment de la séparation des arts et des sciences, opposition de la subjectivité - la sensibilité - et

¹⁴Euclide, *Les éléments*, vers 300 av. J.-C. [77]

¹⁵C. Alexandre, *op. cit.* [5, p. 726]

¹⁶Platon (-428/427- -348), *Hippias majeur*. [146]

¹⁷Platon, *Le banquet* [144, § 211c-211d]

¹⁸Platon, *Phédon*. [145, § 100c]

¹⁹Platon, *Le banquet* [144, § 211b]

²⁰Edmond Couchot, *op. cit.* [55, p. 272]

²¹Jean-Marie Schaeffer, *op. cit.* [166]

de l'objectivité - la rationalité²² -. Tandis qu'à Alexandrie sont rassemblés et traduits en grec les écrits de l'époque, les "savoirs universels", il semble n'y avoir que peu d'avancées significatives en sciences²³, à l'exception notable de l'invention de la poudre à canon en Asie. En Europe, la science est cloisonnée par l'Église, la copie de manuscrits étant réservée aux moines. Ceux-ci ont relayé la logique d'Aristote (-384- -322), le syllogisme, constitué de deux prémisses et d'une conclusion. Sans n'en rien changer, ils ont toutefois attribué des pré-noms féminins aux propositions valides. En Afrique du nord cependant, l'algèbre a pu se développer avec l'intégration du zéro, rapporté d'Asie. "Mais, aux XII^{ème} et XIII^{ème} siècles, une véritable révolution se produisit, l'Europe vit naître un vaste mouvement intellectuel²⁴." Les traductions de l'algèbre indienne et de la géométrie grecque se répandirent petit à petit de l'Italie vers toute l'Europe. En 1202, Fibonacci écrivit le *Liber Abaci*, "livre qui [...] contribua beaucoup à la diffusion de l'algèbre²⁵." Les premières Universités apparurent, Paris en 1200, Oxford en 1214, et même si la scolastique "empêchait toute recherche intellectuelle vraiment féconde²⁶", elles permirent aux "savants à préciser les notions délicates de limite et d'infini²⁷." Enfin, la cartographie du monde commence à s'étendre avec les voyages de Marco Polo à la fin du XIII^{ème} siècle, prémisse à l'ère des grandes découvertes.

En résumé

Dans l'Antiquité grecque, philosophie, art et science sont liés. Le Beau est par nature intrinsèque à l'œuvre selon Platon. Il ne se distingue pas du Bien, du Vrai, il est Harmonie. D'un côté l'Inde a développé le calcul, de l'autre la Grèce a façonné la démonstration mathématique. Enfin, l'algèbre et la géométrie commencent à être diffusées, promettant un nouvel essor pour la mathématique.

²²Edmond Couchot, *op. cit.* [55, p. 266]

²³Néanmoins, il est à noter des progrès techniques dans de nombreux domaines, comme en agriculture par exemple, principalement en Chine.

²⁴René Taton, *Histoire du calcul*, 1961. [177, p. 21]

²⁵*Ibid.* [177, p. 21-22]

²⁶Le savoir est alors toujours considéré comme "révélé", venant de Dieu. Mais on assiste à l'introduction de la raison, qui peut prétendre à l'accessibilité de ce savoir.

²⁷*Ibid.* [177, p. 22]

1.3 Renaissance

À partir de la Renaissance, l'Europe est en plein bouleversement. Après des siècles de guerres et la perte de la moitié de sa population par la peste noire de 1347, l'art va connaître sa première grande révolution. Née en Italie au XIV^{ème} siècle, la Renaissance va s'étendre à toute l'Europe. Durant cette période, ce sont les échanges, les rapprochements avec aussi bien l'Afrique, le Moyen et l'Extrême Orient qui vont faciliter le partage des savoirs. Les artistes s'intéressent de plus en plus aux sciences, notamment à la géométrie, la mathématique et l'optique. Ce rapprochement va permettre une lente prise de distance de l'art et des sciences face à l'Église. Petit à petit, sur environ un siècle, jusqu'en 1450, la notion de perspective est constituée. Si elle était soupçonnée dans l'Antiquité grecque, avec la connaissance de la ligne de fuite, il s'agissait avant tout de la superposition "d'espaces cubiques empilés l'un sur l'autre"²⁸. Ensuite, tout au moins concernant la peinture, la proportion n'était généralement pas conservée, la taille des objets et des personnages était fonction de leur importance (perspective signifiante).

²⁸Jean Marie Schaeffer, *op. cit.* [166, p. 273]



FIGURE 1.2 : Lorenzo Ghiberti : La porte du paradis (1425 - 1452)

Comme le rappelle Daniel Arasse, qui "[tient] beaucoup au terme d'invention parce que la perspective n'est pas une découverte²⁹". Étant entendu "perspective monoculaire", qui n'est en effet absolument pas naturelle. Elle implique un spectateur immobile, avec un seul œil, ce qui ne correspond en rien à la réalité. Devant un tableau, les yeux du spectateur sont mouvants, ils balayent le champ. C'est pourtant cette construction qui s'imposera pour les siècles suivants. D'autres modèles ont été utilisés, comme le double point de fuite, par exemple avec la gravure de Lorenzo Ghiberti (1378-1455) (Figure

²⁹Daniel Arasse, *Histoires de peintures*, 2004. [6, p. 50]

1.2), un premier s'alignant sur les plafonds et le deuxième suivant le sol. Ou encore la perspective circulaire convexe³⁰ (ou tournante), comme dans le tableau de Jean Fouquet (1420-1481) (Figure 1.3) où le déplacement des yeux d'un côté à l'autre, suivant la courbure, donne une impression de mouvement aux chevaux.

³⁰Qui peut être rapprochée des miroirs convexes, utilisés par les peintres de l'époque.



FIGURE 1.3 : Jean Fouquet : Charité Saint Martin (1452 - 1460)



FIGURE 1.4 : Raphaël : L'école d'Athènes (1509)

D'abord nommée *commensuratio* par Leon Battista Alberti (1404-1472) en 1435 dans son ouvrage *De pictura*, la perspective offre une vision nouvelle du monde. C'est la célèbre "fenêtre" d'Alberti, l'introduction d'un espace (tridimensionnel) dans le tableau, qui perce le mur sur lequel il est posé. C'est la suggestion de l'infini, notion jusque là réservée à Dieu, qui entre dans le monde³¹. Celui-ci devient commensurable, en espace et en temps. Erwin Panofsky parle "d'objectivation du subjectif" et "d'élévation de l'art au rang de « science » (et à la Renaissance, il s'agit bien d'une promotion³²)." Ainsi, on assiste à une vision déthéologisée du monde. Tout au moins, l'art et les sciences ne sont plus l'apanage de l'Église, même si son influence est encore considérable. Au xiv^{ème} et xv^{ème} siècles, la majeure partie des œuvres est consacrée au divin, en témoignent les thèmes récurrents comme la cène³³, ou la mythologie grecque et latine. Néanmoins, dans cette période qualifiée de classique, on remarque un retour à l'Antiquité, notamment platonicienne³⁴, et une volonté d'unification. Ainsi Raphaël (1483-1520) dans *L'école d'Athènes* (Figure 1.4), synthèse des savoirs antiques et des mondes (Platon, Socrate, Aristote, Épicure, Diogène Laërce, etc., mais aussi Averroès).

³¹Les lignes censées être parallèles se "rejoignent à l'infini" au point de fuite.

³²"An objectivation of the subjective", "did it elevate art to a « science » (and for the Renaissance that was an elevation)." Erwin Panofsky. *In Perspective as symbolic form*, 1991. [141, p. 66]

³³Le dernier repas du Christ, symbolisant le passage de la foi à la religion, du divin à l'humain.

³⁴Le monde des Idées, les "formes pures", l'harmonie des nombres, tel que décrit dans le *Timée* [148].

À la même période, en 1453, l'imprimerie, technique importée d'Asie, est perfectionnée par Gutenberg avec la fabrication de moules en plomb. Le partage des connaissances en est bouleversé et démultiplié. En sciences, il n'y a pas encore de grand bouleversement, bien qu'"aux XV^{ème} et XVI^{ème} siècle, les savants italiens et leurs disciples allemands firent faire de grands progrès au calcul numérique, à l'algèbre, à la trigonométrie et à la mécanique³⁵." Mais malgré ces efforts, par manque de formalisme, les ouvrages de référence comme *l'Ars Magna*, de Cardan³⁶ en 1545, restent de "lecture pénible". Cela correspond aussi aux besoins croissants, en matière de calculs, concomitamment à l'essor des banques en Italie puis dans le reste de l'Europe.

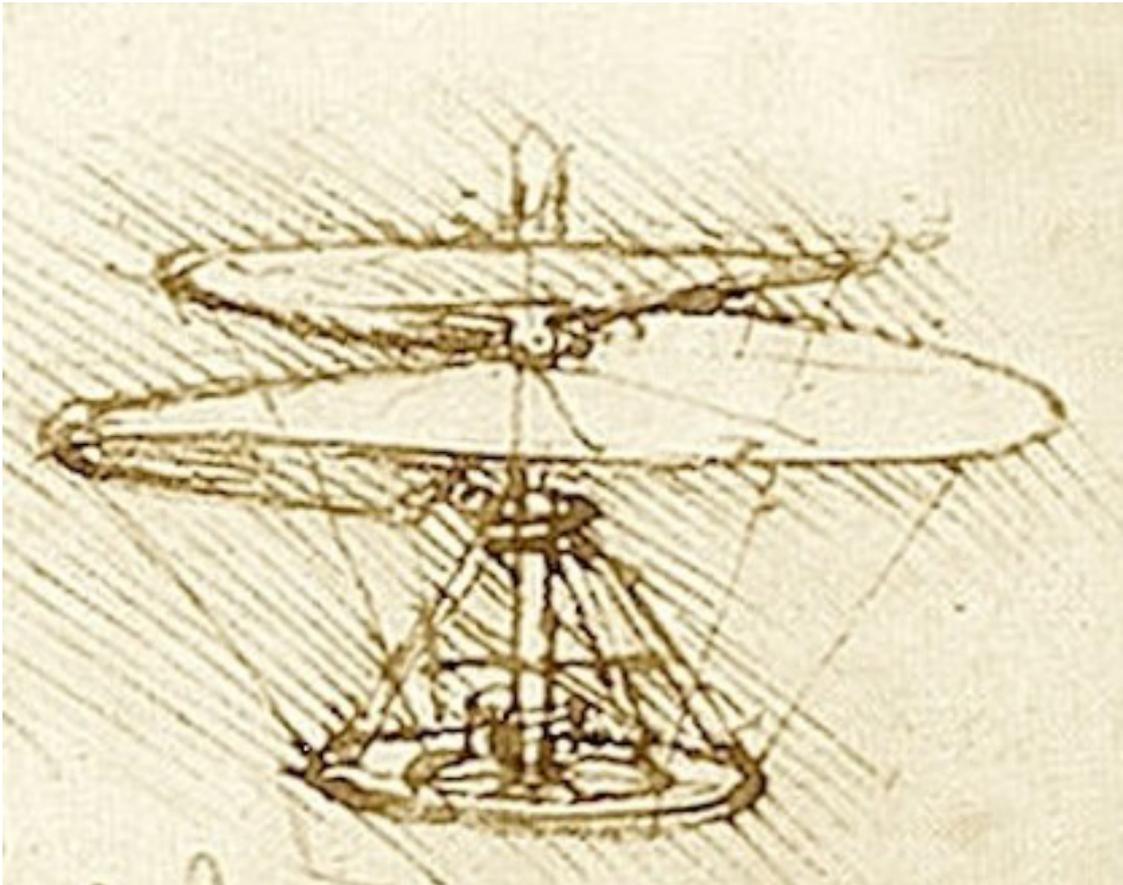


FIGURE 1.5 : Leonardo da Vinci et ses machines volantes

En Art, où a commencé la période classique, il y a un rapprochement vers l'homme, mais souvent encore en relation au divin. Plusieurs écoles voient le jour, comme celle de Sienne, où Duccio³⁷ peint des scènes de rue et d'intérieur. Il s'agit là de représentations

³⁵René Taton, *op. cit.* [177, p. 23]

³⁶Girolamo Cardano (1501-1576).

³⁷Duccio di Buoninsegna (1255/60-1318/19).

du monde. C'est une période dans laquelle les artistes s'intéressent de plus en plus aux sciences. Une place toute particulière peut être attribuée à Léonard de Vinci (1452-1519) du fait qu'il est non seulement le meilleur exemple d'artiste ingénieur, mais aussi créateur et inventeur. On lui doit le dessin technologique où il apporte une grande précision (Figure 1.5) et, en matière d'anatomie³⁸ de multiples dessins, dans l'intention de représenter au plus près le mouvement des corps humains³⁹. Étude qu'il emploiera dans ses tableaux et notamment les portraits, montrant les torsions du corps, précurseur en cela de la période maniériste qui suivra. En peinture encore, il apporte le *sfumato*, méthode qui permet d'effacer la frontière entre la ligne et la forme, celle-ci devant montrer son origine. Et enfin, dans un refus de la perspective, il travaille sur la lumière et les ombres qui permettent de rapprocher ou d'éloigner les figures et le fond.

À la fin du xv^{ème} siècle, la perspective est en partie abandonnée. On en arrive alors à une période anticlassique, caractérisée par l'invention. Les œuvres deviennent autonomes. Le xvi^{ème} sera marqué par des crises, aussi bien face au pouvoir politique (avec conflits), à la religion ou dans le domaine économique et enfin en science. C'est l'avènement du maniérisme⁴⁰ avec l'introduction de la notion de subtilité, de grâce (la *sprezzatura*). Il s'agit bien d'une nouvelle révolution, contre le classicisme et ses règles rigides. Le maniérisme ne s'attache plus au beau mais à la jouissance, à l'esprit. Il s'agit de représenter le mouvement, parfois exagéré, en s'appuyant sur l'illusion. En témoignent les formes serpentine de Michel Ange⁴², célèbre aussi pour ses contrastes chromatiques. Un évènement important, le sac de Rome de 1527, va engendrer la dispersion des artistes dans toute l'Europe. C'est aussi le point de départ de la prééminence de la France en art, et ce jusqu'à la seconde guerre mondiale. À noter, en aparté, la réapparition du nu, disparu depuis la fin de l'Antiquité⁴³, et l'invention de la peinture érotique par Titien (1488/9-1576).

³⁸La dissection humaine, abandonnée dans l'Antiquité puis interdite par la religion, est réapparue à la fin du xiii^{ème} siècle par Mondino de' Liuzzi (1270-1326), ouvrant de nouvelles voies à la médecine. Cependant, les dissections étaient toujours soumises à l'approbation de l'Église et demeuraient encore rares aux xiv^{ème} et xv^{ème} siècles, de l'ordre de deux à trois par an, devant une assemblée restreinte à vingt personnes. Voir Michel Faucheux, *La tentation de Faust ou la science dévoyée*, 2012. [78, p. 22]

³⁹Contrairement aux anatomistes, il étudie plus particulièrement la fonction des organes plutôt que leur forme ou position. Voir Edgar Morin, Jean-Louis Le Moigne, *L'intelligence de la complexité*, 1999. [135, p. 364-365]

⁴⁰"Le mot maniérisme, [aujourd'hui péjoratif], a été employé pour la première fois à la fin du xviii^{ème} siècle par Luigi Lanzi⁴¹, dans son *Histoire de la peinture italienne (Historia pictoria dell'Italia)*." Daniel Arasse, *op. cit.* [6, p. 190]

⁴¹Luigi Lanzi (1732-1810).

⁴²Michelangelo Buonarroti (1475-1564).

⁴³Le nu était alors associé par l'Église au péché originel, et ainsi au bannissement d'Adam et Eve du paradis.

En sciences, c'est en astronomie que va débiter la première grande révolution, étant entendu qu'elle n'est pas directe mais s'étend sur plus d'un siècle. Nicolas Copernic (1473-1543) est le premier à remettre à jour l'idée d'héliocentrisme⁴⁴. Son système permet de résoudre le problème des mouvements rétrogrades des autres planètes et offre simplicité et harmonie. Malgré des précautions vis-à-vis de l'Église⁴⁵, celle-ci interdira sa diffusion⁴⁶ en 1616 pour près d'un siècle et demi, marquant une première réelle rupture entre la science et la religion. Johannes Kepler (1571-1630) affinera cette théorie en passant d'orbites circulaires à elliptiques. Giordano Bruno (1548-1600), étudiant ces sujets, posera même les prémisses de la relativité du référentiel : "il y a une différence entre le mouvement du navire et le mouvement des choses qui sont dans le navire⁴⁷", en opposition à Aristote⁴⁸, prétendant que la Terre ne pouvait pas tourner par une preuve similaire : une pierre lâchée du haut d'une tour retombe à la verticale. Pour ces hérésies⁴⁹, il sera condamné à mort sans verser le sang par le cardinal Robert Bellarmin et finira sur un bûcher le 17 février 1600 à Rome. Mais alors la situation est telle que Alexandre Koyré la rapporte : "le Cosmos médiéval est détruit ; on peut dire qu'il a disparu dans le vide, entraînant avec lui la physique d'Aristote et laissant la place libre pour une « science nouvelle » que [Giordano] Bruno, néanmoins, ne pourra pas fonder⁵⁰." Près de trois siècles plus tard, en 1889, Ettore Ferrari (1844-1929) lui érigea une statue sur la place *Campo de' Fiori*⁵¹ à Rome.

En résumé

La Renaissance marque un premier grand renversement, aussi bien en art qu'en science. Tous deux vont, sur plusieurs siècles, s'éloigner de l'emprise de l'Église. La mathéma-

⁴⁴L'héliocentrisme est attribué à Aristaque de Samos vers 280 avant J.C., d'après le récit d'Archimède : "la Terre tourne autour du Soleil comme centre" [7] mais lui-même renia cette vision du monde et l'idée en fut abandonnée.

⁴⁵La préface de son œuvre *De Revolutionibus orbitum caelestium* de 1543 précisait qu'il s'agissait d'un simple modèle mathématique pour faciliter les calculs.

⁴⁶C'est à dire placé dans l'*Index librorum prohibitorum* qui recense les livres hérétiques, interdits aux catholiques romains.

⁴⁷Giordano Bruno, *La Cena de le cenere*, III-5 : *Opere Italiane*, Éd. Wagner, Lipsiae, 1830. In Alexandre Koyré, *Études galiléennes*, 1966. [110, p. 173]

⁴⁸Galilée lui-même n'était pas en accord sur ce point de la chute d'une pierre dans un bateau mais il était alors difficile d'entreprendre une telle expérience. Voir Paul Feyerabend, *Contre la méthode*, 1979, [79, note p. 98] qui cite un extrait du *Trattato della Sfera* de 1597. Mais il affirmera le contraire dans son *Dialogue concernant les deux plus grands systèmes du monde* de 1632. Voir Christian Magnan, *Le théorème du jardin*, 2014. [122, p. 50-51] L'expérience fut menée avec succès (un boulet tombe effectivement à la base du mat) en 1641 à Venise et à Marseille.

⁴⁹Officiellement pour athéisme.

⁵⁰Alexandre Koyré, *op. cit.* [110, p. 181]

⁵¹Littéralement : champ de fleurs.

tique et l'optique se sont développées, ouvrant la voie à l'astronomie, tout en remettant en cause l'enseignement scolastique fondé sur les travaux d'Aristote. Les artistes, très au fait des sciences, ont introduit la perspective, changeant radicalement la vision du monde. De plus, les mouvements commencent à se diversifier, signe d'une certaine forme d'émancipation, tout du moins vis-à-vis de l'Église.

1.4 XVII^{ème}, le grand siècle

Grâce au perfectionnement de la lunette astronomique, Galilée⁵² a pu confirmer que la version géocentrique du monde n'était pas valide et observer les différences de taille de Mars et Vénus, ainsi que les lunes de Jupiter⁵³. L'idée que la Lune ne pouvait suivre les mouvements de la Terre est ainsi réfutée et le modèle, aux erreurs d'observations près⁵⁴, semblait correspondre à la réalité. Cependant, l'Église ne put supporter un tel affront et le cardinal Robert Bellarmine condamna Galilée à la prison à vie en 1633, peine qui sera convertie en assignation à résidence⁵⁵. Mais la rupture est consommée, l'Europe savante choquée. On peut y voir un symbole de l'indépendance de la science, de la liberté de la recherche. Si les textes de Copernic et Galilée sont finalement retirés de l'Index en 1757, l'opposition de l'Église est néanmoins restée forte, en témoigne la déclaration du pape Jean-Paul II en 1992 : "Galilée a eu tort de «refuser la suggestion qui lui était faite [par le cardinal Robert Bellarmine] de présenter comme une hypothèse le système de Copernic⁵⁶.»"

En parallèle, François Viète (1540-1603) va permettre la diffusion et l'essor de la mathématique. Jusqu'alors d'approche absconse, il introduit un symbolisme littéral qui va engendrer l'algèbre moderne, formalisant aussi la trigonométrie et la géométrie. René Thom précise que c'est au "début du XVII^{ème} siècle, [avec] l'invention des nombres réels comme nombres décimaux illimités (Stevin-Viète), qu'apparaissent la notion de fonction et de calcul différentiel⁵⁷." Est ainsi introduite la notion d'infini mathématique⁵⁸,

⁵²Galileo Galilei (1564-1642).

⁵³Voir Michel Faucheux, *op. cit.* [78, p. 29]

⁵⁴Voir Paul Feyerabend, *op. cit.* [79, p. 130-151]

⁵⁵Voir, par exemple, Michel Faucheux, *op. cit.* [78, p. 31]

⁵⁶Discours soutenu à l'Académie pontificale des sciences, le 31 octobre 1992. *In Osservatore Romano*, 10 novembre 1992.

⁵⁷René Thom, *Esquisse d'une Sémiophysique*, 1988. [180, p. 45]

⁵⁸Et avec, la notion de limite.

entrevue par Archimède de Syracuse (-287- -212), mais difficilement concevable⁵⁹. À partir de là, "la notion de loi physique comme relation quantitative entre grandeurs offre alors des possibilités de prédictions considérables, et un contrôle plus précis des déplacements des corps matériels (la Mécanique)⁶¹." Plus encore, le développement de la mathématique précède les théories physiques ou, plus précisément, celui-ci est nécessaire à la construction d'une nouvelle théorie⁶². René Descartes (1596-1650) développera la géométrie analytique, où l'on retiendra la notion de repère et surtout d'espace "infini", conception qui correspond à celle de Giordano Bruno⁶³. Descartes toujours, avec son *cogito ergo sum*, annonce la séparation du sujet et de l'objet, paradigme qui va résister en sciences jusqu'au XX^{ème} siècle. Enfin, il faut noter la contribution de Pierre de Fermat (1601-1665) sur ses précisions concernant le calcul infinitésimal et, avec Blaise Pascal⁶⁴ (1623-1662), l'élaboration du calcul des probabilités.

"Mais, fait curieux, dans la deuxième partie [du XVII^{ème} siècle] nos savants ne jouèrent qu'un rôle effacé. [...] Notre Collège de France créé par François I^{er} [en 1530] et notre Académie des Sciences fondée en 1666 ne jouèrent dans cette période qu'un rôle secondaire, tandis que les universités étrangères se disputaient les savants en renom⁶⁵."

René Taton, 1961

En Art, plusieurs courants vont apparaître. En premier lieu le baroque, dans toute l'Europe. Son contenu est essentiellement religieux, il s'agit de transmettre un fait historique dans une suspension de l'espace et du temps. Il y a donc déstructuration, l'instant est privilégié. Cependant, le mouvement est souvent présent (en opposition au classicisme). En Italie, Caravage⁶⁶ fonde un mouvement singulier, complètement à l'écart.

⁵⁹À l'image de sa fameuse réflexion sur le nombre de grains de sable d'une plage, qui est fini et même mesurable (l'univers lui-même est fini et considéré comme une sphère). Pourtant son postulat : "si deux segments sont donnés, il y a toujours un multiple du plus petit qui surpasse le plus grand⁶⁰", pris à l'envers, correspond quasiment à la définition mathématique actuelle de l'infiniment petit. Ou encore, reprendre Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) : "Je n'admets pas plus de grandeurs infiniment petites que d'infiniment grandes. Je tiens les unes et les autres pour des manières abrégées de parler dans l'intérêt des fictions de l'esprit qui servent au calcul, telles que sont les racines imaginaires en algèbre." In René Taton, *op. cit.* [177, p. 112]

⁶⁰In Gaston Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique*, 1934. [10, p. 91]

⁶¹René Thom, *op. cit.* [180, p. 45]

⁶²Cas qui a pris de plus en plus d'importance dans l'évolution de la physique jusqu'à la "physique mathématique."

⁶³Malgré la remarquable interprétation relativiste de la chute d'une pierre dans un navire, sa vision du monde était donc erronée bien qu'il semblât délicat à l'époque d'en formuler une version cohérente.

⁶⁴Blaise Pascal est aussi à l'origine de la construction de la première machine à calculer, en 1642.

⁶⁵René Taton, *op. cit.* [177, p. 26-27]

⁶⁶Michelangelo Merisi da Caravaggio (1571-1610).

S'attachant au fait brut, ses peintures rapprochent le spectateur dans une forme d'intimité qu'il poussera jusqu'à l'absence d'arrière plan. Il ne s'agit plus d'idéal mais d'une représentation des faits. Ainsi, avec le rejet des canons esthétiques, la "laideur" peut aussi être représentée, avec des thèmes comme le sacrifice. Alors qu'à partir de la Renaissance l'Europe s'était chargée d'optimisme, il annonce une période plus trouble. Elle fait suite à la fondation du protestantisme, attribuée à Martin Luther (1483-1546) avec la publication de ses 95 thèses en 1517. Refusant l'autorité du pape, cela va conduire à de nombreux conflits et à la guerre de trente ans (1618-1648).

En Hollande plus particulièrement, la Réforme va se matérialiser par un éloignement de l'emprise de Rome. Martin Luther, puis Jean Calvin (1509-1564) vont considérablement renforcer son influence. Au XVII^{ème} siècle, cela va provoquer une rupture dans la peinture où désormais l'image religieuse est exclue. Alors que se présentaient essentiellement trois genres, allégorique (figuration d'une abstraction, d'une idée), historique (ou mythique) et générique (représentation d'une activité), la peinture va se tourner vers la description du quotidien. C'est l'avènement de la scène de genre. Cependant, elle n'est pas réaliste mais bien plutôt symbolique. La femme représentant la vertu (le foyer, la propreté, l'éducation des enfants) et l'homme le vice (l'ivresse, la débauche), on y trouve un côté moralisateur. Penchant que l'on retrouve aussi dans les natures mortes, synonymes de raffinement (ou d'opulence) et de vanité. Calvin impose de ne pas représenter Dieu, mais le monde tel qu'il est. On peut alors peindre des paysages mais, dans l'ensemble, ceux-ci offrent une place prépondérante au ciel. Enfin, si en grande partie la Hollande est protestante, on retrouve quelques artistes qui ne suivent pas ce mouvement, tel Johannes Vermeer (1632-1675), converti au catholicisme. Très connu en son temps (il est le peintre de la lumière), il meurt cependant pauvre. "Vermeer ne peint pas pour vivre. [...] Il peint pour peindre⁶⁷." Il introduit une relation d'intimité dans des cadres de la vie privée, en intégrant un obstacle entre le spectateur et ses personnages. Ses tableaux ne sont pour autant pas toujours de lecture facile et donnent encore lieu à plusieurs interprétations. Tel par exemple *L'art de la peinture* (Figure 1.6), où il y a ambiguïté sur l'identité du peintre, censé être lui-même alors que lui-même ne faisait jamais d'esquisse⁶⁸.

En France, le XVII^{ème} siècle est celui de la raison, mais aussi celui de l'étude des passions⁶⁹. Contrairement au reste de l'Europe, il y a une forme d'ambiguïté entre baroque et classicisme, pourtant en opposition. Le roi Louis XIV, dans toute sa démesure, s'octroie les meilleurs artistes et fait construire le château de Versailles, souhaitant rivaliser avec la Basilique Saint Pierre à Rome. En 1648, sur mandat royal, l'Académie Royale de Peinture et de Sculpture est fondée. Son enseignement dicte l'attitude à adopter en art, et impose la manière de peindre. Charles Le Brun (1619-1690) conçoit celle-ci avec

⁶⁷Daniel Arasse, *op. cit.* [6, p. 206]

⁶⁸*Ibid.* [6, p. 215]

⁶⁹René Descartes, *Les passions de l'âme*, 1649.



FIGURE 1.6 : Johannes Vermeer : L'art de la peinture (1665-1666)

rigueur et profondeur (la peinture est une affaire intellectuelle). Il décrit un ensemble de dessins (portraits) pour chaque passion⁷⁰, tentant par là-même non seulement d'intégrer

⁷⁰Charles Le Brun, *L'Expression des Passions*, 1663.

la vie mais de donner une âme à ses personnages. L'académisme, c'est aussi un moyen de classer et surtout hiérarchiser la peinture : du plus haut, Dieu, l'esprit, puis l'homme, l'animal jusqu'à la nature, le paysage et enfin la nature morte.

En résumé

Le XVII^{ème} siècle marque un tournant dans l'approche scientifique du monde. L'effort de formalisation et le développement mathématique vont ouvrir la voie à la mécanique et permettre de faire des prédictions. Descartes, affirmant la séparation du sujet et de l'objet, confirme cette tendance de lois inhérentes descriptibles. En art, si le classicisme perdure, le baroque va se répandre dans toute l'Europe, s'attachant toujours au fait religieux. Mais, d'autres courants vont naître. En Hollande particulièrement, le protestantisme exclut la représentation de Dieu. C'est l'avènement de la scène de genre, s'intéressant au quotidien.

Ce sont les regardeurs qui font
les tableaux.

Marcel Duchamp

2

Seconde période

2.1 XVIII^{ème}, le siècle des lumières

Au XVIII^{ème} comme au XVII^{ème} siècle, la contribution scientifique est apportée par des amateurs éclairés, "des savants pensionnés par des monarques ou des académies¹." La formalisation de la mathématique va permettre son développement et les théories, de Copernic à Galilée, l'expansion d'une physique du mouvement des corps solides. En premier lieu Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), malgré ses réflexions sur l'infiniment grand et l'infiniment petit², introduit la notation différentielle et ouvre la voie, en parallèle et indépendamment d'Isaac Newton (1642-1727), au calcul intégral. Ce dernier, avec la théorie de la gravitation universelle³, avait alors lancé les bases de la mécanique. Sa théorie fait toujours partie de la physique classique (qui, même si elle a été réfutée,

¹René Taton, *Histoire des sciences. Tome III. La science contemporaine. Volume 2. Le XX^{ème} siècle, années 1900-1960*, 1964. [178, p. V]

²Voir la note 59 page 22 du chapitre précédent. Ou encore, sur "l'absurdité" de la notion de division à l'infini de l'espace et plus encore du temps, David Hume (1711-1776), *Enquête sur l'entendement humain*, 1748. [102, p. 238-239]

³Isaac Newton, *Principia mathematica*, 1687.

conserve une place de choix dans l'enseignement scientifique⁴). Mais ce qui est nouveau, et important, c'est que "les progrès en analyse [ont une] répercussion immédiate en physique⁵." Tout au moins en ce qui concerne les objets solides, mais alors les applications sont innombrables et à portée de main. Ce point de vue, matérialiste, permet "d'expliquer" le monde sur un fondement logique (mathématique), et il conservera un statut privilégié pendant près de deux siècles.



FIGURE 2.1 : Jean-Honoré Fragonard : Le verrou (1774-1778)

En art, la mort de Louis XIV en 1715 annonce un éloignement de la rigidité du classicisme. Si celui-ci ainsi que le style baroque perdurent, formant "le grand style", un nouveau courant va apparaître, en lien avec le déclin de l'aristocratie, le rococo. C'est une période de frivolité, de libertinage. Le rococo produit alors, entre autres, des scènes de plaisir. Par exemple, dans le tableau de Jean-Honoré Fragonard (1732-1806), *Le verrou* (Figure 2.1). Mais qu'en est-il ? L'homme pousse le verrou alors que le lit est déjà défait, laissant un doute sur la chronicité du tableau. Faut-il y voir violence ou

⁴Néanmoins, sa place dans l'enseignement peut être légitimée dans un sens qui sera développé en fin de manuscrit.

⁵René Taton, *Histoire du calcul*, 1961. [177, p. 122]

passion amoureuse ? La lumière qui semble survenir de la pomme sur la gauche vient contredire cette première idée. Une description suggestive pourrait offrir quelque piste⁶ mais "si [le critique d'art] commence à nommer la chose, [son] discours se teinte d'une vulgarité qui ne correspond pas du tout au tableau⁷." Dans sa forme, le rococo s'appuie sur les courbes et formes serpentines. Il décrit des scènes d'une époque que le succès du roman *Les liaisons dangereuses*, 1782, chef d'œuvre de Pierre Choderlos de Laclos (1741-1803), viendra appuyer.



FIGURE 2.2 : Jean-Siméon Chardin : La bulle de savon (1734)

⁶La forme et la position des oreillers, l'angle du lit, etc. Le titre même, *Le vers où ?*

⁷Daniel Arasse, *op. cit.* [6, p. 319]

Durant la même période, mais dans une tout autre approche, Jean-Siméon Chardin (1699-1779) va venir sublimer le genre considéré comme le moins noble, la nature morte. En peignant les choses telles qu'elles sont, dans un style épuré, sans ajout inutile, il purifie l'objet. De même dans des scènes de genre, où il s'intéresse à l'ordinaire. Dans *La bulle de savon* (Figure 2.2) comme dans d'autres toiles, il peint un moment figé, fragile, où à chaque fois le personnage est entièrement concentré, attelé à sa tâche. Il semble même ne pas remarquer ou ne pas se soucier du spectateur, qui peut, ou non, être là. Celui-ci a alors un autre regard sur la toile, il n'est pas impliqué et ainsi libre de ses pensées. Cette approche se retrouve aussi dans quelques-uns de ses tableaux où l'attention du personnage est attirée hors champ. Peintre à part, mais reconnu de ses pairs, il propose un style particulier, autonome, minutieux. À sa mort, Charles-Nicolas Cochin (1715-1790) lui attribuera ces propos : "on se sert des couleurs, mais on peint avec le sentiment."

Le XVIII^{ème} siècle est aussi focalisé sur la raison et, en opposition au rococo, il y a une tendance vers la moralisation, mais elle ne sera pas suivie. En revanche, les idées de pureté et de vertu ont donné naissance à un nouveau courant, le néoclassicisme, le "vrai style." Avant tout en sculpture, art considéré à l'époque comme supérieur à la peinture, on assiste à un retour à l'Antiquité avec la notion platonicienne du Beau idéal. En peinture, c'est la notion de maîtrise de soi, stoïcienne, qui prône. Celle-ci doit alors donner un message direct, facilement compréhensible, sans superflu. Puis, en France, la prise de la Bastille en 1789 annonce des tensions envers toute l'Europe, renforcées avec la condamnation à mort de Louis XVI en 1793, et entraînant des guerres sur près de vingt ans. Le néoclassicisme, avec la montée du patriotisme, relate alors les exploits militaires. En témoigne le baron Antoine-Jean Gros (1771-1835) qui suit Napoléon Bonaparte sur les champs de bataille et devient son peintre officiel, avant de prendre la direction de l'École des Beaux-Arts de Paris en 1816.

Dans cette seconde partie du XVIII^{ème} siècle, la mathématique, aussi bien que les théories en mécanique classique, se clarifient. Il y a la parution, en 1751, de la première encyclopédie par Diderot et d'Alembert⁸, où ce dernier, en préface, parlera de la condamnation de Galilée en ces termes : "peu s'en fallut qu'on ne défendît au genre humain de penser." Mais ce sera bien plutôt un épanouissement. En témoigne "Euler⁹, le plus grand mathématicien de son temps. [...] Son œuvre d'une ampleur inouïe (seize mille pages in-4°) embrasse toutes les branches de la science¹⁰." Et si, malgré un manque certain de coordination, de plus en plus de scientifiques contribuent à ces développements, c'est en

⁸Denis Diderot (1713-1784), Jean le Rond d'Alembert (1717-1783), *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*.

⁹Leonhard Euler (1707-1783).

¹⁰Avec des apports décisifs aussi bien sur les suites et séries mathématiques appliquées au calcul infinitésimal, qu'en géométrie ou encore en physique avec la dynamique des fluides. *In* René Taton, *op. cit.* [177, p. 29]

France que la participation est la plus active. En majeure partie grâce à "la Révolution qui [...] donna une impulsion nouvelle à la recherche scientifique. Une réforme heureuse de l'enseignement contribua à cette rénovation par la création de grandes écoles scientifiques, en particulier [en 1794] l'École Normale Supérieure et l'École Polytechnique¹¹." Institut où enseignèrent des personnalités comme Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), qui proposa une approche algébrique de la mécanique¹², "chef d'œuvre de méthode, de clarté et d'élégance¹³" qui montre l'intérêt d'une rigueur extrême aussi bien dans la formulation que dans les raisonnements mathématiques.

En résumé

Les progrès rapides en mathématique et plus spécialement en analyse ont une répercussion immédiate en physique des solides. Les connaissances deviennent accessibles à tout un chacun avec la parution de la première encyclopédie en 1751, et de plus en plus de savants contribuent à ces développements. La Révolution française de 1789 parachève cette tendance avec l'ouverture des grandes écoles. En art, si le "grand style" (classicisme et baroque) perdure, des mouvements en opposition vont apparaître. D'un côté la frivolité du rococo, de l'autre la pureté et la vertu du néoclassicisme (le "vrai style"). À noter en aparté, la sublimation du genre considéré comme le moins noble, la nature morte, par Chardin. Il peint aussi des scènes de genre où, en n'impliquant pas le spectateur, offre à ce dernier un libre cheminement de ses pensées.

2.2 XIX^{ème} siècle et Révolutions

Depuis la Révolution de 1789, l'Europe s'industrialise de plus en plus, et de manière accélérée. Cette mécanisation de la production va engendrer le dénuement des classes ouvrières et un enrichissement rapide de la bourgeoisie, faits qui seront à l'origine de soulèvements de la population. La France en particulier va voir son régime politique changer à plusieurs reprises, oscillant entre Monarchie, Empire et République. Cela aura évidemment des répercussions aussi bien en art qu'en science. Ces périodes de guerres amènent à la désillusion, on passe alors de la raison aux passions, jusqu'à la folie. Précurseur du mouvement qui va suivre, le romantisme, Francisco de Goya (1746-1812) peint

¹¹René Taton, *op. cit.* [177, p. 30]

¹²Joseph-Louis Lagrange, *Mécanique analytique*, 1788.

¹³René Taton, *op. cit.* [177, p. 31]

l'angoisse et la peur (Figure 2.3). Il joue sur la déformation des corps pour faire passer des émotions comme l'horreur, le sentiment de la mort. À l'opposé de l'académisme et du néoclassicisme, le romantisme va alors s'attacher à l'expression des sentiments intérieurs et se décliner sous diverses formes, chacun apportant son propre style.

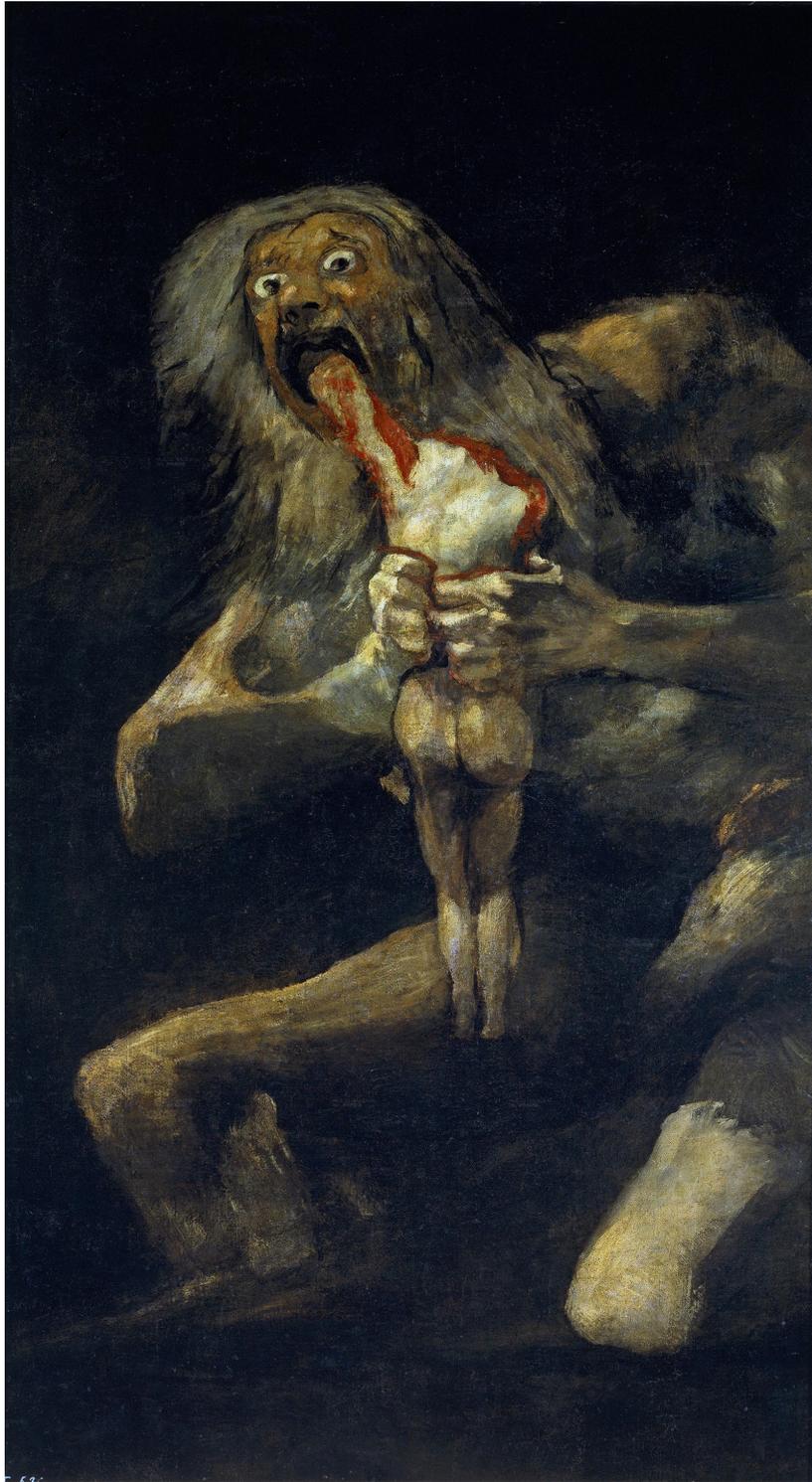


FIGURE 2.3 : Francisco de Goya : Saturne dévorant un de ses fils (1823)



FIGURE 2.4 : Eugène Delacroix : Les scènes des Massacres de Scio (1824)

Si le néoclassicisme perdure sous une forme académique, le romantisme va ouvrir aux questionnements et aborder des thèmes comme l'irrationnel, le rêve, la folie, l'instinct, mais aussi la mort et la guerre. La Grèce par exemple, dans sa lutte pour l'indépendance, subit une invasion de la part des Ottomans. La riche île de Chios en particulier va connaître en 1822 une véritable humiliation, avec des dizaines de milliers d'exécutions et autant d'habitants réduits en esclavage et vendus¹⁴. Eugène Delacroix (1798-1863) va dénoncer ce véritable génocide dans un célèbre tableau, *Les scènes des Massacres de Scio* (Figure 2.4). Cet exemple montre l'implication politique d'artistes à une époque trouble de guerres, de révolutions mais aussi de désillusion. Engagement que l'on retrouve aussi, de manière encore plus marquée, chez des écrivains comme Victor Hugo (1802-1885), ou des philosophes comme Karl Marx (1818-1883) et Friedrich Engels (1820-1895) qui ensemble créent la Ligue Communiste en 1847 et publient *Le manifeste du parti communiste*¹⁵ l'année suivante. Au cours de la révolution de 1848-1852, Victor Hugo a ainsi détaillé la situation : "tout a fléchi à la fois ; les familles riches sont gênées, les familles aisées sont pauvres, les familles pauvres sont affamées¹⁶." Et sur le pourquoi et quelle solution apporter : "faire descendre la richesse. On a fait le contraire ; on a fait monter la misère¹⁷." Signe que l'histoire n'apprend pas toujours des erreurs du passé.

En Angleterre, il y a le naturalisme avec John Constable (1767-1837) qui, peignant "d'après nature", dévoile une richesse en nuances de couleurs, notamment autour du vert. Il peint les effets d'ombre et de lumière du soleil, et porte un intérêt tout particulier aux nuages. Il souhaite peindre la vérité et influencera les romantiques français, comme Eugène Delacroix ou Théodore Rousseau (1812-1867) et l'École de Barbizon. Si chez John Constable, il s'agit de présenter une forme d'harmonie entre l'homme et la nature, William Turner (1775-1851) s'attachera à dépeindre le déchaînement, la force de la nature, face à laquelle l'homme est impuissant, avec par exemple un soleil étincelant, une tempête, un orage. Son œuvre évolue au fil du temps et, après un séjour en Italie en 1819-1820, il s'éloigne de la représentation pour ouvrir à la sensation. En cela il est considéré comme un précurseur de l'impressionnisme, par ses peintures qui se dématérialisent, approchant de plus en plus l'abstraction. Alors même qu'il enseignait à la Royal Academy, sa démarche est critiquée et ses œuvres n'y seront plus exposées.

En France, Théodore Rousseau s'installe à Barbizon en 1846 et fonde l'École du même nom, où plusieurs peintres vont le rejoindre. Leur recherche porte sur l'instant, peindre la nature à un moment précis, du jour, de l'année, telle qu'elle est. S'opposant à l'industrialisation effrénée, il y a un retour à la terre. Le naturalisme anglais présentait

¹⁴La Grèce sera reconnue indépendante en 1830, soutenue en particulier par la France, la Russie et l'Angleterre. Mais l'île de Chios sera encore sous occupation musulmane jusqu'en 1912.

¹⁵Karl Marx, Friedrich Engels, *Le manifeste du parti communiste*, 1848. [125]

¹⁶Assemblée constituante, 1848. Ateliers nationaux, discours du 20 juin 1848. In Victor Hugo, *Œuvres complètes. Actes et paroles I. Avant l'exil 1841-1851*, 1882. [101, p. 217]

¹⁷*Ibid.* [101, p. 218]

la force de la nature, l'École de Barbizon va donner l'harmonie. Le sujet est la terre, et avec elle, ceux qui y sont proches, en commençant par les arbres, les vaches¹⁸, ou encore les moutons¹⁹. Jean-François Millet (1814-1875) les rejoint et s'attache à l'homme de la terre, et plus spécialement à la misère de la classe paysanne, au travail. Durant la même période, Gustave Courbet (1817-1879) représente le réalisme, avec un questionnement sur l'évolution sociale et le progrès technique. S'éloignant du néoclassicisme idéaliste et de l'imaginaire romantique, il peint des hommes ordinaires. À partir de 1852, il s'attaque aux nus. Ceux-ci ne présentent pas de Vénus imaginaire, idéale, mais la chair avec ses imperfections, ce qui choquera et provoquera beaucoup de critiques. Il montre son désir avec énergie. Très engagé politiquement, il refuse la Légion d'honneur²⁰ et sera élu au Conseil de la Commune de Paris en 1871.

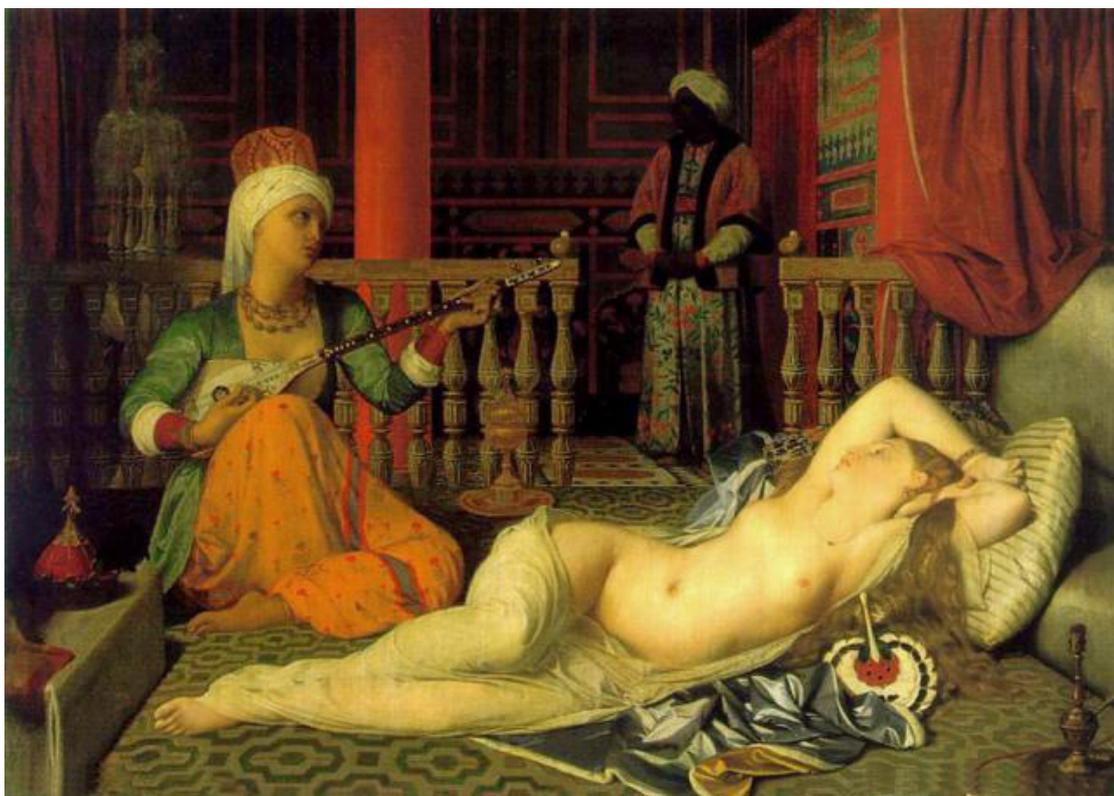


FIGURE 2.5 : Jean-Auguste-Dominique Ingres : Odalisque à l'esclave (1842)

Durant cette première partie du siècle, le romantisme, dans ses déclinaisons, a aussi été influencé par l'exotisme, et plus spécialement l'Orient. En témoigne le nombre de tableaux représentant un harem, mais aussi l'influence sur les couleurs, par exemple chez Eugène Delacroix après ses séjours au Maghreb, où la luminosité est bien spécifique.

¹⁸Constant Troyon (1813-1865)

¹⁹Charles Jacque (1813-1894)

²⁰Proposée en 1870 par Maurice Richard, Ministre des lettres, sciences et beaux-arts. [57]

À noter aussi un cas particulier, celui de Jean-Auguste-Dominique Ingres (1780-1867), peintre considéré comme académiste, porté par le néoclassicisme, mais dont certaines œuvres comme *Odalisque à l'esclave* (Figure 2.5) ou *Le bain turc* (1862) sont clairement d'inspiration romantique, aussi bien pour leur sujet que pour leur réalisation. À part aussi, le romantisme se décline dans le mouvement des préraphaélites à partir de 1848 en Angleterre. En opposition à l'Académie Royale, ce courant, proche de la nature sans être naturaliste, se distingue par la recherche de la perfection de la forme et de l'expression, avec un souci du détail sur chaque partie du tableau. L'intention est de sortir de l'atelier, ce qui sera facilité par le développement du tube de peinture, mouvement qui sera par la suite repris en France, notamment par les impressionnistes.

En science, on peut considérer deux périodes distinctes. La première de la fin du XVIII^{ème} siècle jusqu'au delà du milieu du XIX^{ème} siècle. Elle est marquée par le besoin de formalisation, les chercheurs avançant chacun dans une direction, "suivant des méthodes parfois hasardeuses et sans trop s'inquiéter de la fragilité de certaines notions. [...] Il devenait nécessaire de réviser minutieusement toutes [ces] notions²¹." Le développement de l'enseignement supérieur permit la création de chaires réservées à "des professeurs plus nombreux et plus spécialisés, pour qui les mathématiques étaient devenues un métier. [Ce qui amena à] une extension extraordinaire de la recherche scientifique²²." Le nombre de savants explose²³ et beaucoup verront leur nom apposé à des théories mathématiques. À titre d'exemple, si Alessandro Volta (1745-1827) a construit la pile qui porte son nom, André-Marie Ampère (1775-1836) a développé une formalisation théorique de l'électricité. De même, Joseph Fourier (1768-1830), qui s'est intéressé à la propagation de la chaleur, est aujourd'hui connu pour ses séries trigonométriques convergentes, dont "il comprit l'importance de cette notation nouvelle²⁴."

Des domaines plus théoriques sont abordés, Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) propose une théorie de la formation du système solaire qui, dans les grandes lignes, correspond à la version actuelle acceptée en physique. Contributeur aussi en probabilité, il reste néanmoins un fervent défenseur du déterminisme. Mais il y a une tendance vers l'abstraction et aussi bien en algèbre qu'en analyse des voies s'ouvrent vers la mathématique pure. En témoignent Niels Henrik Abel (1802-1829) et Évariste Galois²⁵ (1811-1832) qui a révolutionné l'algèbre avec sa théorie des groupes, alors même qu'il "se [lançait] à corps perdu dans la politique²⁶." En analyse, de grands noms comme Carl Friedrich Gauss (1777-1855), et dans les deux domaines Augustin Louis Cauchy (1789-1857)

²¹René Taton, *op. cit.* [177, p. 33]

²²*Ibid.* [177, p. 31]

²³"C'est la France qui participa pour la plus grande part à cette étape essentielle de l'histoire de la science grâce en particulier à LAGRANGE, LAPLACE, LEGENDRE, MONGE et FOURIER." *Ibid.* [177, p. 30]

²⁴*Ibid.* [177, p. 34]

²⁵Évariste Galois, *Œuvres mathématiques. In Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 1846. [90]

²⁶René Taton, *op. cit.* [177, p. 36]

laissent des œuvres impressionnantes. Enfin, alors même que le 5^{ème} postulat d'Euclide sur les droites parallèles était considéré par la majorité des mathématiciens comme un théorème²⁷, Nikolai Ivanovitch Lobatchevski (1792-1856) et Bernhard Riemann²⁸ (1826-1866) développent, le premier une géométrie hyperbolique et le second une géométrie sphérique, dites non euclidiennes²⁹.



FIGURE 2.6 : Édouard Manet : Le déjeuner sur l'herbe (1863)

En art, plusieurs artistes avaient vu leurs œuvres rejetées du Salon Officiel, comme Gustave Courbet dès 1846. Il créera alors en 1855 son propre pavillon du réalisme et, en 1863, Napoléon III (1808-1873) ordonnera la création d'un "Salon des Refusés", en

²⁷Gaston Bachelard précise que "d'Alambert considère la *demande* d'Euclide relative au parallélisme comme un *théorème* à démontrer. Que ce théorème corresponde à une vérité, à un fait mathématique, personne n'en doute alors." In Gaston Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique*, 1934. [10, p. 24]

²⁸"Le plus brillant mathématicien du milieu du [XIX^{ème}] siècle." René Taton, *op. cit.* [177, p. 37]

²⁹Gaston Bachelard cite Houël (*Bulletin des sciences mathématiques*, février 1926) : "Les euclidiens [ont] cru que l'on niait leur géométrie, tandis qu'on ne faisait que la généraliser, Lobatchevsky et Euclide pouvant fort bien s'accorder ensemble." In Gaston Bachelard, *op. cit.* [10, p. 30-31] En effet, Euclide a formulé des théorèmes et des postulats, ces derniers devant être considérés comme des axiomes, ni démontrables, ni réfutables, tout comme leurs contraires.

contrepoids à la sévérité du jury du Salon Officiel. Edouard Manet (1832-1883) y expose *Le déjeuner sur l'herbe* (Figure 2.6) qui fit immédiatement scandale. Que penser en effet de cette femme, nue, dehors, devant deux hommes habillés. Elle ne peut qu'être de mœurs légères, et choquera alors le public bourgeois. Cette même année, il peint *Olympia*, et provoquera une véritable révolution avec la naissance de l'art moderne³⁰. À partir de là, la peinture cesse d'être une imitation, elle devient pleinement peinture. Avant, elle était lissée, gommée, après elle montre les traces du pinceau, du couteau. Elle prend sens lorsqu'on la voit. 1863 est aussi l'année de la réforme de l'École des beaux-arts, où l'Académie avait une "domination absolue"³¹ sur la vie artistique. On peut y voir une "reconnaissance officielle du statut autonome de l'art ([...] plus soumis aux normes formelles du beau absolu³² [...])." Et si "la majeure partie de ces innovations furent en fait abolies huit ans après, [elle a marqué les esprits] dans les débats qu'elle suscita³³."

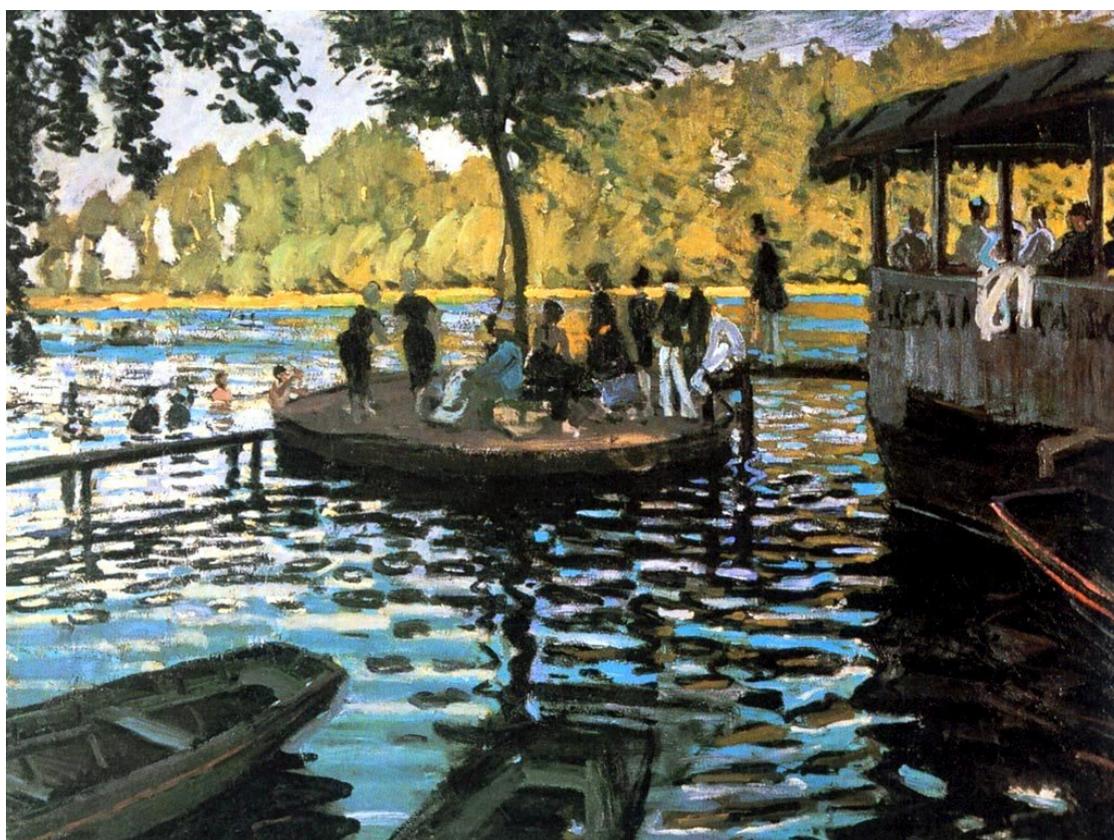


FIGURE 2.7 : Claude Monet : La grenouillère (1869)

³⁰D'après André Malraux (1901-1976).

³¹Alain Bonnet, *La réforme de l'École des beaux-arts de 1863*, *Romantisme*, vol. 26, num. 93, 1996. [29, p. 29]

³²*Ibid.* [29, p. 37]

³³*Ibid.* [29, p. 38]

C'est alors la période de l'impressionnisme, qui va se présenter sous diverses formes. Le sujet en est le quotidien, le maintenant, ce n'est plus un idéal. Il y a d'abord la touche de couleur, avec Claude Monet (1840-1926), qui crée une vibration de la lumière. La touche estompe aussi le sujet, comme dans *La grenouillère*³⁴ (Figure 2.7), premier pas vers l'abstraction. Il y a ensuite le pointillisme, division des couleurs aux trois primaires par petits points juxtaposés. S'appuyant sur les connaissances scientifiques en optique et sur la manière de percevoir de l'œil, ce mode permet de gagner en luminosité mais c'est alors au spectateur de reconstruire le tableau, en se tenant à une distance adéquate. Il y a enfin un cas bien particulier, celui de Paul Cézanne (1839-1906), dont la peinture évolue en différentes périodes. Rejetant complètement la perspective (c'est la couleur qui fait le tableau), il rend la profondeur par des formes courbes. Ensuite, il pourra rendre à ses paysages différents instants de luminosité avant d'en faire une synthèse globale. Enfin, ses paysages porteront tout au premier plan, la profondeur étant rendue par le mouvement des yeux du spectateur. Ses portraits suivront avec un sujet qui n'est plus séparé du fond, et où la forme s'amenuise de plus en plus.

En sciences, à partir de 1870, la production mathématique s'accroît énormément et suite à la guerre de sécession, "les États-Unis [...] entrèrent à leur tour dans la voie de la recherche théorique³⁵." On entre alors dans une ère de communication, et il y a une multiplication des revues scientifiques et des congrès³⁶. Trois tendances peuvent se distinguer, une toute théorique par "les écoles allemande (Weierstrass, Dedekind, Cantor³⁷) et française (J. Tannery, Jordan, Baire³⁸)³⁹." Études portant sur les fonctions, les ensembles, les groupes, les irrationnels, en introduisant des classifications et des notions nouvelles comme les nombres transfinis. D'un autre côté, Henri Poincaré (1854-1912), "dernier savant universel⁴⁰" s'est intéressé à un peu près tous les domaines de recherche de l'époque. On lui doit, entre autres, avec Georg Cantor, la création de la physique mathématique, dans "une attitude de plus en plus accusée devant les principes mêmes de la science⁴¹." Enfin, c'est l'essor de la théorie des probabilités et de la statistique, approchant de nombreux domaines, comme l'économie, l'étude des risques, jusqu'à la physique théorique, avec "la théorie cinétique des gaz, et la mécanique statistique générale (Maxwell, Boltzmann, Gibbs⁴²)⁴³."

³⁴Tableau qui sera refusé au Salon Officiel.

³⁵René Taton, *op. cit.* [177, p. 37]

³⁶*Ibid.* [177, p. 38]

³⁷Karl Weierstrass (1815-1897), Richard Dedekind (1831-1916) et Georg Cantor (1845-1918).

³⁸Jules Tannery (1848-1910), Camille Jordan (1838-1922) et René-Louis Baire (1874-1932).

³⁹*Ibid.* [177, p. 39]

⁴⁰*Ibid.*

⁴¹*Ibid.* [177, p. 38]

⁴²James Clerk Maxwell (1831-1879), Ludwig Boltzmann (1844-1906) et Willard Gibbs (1839-1903).

⁴³*Ibid.* [177, p. 109]

On assiste alors à un rapprochement de divers domaines des sciences, avec des conséquences sur les progrès techniques⁴⁴. Ainsi, James Clerk Maxwell a réussi à unifier électricité et magnétisme⁴⁵. À la suite de ces travaux, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) put alors mettre en évidence l'existence d'ondes électromagnétiques, qui permirent à Guglielmo Marconi (1874-1937) d'établir une liaison sans fil "par-dessus la Manche en 1897, puis par-dessus l'Atlantique en 1902⁴⁶." Dans un tout autre domaine, Maxwell s'intéressa aussi à la perception de la couleur, et ses études mènèrent Thomas Sutton (1819-1875) à développer la toute première photographie couleur en 1861. Enfin, les connaissances sur la matière seront précisées au point où Dmitri Mendeleïev (1834-1907) pourra proposer sa célèbre classification périodique des éléments en 1869. D'autres découvertes vont avoir lieu, comme "la première preuve directe de l'existence de l'électron⁴⁷" en 1895 par Jean Perrin (1870-1942), ou plus fortuites, comme le rayon X par Wilhelm Röntgen (1845-1923) en 1895⁴⁸, celle d'éléments nouveaux comme le polonium et le radium par Pierre et Marie Curie⁴⁹ en 1898⁵⁰. Le savoir et les avancées scientifiques sont telles que certains physiciens croient que la science est sur le point d'être complètement aboutie.

"Aujourd'hui les physiciens comprennent la quasi-totalité du monde qui nous entoure. Certes il reste bien quelques petits nuages qui flottent dans le grand ciel bleu de la physique : le problème de l'éther et celui du rayonnement du corps noir, mais à n'en pas douter, ils seront rapidement dispersés à l'orée de ce nouveau siècle."

Lord Kelvin⁵¹, discours d'introduction à la Royal Institution de Londres le 27 avril 1900.

En résumé

L'industrialisation effrénée mène à des périodes d'instabilité politique et de crises. En art, cela se traduit à travers le romantisme, centré sur les sentiments intérieurs, se déclinant sous de multiples formes. D'un côté, il y a un retour à la nature, marqué en Angleterre

⁴⁴Même si le déploiement de ces nouveautés vers la population ne se fera que très progressivement au cours du xx^{ème} siècle.

⁴⁵Hans Christian Ørsted (1777-1851) avait déjà découvert, en 1820, l'interaction entre électricité et magnétisme en constatant le changement de direction de l'aiguille d'une boussole à côté d'un fil électrique, mais sans en formuler la relation.

⁴⁶Pierre Marzin et Jean le Mézec. *In* René Taton, *op. cit.* [178, p. 268-269]

⁴⁷*Ibid.* [178, p. 255]

⁴⁸Jean Teillac. *In* René Taton, *op. cit.* [178, p. 332]

⁴⁹Pierre Curie (1859-1906) et Marie Skłodowska Curie (1867-1934).

⁵⁰*Ibid.* [178, p. 335]

⁵¹Sir William Thomson (1824-1907)

avec Constable, Turner, puis le mouvement des préraphaélites. En France par l'école de Barbizon, rejointe par Millet qui s'attachera à la misère paysanne. D'un autre côté, il y a une réflexion sur l'évolution sociale et la pauvreté. Courbet avec le réalisme, rejeté au Salon Officiel. En 1863, Manet avec *Le déjeuner sur l'herbe* et *Olympia* fera scandale et marquera le début de l'art moderne. Viendra l'impressionnisme avec Monet, puis le pointillisme, nouveau pas vers l'abstraction. Et le cas tout particulier de Cézanne. En mathématique, une tendance vers l'abstraction se fait jour avec, entre autres, les géométries hyperboliques et sphériques. À partir de 1870, de nouvelles notions apparaissent, qui conduisent à la physique mathématique, non sans remise en question (Henri Poincaré). Enfin, c'est l'essor des probabilités et des statistiques, seules capables d'amener à une description-prédiction en mécanique des fluides.

2.3 Époque contemporaine

Dès le début du $xx^{\text{ème}}$ siècle, on assiste à une "spécialisation croissante imposée par l'extension rapide du domaine de la science⁵²." Concernant la prédiction de Lord Kelvin, elle aura été mise à mal quelques mois seulement après son discours (de 1900), suite aux travaux de Max Planck (1858-1947) qui, le premier, sur les conseils de Boltzmann, mit en évidence le caractère discontinu du rayonnement du corps noir⁵³. Considération difficilement tenable pour les physiciens de l'époque, mais qui sera soutenue par Albert Einstein (1879-1955) en 1905, alors qu'il "découvrait la seule explication valable du mystérieux « effet photoélectrique⁵⁴ »." C'est le triomphe de l'atomisme qui marque définitivement "une déchirure [...] qui introduisait la discontinuité au beau milieu du domaine où on devait le moins l'attendre, celui de l'énergie⁵⁵." Et qui permet à Niels Bohr (1885-1962) de définir les "lois donnant la fréquence des raies spectrales⁵⁶" en 1913. Ainsi la physique quantique est née et connaîtra de forts développements. Si pour Henri Poincaré, la science est déterministe : "Aux yeux du physicien, le monde se réduit à une série de phénomènes, dépendant uniquement, d'une part, des phénomènes initiaux, d'autre part, des lois qui lient les conséquents aux antécédents⁵⁷", la rupture sera totale avec la démonstration des "relations d'incertitude de Heisenberg⁵⁸⁵⁹, qui affirment qu'il n'est pas possible de mesurer plusieurs données sur une même particule, et qui confirment l'ap-

⁵²René Taton, *op. cit.* [178, p. V]

⁵³Louis de Broglie. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 133-135] L'anecdote sur Boltzmann étant due à R. Dugas dans *La théorie physique au sens de Boltzmann et ses prolongements modernes*.

⁵⁴Louis de Broglie. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 134]

⁵⁵Pierre Auger. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 7]

⁵⁶Louis de Broglie. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 135]

⁵⁷Henri Poincaré, *La science et l'hypothèse*, 1902. [149, p. 118]

⁵⁸Werner Heisenberg (1901-1976).

⁵⁹Louis de Broglie. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 142]

proche uniquement probabiliste de la "matière". "Il n'y a plus en physique quantique que des lois de probabilité, de probabilité « pure » sans aucun mécanisme causal sous-jacent et ignoré⁶⁰."

Une seconde rupture a lieu à la même époque avec la théorie de la relativité restreinte en 1905 par Albert Einstein⁶¹. Posant la vitesse de la lumière comme vitesse limite infranchissable et s'appuyant sur "la transformation de Lorentz⁶²"⁶³, sa théorie unifie la masse et l'énergie, raccourcit l'espace et dilate le temps. En 1915, il étend celle-ci à la relativité générale, qui remplace la notion de force gravitationnelle par une courbure de l'espace-temps. Et il faut bien voir que si "la Relativité restreinte « était dans l'air » en 1905, au contraire, la Relativité générale ne pouvait aboutir que par l'effort unique d'une pensée aussi hardie qu'originale⁶⁴." C'est ainsi la ruine de la mécanique newtonienne qui sera alors réfutée par des expériences ultérieures⁶⁵. La relativité restreinte prédit un ralentissement des horloges en mouvement⁶⁶, la relativité générale l'écartement du périhélie⁶⁷ de Mercure, la déviation de photons autour du Soleil, le "décalage vers le rouge des raies spectrales dans un champ de gravitation⁶⁸", et plus récemment l'avancée technique a permis la détection d'ondes gravitationnelles⁶⁹. L'univers, pensé par Giordano Bruno et Isaac Newton, à trois dimensions et infini n'est plus tenable et Paul Couderc indique que "Einstein montra en 1917 que seule [une] solution convenait au problème tel qu'il l'avait posé⁷¹" : "espace *sphérique* à courbure constante positive, qui est *fermé* (qui est la paroi d'une *hypersphère*)⁷²."

⁶⁰ *Ibid.* [178, p. 142]

⁶¹ Albert Einstein, *De l'électrodynamique des corps en mouvement*, 1905. [75]

⁶² Hendrik Lorentz (1853-1928)

⁶³ Marie Antoinette Tonnelat. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 152]

⁶⁴ *Ibid.* [178, p. 154]

⁶⁵ Voir chapitre 3, p. 61.

⁶⁶ Voir Louis de Broglie, *Diverses questions de mécanique et de thermodynamique classiques et relativistes*, 1995. [43, p. 42-44]

⁶⁷ Le périhélie est le point le plus proche d'un astre par rapport à son étoile au cours de sa révolution orbitale.

⁶⁸ Marie-Antoinette Tonnelat - Jacques Lévy. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 171-172, 524-525]

⁶⁹ *Nature*, 11 février 2016. [45] Ce fait confirme en même temps l'existence des trous noirs dont encore quelques physiciens doutaient (et dont Albert "Einstein lui-même a entretenu les plus grands doutes à leurs propos⁷⁰").

⁷⁰ Pierre Binétruy, *À la poursuite des ondes gravitationnelles*, 2015. [28, p. 123]

⁷¹ Paul Couderc. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 595]

⁷² Albert Einstein précise que "le monde réel s'écartera dans le détail de la forme sphérique, il sera quasi sphérique. Mais il devra être nécessairement fini. La théorie fournit même une relation simple entre l'étendue spatiale du monde et la densité moyenne de la matière." In Albert Einstein, *La théorie de la relativité restreinte et générale*, 1916. [74, p. 46] Le "quasi sphérique" dépend de la répartition de la matière dans l'univers et la courbure n'est constante que sous condition statique, c'est à dire que la "métrique" ne varie pas au cours du temps.

En 1961, René Taton affirme : "Au xx^{ème} siècle le rythme du progrès des mathématiques s'est accéléré d'une façon telle qu'il est aujourd'hui impensable qu'un mathématicien puisse suivre le progrès des diverses branches de cette science⁷³." Néanmoins, il y a une "solidarité de toutes les parties de la science mathématique et cette pénétration mutuelle de l'analyse et de la physique⁷⁴." Témoin la relativité restreinte qui s'appuie sur les lois de Lorentz et de Maxwell-Hertz, et si Marcel Grossmann (1878-1936) a soutenu Einstein dans la formulation de la relativité générale, c'est à David Hilbert (1862-1943) qu'on en doit l'infrastructure. La mathématique ressent aussi le besoin de "fonder une « topologie » des « espaces abstraits »⁷⁵." Celle-ci va permettre, entre autre, aux physiciens d'avoir un outil conceptuel, notamment en "physique théorique et calcul symbolique (« fonction » de Dirac⁷⁷)⁷⁸." Ce qui, partant des espaces de Sobolev⁷⁹, va amener Laurent Schwartz (1915-2002) à formuler la théorie des distributions et être le premier Français à obtenir la médaille Fields en 1950 pour ces travaux⁸⁰. En théorie des probabilités, Émile Borel (1871-1956) va en donner une définition rigoureuse et Andreï Kolmogorov (1903-1987) une présentation rigoureuse en 1933⁸¹. Ainsi, les mathématiciens, en proposant des théories abstraites, vont fournir aux physiciens des outils conceptuels avec de nombreuses applications.

Le xx^{ème} siècle est un siècle mouvementé, fait de crises économiques majeures et qui a connu deux guerres mondiales. Et si, en sa première moitié, les sciences ont connu des progrès rapides, l'art va développer une multiplicité de courants. À commencer par le fauvisme, qui fait suite à l'impressionnisme, en s'attachant aussi à la couleur, mais sous la forme de l'expression. Depuis la fin du xix^{ème} siècle, les progrès techniques ont amélioré et facilité l'usage de l'appareil photographique noir et blanc, symbole de précision et de fixation de l'instant. À l'inverse le fauvisme va chercher la couleur pure, expressive, et déposer la peinture par touches, de plus en plus épaisses et étendues, s'éloignant ainsi du détail. Dans ce groupe, Henri Matisse (1869-1954) va devenir l'un des plus influents peintres du siècle. La peinture devient de moins en moins représentation du monde réel, elle va se diriger vers l'abstraction. Historiquement, c'est Vassily Kandinsky (1866-1944) qui est considéré comme un des premiers à franchir le pas entre 1910 et 1913 (mais

⁷³René Taton, *op. cit.* [177, p. 123]

⁷⁴Maurice Janet. *In* René Taton, *op. cit.* [178, p. 63]

⁷⁵Maurice Fréchet. *In* René Taton, *op. cit.* [178, p. 72]

⁷⁶De nouvelles formes de fonctions, dites de transformation, sont apparues dès le siècle précédent, s'attachant non pas à des nombres ni à des points d'un espace à n dimensions, mais de nature quelconque.

⁷⁷Paul Dirac (1902-1984). La « fonction » de Dirac, aussi appelée "impulsion idéale", est une fonction nulle sur \mathbb{R} sauf en un point et dont l'intégrale sur \mathbb{R} vaut 1, ce qui n'est pas permis en analyse classique.

⁷⁸*Ibid.* [178, p.75]

⁷⁹Sergueï Sobolev (1908-1989).

⁸⁰Laurent Schwartz est aussi connu pour ses prises de positions politiques du côté des trotskystes.

⁸¹Georges Darmon et Daniel Dugué. *In* René Taton, *op. cit.* [178, p. 85]

d'autres courants y parviennent par une approche différente⁸²). Il écrira "la question de l'art n'est pas celle de la forme, mais du contenu artistique⁸³."

⁸²À l'instar de František Kupka (1871-1957), Piet Mondrian (1872-1944), Kasimir Malevitch (1879-1935) et Robert Delaunay (1885-1941).

⁸³Dans un Almanach avec Franz Marc (1880-1916) en 1911. In Centre Pompidou, *Dossiers pédagogiques - Collections du musée*. [136] <http://mediation.centrepompidou.fr/education/ressources/ENS-kandinsky-mono/ENS-kandinsky-monographie.html>



FIGURE 2.8 : Pablo Picasso : portrait d'Ambroise Vollard (1910)

Grande figure du xx^{ème} siècle, Pablo Picasso (1881-1973) va, à l'instar d'autres artistes, suivre et développer plusieurs courants, sur différentes périodes. Repéré très jeune (il est fils de peintre), il entre dès 16 ans à l'Académie royale de Barcelone pour y suivre une formation classique⁸⁴. À l'opposé du fauvisme il entame, dans un premier temps, une période bleue (1901-1904), symbole de tristesse et de mélancolie. Puis une rose (1904-1906), à l'opposé de la bleue, puis sa réflexion se tournera vers la notion d'espace. Avec Georges Braque (1882-1963), il est l'initiateur du cubisme analytique. L'espace est représenté, il n'y a pas de vide, le sujet est d'égale importance que l'environnement. Ainsi, il découpe le tableau en morceaux de matière par des formes géométriques. Chaque partie a sa part d'ombre et de lumière, pourtant, par exemple avec le *Portrait d'Ambroise Vollard* (Figure 2.8), le sujet ressort malgré tout. Après quoi, il introduit les collages, matière extérieure dans la peinture, décomposition puis reconstruction. Ses peintures et ses sculptures montrent des objets sous différents angles de vue, en même temps. S'il marque un retour au classicisme, il sera ensuite influencé par le surréalisme et enfin s'engagera politiquement, suite au bombardement de Guernica en 1937, en adhérant au parti communiste en 1944. Il laisse une multitude d'œuvres, aussi bien en peinture, sculpture, gravure, dessin, qui influenceront aussi bien ses contemporains que ses successeurs.

⁸⁴Les données historiques peuvent être retrouvées sur le site du Centre Pompidou, *Dossiers pédagogiques sur les collections du Musée national d'art moderne*. [130] <http://mediation.centrepompidou.fr/education/ressources/ENS-PICASSO/ENS-picasso.html>

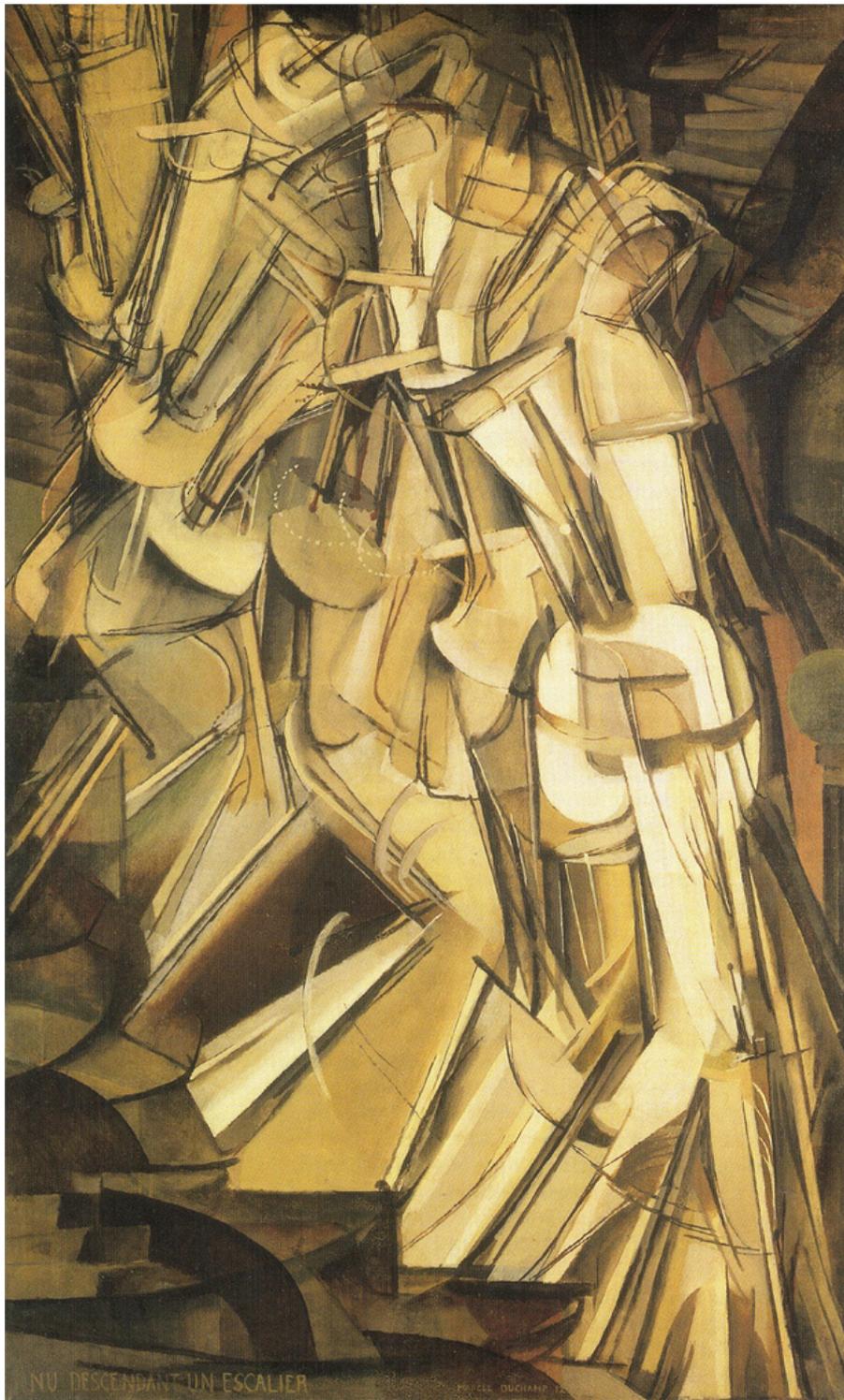


FIGURE 2.9 : Marcel Duchamp : Nu descendant un escalier n° 2 (1912)

Autre grand nom du xx^{ème} siècle, Marcel Duchamp (1887-1968) va aussi participer à révolutionner l'art. À contre-courant mais dans le mouvement, il se définit lui-même comme anartiste. Son tableau cubiste, *Nu descendant un escalier n° 2* (Figure 2.9), présente une double opposition. Premièrement, il présente le mouvement, contrairement au cubisme qui s'occupe de l'espace, ce qui lui vaudra d'être refusé au Salon des Indépendants. Enfin, sa présentation à l'Armory Show de New York en 1913 le célèbrera tout en faisant scandale. En effet, le nu classique est un genre qui a ses codes. En particulier le nu est un nu posé. Ici, c'est le mouvement d'une femme nue descendant un escalier, mais qui peut bien faire cela ? Ce ne peut être qu'une situation obscène ou tarifée. Les références semblent assez évidentes, les formes et les différents jaunes font penser à un mannequin en bois, et le mouvement à l'étude de Muybridge⁸⁵, *Femme descendant un escalier*⁸⁶. Mais la plus grande révolution initiée par Marcel Duchamp est le *ready made*, à l'origine de l'art contemporain et de la "fin" de la peinture. S'opposant à l'establishment, il présente en 1917 *Fontaine*, urinoir simplement posé, exposé. D'abord refusée (il y avait apposé le nom d'un inconnu) son œuvre sera reconnue une fois que l'on saura de qui elle venait. D'où un questionnement sur ce qu'est une œuvre d'art. Ici, l'œuvre est telle parce qu'elle a été reconnue comme telle, c'est l'intentionnalité qui a été adoubee. Plus important encore, cette forme d'expression montre de manière originale "sa compréhension de la relativité"⁸⁷.

⁸⁵Eadweard Muybridge (1830-1904).

⁸⁶Série de photographies noir et blanc d'une femme nue descendant un escalier, 1887. Mais aussi à Étienne-Jules Marey (1830-1904), *Locomotion humaine*, 1870, photographies superposées qui recomposent la marche. In Marie-José Rodriguez, *Marcel Duchamp. La peinture même. Dossiers pédagogiques du Centre Pompidou*, 2014. [157] Jean-Pierre Changeux dans *Raison et Plaisir* (2002) précise l'influence de Marey. [47, p. 178]

⁸⁷Don Foresta, *Mondes Multiples*, 1991. [88, p. 50]



FIGURE 2.10 : Max Ernst : La Vierge corrigeant l'enfant Jésus devant trois témoins : André Breton, Paul Éluard et le peintre (1926)

Face à l'atrocité de la première guerre mondiale, il y a une remise en cause de toutes les valeurs, qu'elles soient morales, politiques, idéologiques, religieuses ou esthétiques. Un mouvement naît alors en Suisse en 1916, Dada, qui va prôner la non-conformité par l'absurde, jusqu'à l'extravagance, et se répandre en Europe. Philippe Soupault (1897-1990), par exemple, présentera son œuvre *Portrait d'un imbécile*, constituée simplement d'un miroir, au salon Dada de 1921. De là va se développer le mouvement surréaliste, officiellement par la parution du *Manifeste du surréalisme* d'André Breton (1896-1966) en 1924⁸⁸. Si la réflexion porte sur les mêmes thèmes, le "non-conformisme absolu"⁸⁹, le surréalisme s'appuie sur l'inconscient et le monde des rêves, suivant les travaux de Sigmund Freud (1866-1939) sur la psychanalyse. Ce mouvement se doit d'être "un moyen de libération totale de l'esprit"⁹⁰. En littérature, en art plastique tout comme en peinture, nombre d'artistes vont, au moins sur une période, adhérer à ce courant. Parmi les plus influents, Max Ernst (1891-1976) propose *La Vierge corrigeant l'enfant Jésus devant trois témoins* (Figure 2.10). N'ayant pas lui-même commenté son tableau, il convient d'observer une certaine prudence sur l'interprétation. Néanmoins, il est clair qu'en perdant son auréole, l'enfant Jésus perd sa divinité pour devenir humain. Le tableau en est-il pour autant blasphématoire ? La question est délicate car aucun texte sacré ne parle de l'enfance de Jésus. Max Ernst va aussi s'attacher à reprendre et développer lui-même différentes pratiques artistiques, comme le grattage⁹¹, la décalcomanie et l'oscillation⁹², précurseur en cela du dripping de Jackson Pollock (1912-1956).

En Amérique, l'exposition de 1913, l'Armory Show à New York, va, par son ampleur (plus de 1 500 œuvres, dont un tiers venant d'Europe), redynamiser le marché de l'art. En parallèle, une industrialisation effrénée va mener à une surproduction jusqu'à la crise de 1929⁹³. Dans le même temps, le développement de monocultures industrielles va appauvrir les sols jusqu'à une désertification qui mène, dans les années 30, au plus grand exode rural qu'ait connu les États-Unis. Franklin Delano Roosevelt (1882-1945) dira "une nation qui détruit son sol se détruit elle-même"⁹⁴. En art, se développe un mouvement socio-réaliste qui dépeint la misère humaine. D'un autre côté, se forme l'American Abstract Artists (1936-1940), influencé par l'art abstrait venu d'Europe, mais aussi par le cubisme. Ce mouvement va mener à l'expressionnisme abstrait, avec une prépondérance de tableaux grand format. L'idée est d'apporter un effet émotionnel puissant et direct sur le spectateur. Si en Russie Kasimir Malevitch (1878-1935) fonde le supréma-

⁸⁸ André Breton, *Manifeste du surréalisme*, 1924. [37]

⁸⁹ *Ibid.* [37, p. 63]

⁹⁰ Déclaration surréaliste du 27 janvier 1925. In *La Vierge corrigeant l'enfant Jésus devant trois témoins (1926) par Max Ernst*, Sociétés & Représentations 1, n° 27, 2009. [168]

⁹¹ Plusieurs couches de peintures sont apposées sur la toile avant un grattage qui va permettre de retrouver les couches antérieures.

⁹² Ernst utilise un sceau percé d'un trou qu'il va faire osciller au-dessus de la toile.

⁹³ Étant entendu que c'est la conjugaison de plusieurs facteurs qui amène à la crise, entre autres la réduction de la demande européenne, ou encore la multiplication des crédits.

⁹⁴ A *Presidential Statement on Receipt of the Award of the Schlich Forestry Medal*, 29 Jan. 1935. In *Public Papers of the Presidents of the United States : F.D. Roosevelt, 1935, Volume 4 (1938)*, p. 65.

tisme, avec *Carré noir sur fond blanc* en 1915, suivi de *Carré blanc sur fond blanc* en 1918, en Amérique, l'abstraction ira jusqu'à l'effacement des formes. En témoin Mark Rothko (1903-1970) avec le colorfield painting, variations de quelques couleurs sans bordure nette. Enfin, Jackson Pollock, avec le dripping, va introduire un nouvel effet où il n'y a plus de point focal. L'œil ne peut plus se fixer, il est amené à un mouvement. La peinture ne donne plus rien à voir, elle offre une impression.

Pour revenir aux sciences, il est un fait marquant qu'à partir du début du xx^{ème} siècle, il y a apparition du besoin d'un "équipement sans cesse plus coûteux requis par la poursuite des travaux de recherche"⁹⁵. En particulier en physique des particules et en astronomie, où il y a une nécessité de construire des appareils de plus en plus précis. Cet effort budgétaire sera le plus marqué lors des deux guerres mondiales. Pour la première sur le "perfectionnement du radar", et pour la seconde, aux États-Unis, on en arrive à un point où "la somme dépensée pour la mise au point des premières bombes nucléaires, de l'ordre de deux milliards de dollars, dépassait le total de toutes les subventions fédérales précédemment accordées à la recherche scientifique et technique"⁹⁶. Alors qu'en France en 1939 des travaux sur la possibilité de réactions nucléaires en chaîne "contrôlables" ont été interrompus, "l'intérêt porté à la libération de l'énergie atomique ne devait être connu qu'en 1945, au moment de l'emploi des deux premières bombes atomiques sur Hiroshima et Nagasaki"⁹⁷. Cependant, "grâce à ces différents facteurs"⁹⁸, la recherche en chimie minérale prit une vigueur qu'elle n'avait pas connue depuis longtemps"⁹⁹. Au point d'en arriver à "découvrir", ou plutôt produire les éléments manquants du tableau périodique en 1947 (puis en 1961 pour les éléments au-delà de l'uranium¹⁰⁰). Enfin, les années 50 seront celles de la "découverte" de nombreuses particules et antiparticules (prédites par Paul Dirac dès 1928¹⁰¹).

En résumé

Le début du xx^{ème} siècle annonce le triomphe de l'atomisme et la physique quantique, appuyée par des lois de probabilité « pure », ébranle la vision déterministe de la physique. La mathématique, avec ses théories abstraites, fournit à la physique des outils conceptuels qui renversent la physique classique. La relativité restreinte et générale d'Einstein

⁹⁵René Taton, *op. cit.* [178, p. V]

⁹⁶Everett Mendelson. *In* René Taton, *op. cit.* [178, p. 920]

⁹⁷Michel Langevin. *In* René Taton, *op. cit.* [178, p. 351-352]

⁹⁸Construction d'armes nucléaires et développement de l'industrie.

⁹⁹Aaron Ihde. *In* René Taton, *op. cit.* [178, p. 421]

¹⁰⁰*Ibid.* [178, p. 425-426]

¹⁰¹Louis Jaunau. *In* René Taton, *op. cit.* [178, p. 380-384]

en fournissent un bon exemple. Les sciences sont aussi de plus en plus spécialisées et la recherche a besoin de plus en plus de moyens financiers, jusqu'aux dépenses phénoménales destinées à la construction des deux premières bombes atomiques. En art, la photographie noir et blanc, symbole de détail, se répand. En opposition, à la suite de l'impressionnisme, le fauvisme s'attache aussi aux couleurs mais sur leur expression (Matisse), appuyant des touches de couleurs de plus en plus étendues. Un mouvement vers l'abstraction se fait jour (Kandinsky), puis aux États-Unis avec l'expressionnisme abstrait et en Russie avec le suprématisme. Picasso enchaîne les périodes et fonde le cubisme avec Braque. Après l'atrocité et l'absurdité de la première guerre mondiale, le mouvement Dada apparaît en Suisse. S'ensuit le surréalisme qui s'appuie sur l'inconscient et la psychanalyse. Enfin, Duchamp révolutionne la notion même d'œuvre d'art avec le *ready made*.

2.4 Ère numérique

À la fin des années 50, l'art va connaître une multiplication de courants et d'artistes. C'est pourquoi cette section se limitera à quelques grandes lignes. On peut néanmoins dégager quelques tendances. Allan Krapow (1927-2006), créateur du *happening* en 1958, s'intéresse à l'art-vie ou art non art. Il distingue "l'art semblable à l'art" à "l'art semblable à la vie." Il dira : "Duchamp est d'une façon très claire un des moteurs, une des clés de ce passage de cette notion de l'art comme art à la notion de la vie comme art¹⁰²." S'appuyant sur des objets du quotidien, des objets trouvés dans la rue, des rebuts, il façonne des espaces où le spectateur change de rôle, il devient "acteur." Ce que l'on peut aussi remarquer avec les "environnements", comme *Yard* en 1961, où l'œuvre est un entassement de pneus d'automobiles. Le spectateur est alors invité à escalader (ou non) celui-ci. Accumulation que l'on retrouve aussi chez Arman¹⁰³, comme le célèbre *Home sweet home* en 1960, composé d'une multitude de masques à gaz. Cette démarche ouvre aussi la voie aux "performances", comme Jim Dine avec *I love what I'm doing* en 1960, où l'auteur se met en scène en buvant de la peinture. Il n'y a plus de tableau, ni même de matérialité ; l'œuvre, c'est lui en action.

En 1960, il y a constitution d'un groupe, les nouveaux réalistes, avec des artistes comme Arman, Yves Klein (1928-1962) ou encore Jean Tinguely (1925-1991). À une époque inondée par la surconsommation, leur démarche vise à cette prise de conscience. Arman, connu pour ses accumulations, va jusqu'à ramasser des détritiques dans les pou-

¹⁰²Jacques Donguy. *Inter : art actuel*. Allan Kaprow 1927-2006 créateur du happening. N° 95, hiver 2007. [72, p. 84-85]

¹⁰³Armand Fernandez (1927-2005).

belles des Halles à Paris pour en faire des œuvres, en les plaçant, jusqu'à saturation, dans un conteneur en plastique transparent (*Poubelle*, 1959). Ou encore *Long Term Parking* (Figure 2.11), des voitures coulées dans du béton en une tour de près de vingt mètres de haut, laissant à penser à une fossilisation. Yves Klein, lui, réduit la peinture à une couleur et fera des propositions monochromes, et plus spécialement encore un bleu particulier, l'IKB (*International Klein Blue*). Il poussera le réductionnisme jusqu'à l'exposition en 1958 de *La spécialisation de la sensibilité à l'état matière première en sensibilité picturale stabilisée*, *Le Vide* où la galerie est entièrement vide. Arman lui répondra par l'exposition *Le Plein* en 1960, où cette même galerie est entièrement remplie de débris et où il n'est ainsi même plus possible d'entrer.

Parmi les nouveaux réalistes, Jean Tinguely se distingue dans son approche avec la fabrication de machines à partir d'objets de récupération. En un sens, il redonne vie non seulement à ces objets qui l'avaient perdue, mais aussi à ses œuvres qui, quand bien même n'ont que peu ou pas d'utilité pratique, sont en mouvement. Il crée des séries de méta, dont en 1959 la série des *Méta-matics*, qui peuvent produire plusieurs "peintures abstraites" où chaque résultat sera unique¹⁰⁴. À l'image de ses autres pièces, elle est aussi inutilement compliquée. Ce que l'artiste donne à voir et à penser, c'est l'antithèse de ce que représente alors la machine industrielle et le productivisme. Avant-gardiste et à contre-courant, il ira jusqu'à produire des machines autodestructrices, art éphémère dénonçant l'emprise de la machine sur l'homme ainsi que sa déshumanisation. Il participera par la suite à des œuvres collectives, dont "Nana" avec Niki de Saint Phalle (1930-2002) en 1966. Sculpture monumentale représentant une femme allongée dans laquelle les spectateurs sont invités à entrer et où sont installées des machines.

¹⁰⁴Un crayon, un feutre ou une craie est fixé à la *Méta-matic* qui va "dessiner" des traits où plusieurs motifs vont pouvoir se répéter.



FIGURE 2.11 : Arman : Long Term Parking (1982)

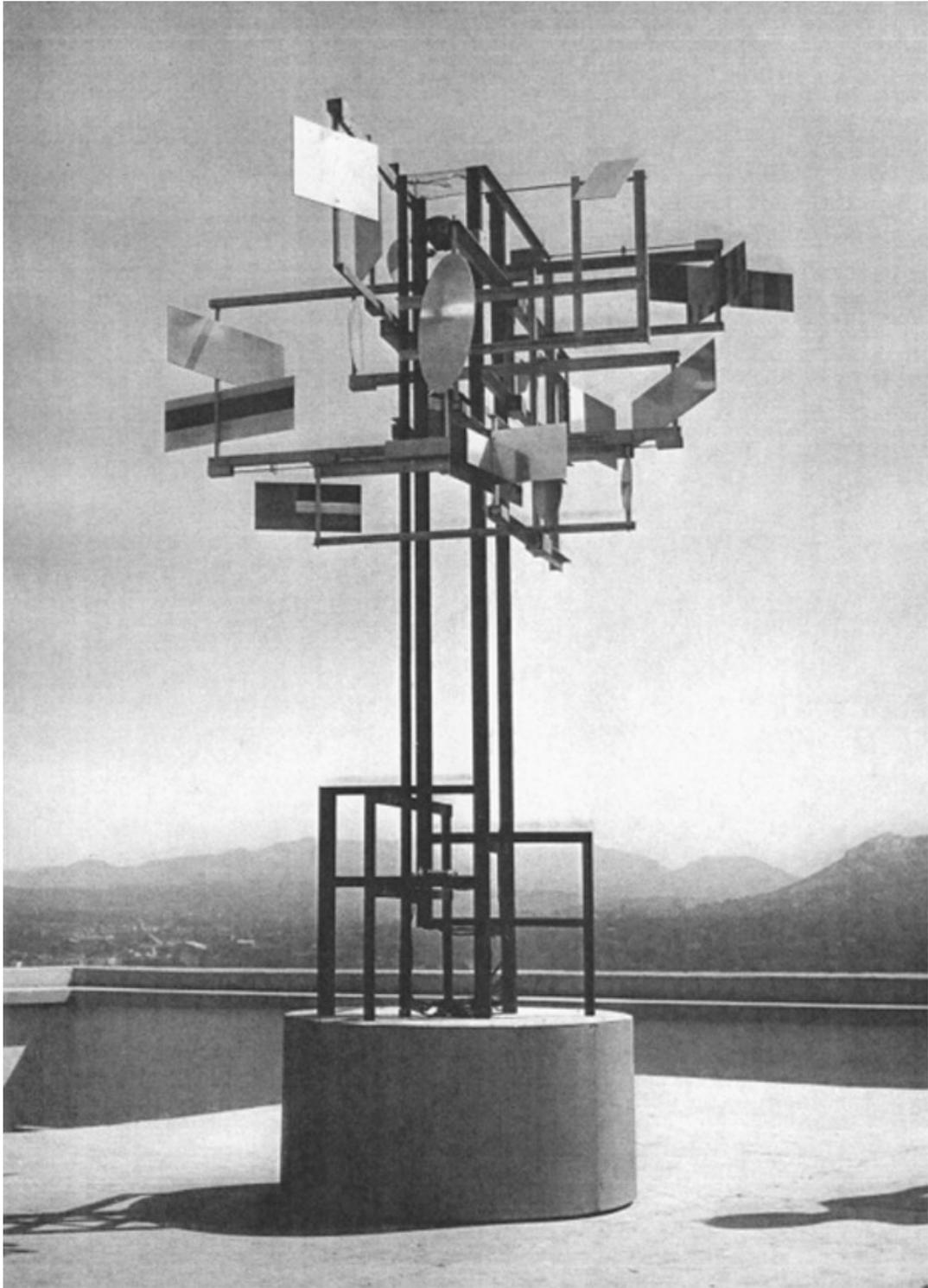


FIGURE 2.12 : Nicolas Schöffer : Tour cybernétique (1956)

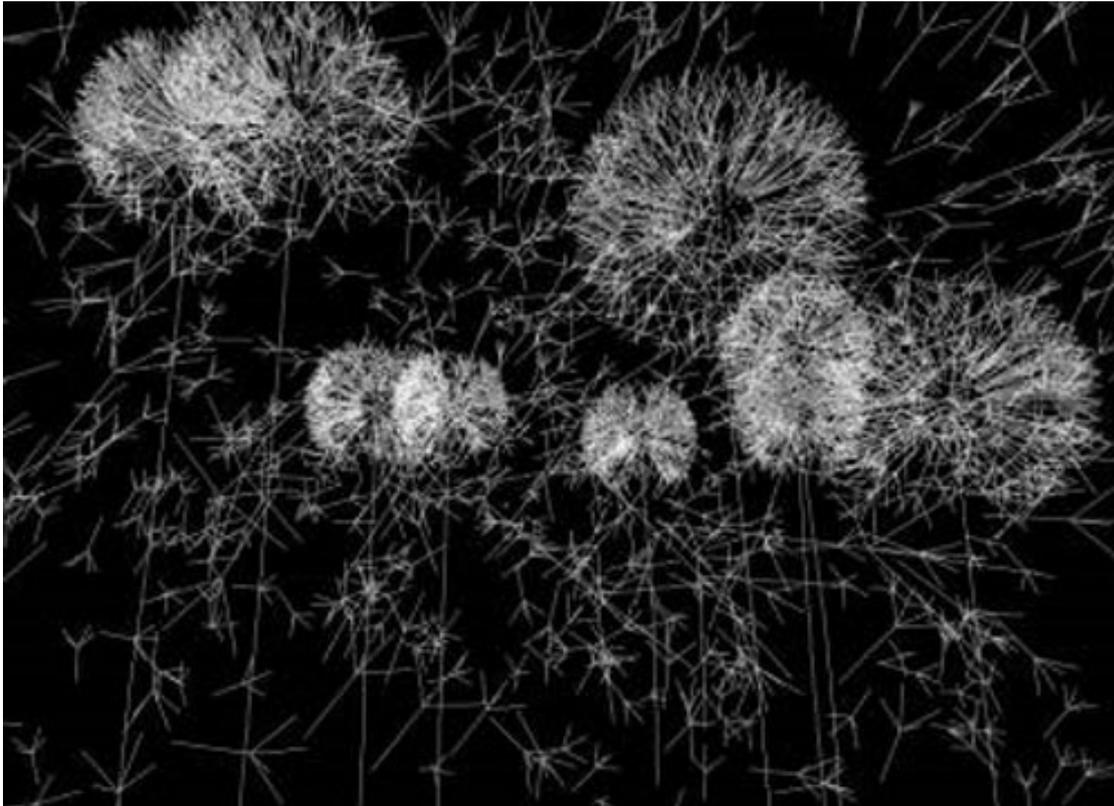


FIGURE 2.13 : Edmond Couchot et Michel Bret : Les pissenlits (1988-2005)

Enfin, c'est en 1956 que fut exposée la première sculpture cybernétique autonome, *The dancing robot CYSP 1* (Figure 2.12) de Nicolas Schöffer (1912-1992), ce qui fera de lui le "père de l'interactivité." Munie de capteurs et d'un dispositif électronique¹⁰⁵, cette œuvre interagit avec le son et la lumière, faisant tourner ses multiples panneaux tout en se déplaçant sur le toit (ici de la "Cité radieuse" à Marseille). Une démonstration sera ensuite faite à Paris, accompagnée de danseuses. On voit ainsi apparaître la question de l'autonomie de l'œuvre, de l'interactivité, "offrant aux spectateurs un spectacle toujours varié et différent¹⁰⁶." Idée reprise dans la démarche d'Edmond Couchot et Michel Bret dans *Les Pissenlits* (Figure 2.13), mais cette fois de façon virtuelle. Le spectateur est invité à souffler pour faire s'envoler les ombelles qui retombent doucement au sol avant de renaître sur la fleur. C'est l'avènement de l'ère numérique qui sera suivi par la seconde interactivité, au sens d'Edmond Couchot¹⁰⁷. Idée essentielle qui sera développée au long de ce manuscrit.

¹⁰⁵Le magazine *Science et Vie* de septembre 1956 emploie le terme de "cerveau électronique." (p. 65)

¹⁰⁶Nicolas Schöffer, *documents d'archives*, 1956.

¹⁰⁷Edmond Couchot, Norbert Hillaire, *L'art numérique. Comment la technologie vient au monde de l'art*, 2003. [56]

En sciences, après la détection ou plus précisément la construction des derniers éléments chimiques du tableau de Mendeleïev, il y a d'une part, conséquemment à la guerre froide, une volonté de conquérir l'espace (la guerre des étoiles), et d'autre part, une tentative d'unification en théorie quantique. Cependant, on assiste à une sur-spécialisation, une "hyper-spécialisation"¹⁰⁸ de l'ensemble des branches de la science. Mais cela n'a aucunement facilité les avancées proprement dites. Au contraire, comme le signalent aussi bien Christian Magnan que Paul Feyerabend, "[à partir de 1965¹¹²], la science n'a plus fait aucune découverte majeure¹¹³", et "la physique subit maintenant une période de stagnation où un formidable accroissement de volume couvre une stupéfiante pauvreté de nouvelles idées fondamentales¹¹⁴." Cependant, on peut noter la "confirmation" des prédictions de la théorie de la relativité d'Einstein (voir p. 43 et note 69), ainsi que d'énormes applications techniques, appuyées par un développement fulgurant des télécommunications. Ainsi les performances des ordinateurs continuent d'augmenter et les satellites se perfectionnent.

En physique quantique, un intérêt particulier est porté sur l'intégration de la gravitation dans la théorie. Cette tâche pharaonienne a mobilisé des ressources inouïes pour parvenir, en 2012, à la détection d'un boson de Higgs. Véritable révolution pour le "modèle standard" en physique, obligeant à remettre en cause les notions de symétrie dans celui-ci. Yves Sirois ajoute ainsi : "il est possible que ce que nous avons découvert ne soit que le premier élément d'un continent beaucoup plus vaste et fascinant¹¹⁵." Mais quant à une unification totale des théories, cela représente un défi à part entière. Si elle a amené à la formulation de la théorie des cordes, elle impose une remise en cause complète de l'approche. "À bout de souffle, un physicien théoricien en arrive à devenir mathématicien faute de mieux¹¹⁶" nous dit Alain Connes. Néanmoins cette théorie reste de l'ordre de la spéculation pure et ainsi Stephen Hawking se refuse même d'en discuter car "la théorie des cordes [...] n'a jamais fait de prédiction vérifiable¹¹⁷." Alain Connes précise même qu'il s'agit là d'une impossibilité¹¹⁸. En outre, d'autres théories vont voir le jour,

¹⁰⁸Notion largement employée par de nombreux auteurs, dont Edgar Morin¹⁰⁹. Michel Morange parle même d'une "extrême spécialisation"¹¹⁰. René Taton déjà confirmait cette tendance depuis le début du XX^{ème} siècle¹¹¹.

¹⁰⁹Edgar Morin, *Les sept avoirs nécessaires à l'éducation du futur*, 1999. [133, p. 18] Edgar Morin, *La Voie. Pour l'avenir de l'humanité*, 2011. [134, p. 292]

¹¹⁰Michel Morange, *op. cit.* [129, p. 40]

¹¹¹René Taton, *op. cit.* [178, p. V]

¹¹²1965 correspondant à la découverte **fortuite** du rayonnement du fond diffus cosmologique, appuyant l'idée du *Big Bang*, aujourd'hui acceptée par l'ensemble de la communauté d'astrophysique.

¹¹³Christian Magnan, *op. cit.* [122, p. 184]

¹¹⁴Paul Feyerabend, *op. cit.* [79, p. 62-63]

¹¹⁵*Les mystères de la matière. Particule de Dieu : 2 ans après sa découverte, le boson de Higgs livre quelques secrets mais en recèle encore de nombreux.* In Atlantico, 5 juillet 2014. [170]

¹¹⁶Alain Connes. In Jean-Pierre Changeux, Alain Connes, *Matière à pensée*, 1989. [49, p. 81]

¹¹⁷Stephen Hawking, Roger Penrose, *Nature of Space and Time*, 2010. "String theory [...] has not made any testable predictions." [99, p. 2]

¹¹⁸Alain Connes. In Jean-Pierre Changeux, Alain Connes, *op. cit.* [49, p. 82]

en particulier en cosmologie, mais d'un genre purement spéculatif, matière sombre et énergie sombre en sont les exemples les plus significatifs.

En résumé

En art il y a une multiplication des courants et des artistes. En particulier, dans les "environnements" le spectateur change de rôle, il devient "acteur." Avec les "performances" l'artiste lui-même peut aussi se mettre en scène. Avec les nouveaux réalistes, on trouve une réflexion sur le productivisme et la société de surconsommation. Arman avec ses accumulations, Tinguely et ses machines aussi compliquées qu'inutiles. Enfin, arrive la notion d'interactivité et d'autonomie avec la cybernétique, ouvrant la voie à la virtualité. En science, à part l'idée de *Big Bang*, il n'y a aucun bouleversement flagrant. L'hyper-spécialisation de chacune de ses branches conduit à des avancées technologiques sans remise en cause fondamentale et la volonté d'unification amène à une théorisation d'ordre purement spéculatif.

*Le vrai n'est pas plus sûr que
le probable.*

Diogène Laërce

3

Art, Science, parallèle ou réflexivité ?

3.1 Science et "vérité"

Avant d'aborder le sujet d'une quelconque détermination de l'art ou de la science, il convient d'apporter une précision nécessaire concernant le cas très particulier de la mathématique. Si elle a été (et est toujours) un outil incontournable pour la science, elle en est entièrement autonome, du moins dans une certaine mesure¹. Car fondamentalement, la mathématique n'a aucun lien ou rapport avec la nature ou une quelconque idée de réalité ou même de vérité. En témoigne Henri Poincaré, "les mathématiciens n'étudient pas des objets mais des relations entre les objets [...]. La matière ne leur importe pas, la forme seule les intéresse²." Ou encore Gaston Bachelard : "en somme l'algèbre amasse toutes les relations et rien que les relations³." Et Poincaré de préciser que "la géométrie n'est

¹Marcel Paul Schützenberger note en effet que "les mathématiques appuyées sur la physique constituent 80% des mathématiques, par conséquent elles procèdent à 80% de l'analyse. Le reste est marginal. C'est un fait historique." *In* Alain Connes, André Lichnerowicz, Marcel Paul Schützenberger, *Triangle de pensées*, 2000. [52, p. 120]

²Henri Poincaré, *op. cit.* [149, p. 28]

³Gaton Bachelard, *op. cit.* [10, p. 32]

pas vraie, elle est avantageuse⁴. " La mathématique est un langage possédant sa logique propre. Et l'"on sait depuis Gödel⁵ qu'un système logique ne peut suffire à sa propre description⁶. " Elle peut même se targuer de définir et d'utiliser des notions purement abstraites comme les nombres réels, les imaginaires, l'infini et par suite la continuité, qui dans chaque cas n'ont strictement rien à faire en sciences physiques, s'occupant de mesures⁷.

Si, sans prendre trop de risque, on peut dire que la science s'attache à une description du monde, la mathématique lui permet de modéliser des théories. Mais il est des notions dont il faut prendre une extrême précaution, sous peine de perdre le caractère scientifique de ces théories. Qu'une théorie précède ou non les observations, celles-ci se font sous forme de mesures, ses valeurs sont donc recueillies sous formes de nombres, décimaux ou non, avec une certaine marge d'erreur. Mais en aucun cas il ne peut s'agir de nombres réels non rationnels, qui correspondraient alors à une précision "illimitée". Ainsi, "utiliser l'infini en physique est une faute professionnelle grave⁹. " Plus encore, "l'apparition de l'infini dans une théorie signale que cette théorie est incomplète¹⁰. " Non seulement l'infini n'est pas un nombre, mais son introduction implique immédiatement l'invérifiabilité¹¹ de la théorie, ce qui la rend non scientifique. Comme le rappelle justement Christian Magnan : "L'infini est une notion mathématique qui n'a pas d'équivalent dans le monde physique. Soutenir que notre Univers serait « infini » est absurde car cela ne signifie rien en réalité¹². " Pourtant, c'est bien la position de bon nombre d'astrophysiciens, à l'instar de Pierre Binétruy : "l'Univers est très probablement infini¹³. " On retiendra tout de même la précaution du "très probablement."

⁴Henri Poincaré, *op. cit.* [149, p. 91]

⁵Kurt Gödel (1906-1978).

⁶François Jacob, *La logique du vivant*, 1970, Paris, p. 337. In Jean-Pierre Changeux, Alain Connes, *op. cit.* [49, p. 206]

⁷Comme l'indique Serge Haroche, "une observable physique n'existe, n'est réelle, que si elle est mesurée." In Jean-Pierre Changeux, *La vérité dans les sciences*, 2003. [98, p. 100-101] Mais déjà aussi Henri Bergson, "la science n'opère que sur des mesures⁸."

⁸Henri Bergson, *Durée et simultanéité. À propos de la théorie d'Einstein*, 1922. [21, p. 8]

⁹Christian Magnan, *op. cit.* [122, p. 242]

¹⁰*Ibid.* [122, p. 244]

¹¹Une théorie physique n'est pas à proprement parler "vérifiable" mais l'introduction de l'infini empêche toute mesure comparative.

¹²Blog de Christian Magnan, *lacosmo*, <http://www.lacosmo.com/> et plus particulièrement <http://www.lacosmo.com/infini.html>

¹³Pierre Binétruy, *op. cit.* [28, p. 113]

"Au voisinage du Soleil, l'espace n'est pas euclidien : on n'en saurait plus douter sans aveuglement obstiné. [...] Et nous, quelle raison aurions-nous de vouloir conserver un schéma d'Univers euclidien et infini, *a priori*, lorsque nous constatons que l'espace n'est pas euclidien autour de chaque étoile¹⁴."

Paul Couderc, 1964

Effectivement, malgré une représentation extrêmement simplificatrice de la géométrie de l'Univers¹⁵, Albert Einstein a permis d'écarter définitivement le modèle classique "euclidien"¹⁶ à trois dimensions infinies. Alexander Friedmann (1888-1925), reprenant ces équations, en a déduit une expansion de l'Univers, modèle qui sera retenu et soutenu par les observations. Trois solutions mathématiques sont envisageables et décrivent un Univers à rayon de courbure soit positif, soit négatif, soit nul. Cette dernière solution étant contredite par le phénomène d'expansion, l'Univers n'est pas euclidien. Une courbure positive entraîne un Univers fini, une négative un Univers potentiellement infini¹⁷. Cette valeur est liée à une valeur dite critique de densité de matière et la communauté scientifique s'accorde pour dire que la valeur "réelle" (celle que l'on mesure) en est très proche. Toutes les observations, obligatoirement locales, donnent une courbure positive, et prétendre à une courbure générale négative conduit à un modèle infini¹⁹, hors du champ scientifique. Cependant, les données les plus récentes montrent "la présence d'une petite constante cosmologique Λ positive [...] reconnue par les derniers Prix Nobel en physique²⁰." Et parmi les théories envisagées, il en est une seule qui permette de s'affranchir de la notion d'infini, la théorie des boucles. Celle-ci est basée sur une géométrie discrète non commutative où l'espace-temps se construit comme conséquence des équations. C'est ainsi la seule à ne pas introduire de variable t représentant le temps.

¹⁴Paul Couderc. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 594]

¹⁵Toutes les hypothèses sont basées sur le modèle d'un Univers homogène et isotrope, c'est à dire où la matière est partout répartie équitablement, ce qui induit un ensemble gazeux où aucune étoile, planète et encore moins galaxie ne serait possible.

¹⁶Il serait plus juste de l'appeler newtonien ou d'une autre manière. En mathématique, on parle de repère cartésien (le plus souvent orthonormé). Dans ses *Éléments* [77, axiome 11, p. 5] Euclide pose effectivement le parallélisme comme un axiome et non comme un théorème, ce qui de fait n'exclut pas d'autres géométries.

¹⁷Comme le rappellent justement Jean-Pierre Luminet et Marc Lachièze-Rey, "pour savoir si l'espace est fini ou infini, il ne suffit pas d'estimer le paramètre de densité : des hypothèses supplémentaires sont nécessaires - précisément celles de la topologie¹⁸." Un espace hyperbolique pouvant effectivement être replié sur lui-même de la même manière que la surface d'un tore par exemple.

¹⁸Jean-Pierre Luminet et Marc Lachièze-Rey, *De l'infini...* 2005. [121, p. 79]

¹⁹Aux précautions topologiques près des deux notes précédentes.

²⁰Carlo Rovelli, *De la gravitation quantique à boucles. In Images de la physique*, CNRS, 2011. [162, p. 40]



FIGURE 3.1 : Les Shadoks : "À nos hardis marins perdus dans le cosmos." (1968)

Christian Magnan en conclut que "notre Univers est fini mais sans frontière. Il n'a pas d'extérieur²¹." Pour se faire une idée de cet espace-temps d'au moins quatre dimensions, toutes finies, la représentation en deux dimensions en est la plus abordable. Elle correspond à la surface d'une sphère, où une droite est définie par un cercle délimitant

²¹Christian Magnan, *op. cit.* [122, p. 161]

une circonférence de cette sphère (géométrie sphérique). Chaque dimension est alors bien finie sans être bornée. Dans un tel espace, aussi bien en deux qu'en plus de dimensions, "si on continue tout droit, on revient au point de départ²²." Ce qui permet de comprendre comment, dans une époque très très très lointaine, le marin Shadok, par une technique des plus ingénieuses²³, a pu traverser le cosmos en bateau et retomber sur sa propre planète en continuant tout droit²⁴. Cependant, l'opinion publique était très sceptique. En témoigne l'édification d'un monument aux morts avec cette inscription : "Ga Bu Zo", que l'on peut traduire par "À nos hardis marins perdus dans le cosmos" (Figure 3.1) et ce dès après la cérémonie de départ²⁵. Ainsi la clairvoyance de Gérard Berry : "Nous devons rendre hommage aux Shadoks, bien souvent découragés mais repartant sans cesse vers un futur encore plus incertain que le présent²⁶."

Si la mathématique ne s'attache qu'à des relations sur des objets abstraits, la physique s'occupe à formuler des lois censées décrire la nature et fondées en systèmes. Que cette dernière ait pu donner un pouvoir croissant à l'homme sur la nature, cela est indéniable du fait des "avancées" technologiques qui en découlent, plus ou moins directement. Mais de considérer la science comme une "accumulation de connaissance²⁷" est une erreur malheureusement assez répandue. L'histoire montre tout le contraire. Non seulement le sens d'une catégorisation scientifique d'une théorie s'est largement modifié au fil des siècles, mais aussi la science n'évolue pas de manière linéaire et encore moins par accumulation. De plus, comme l'assure Imre Lakatos, "la philosophie des sciences sans l'histoire des sciences est vide ; l'histoire des sciences sans la philosophie des sciences est aveugle²⁸." Sur ce point, il est important de noter qu'il en est de même pour l'histoire de l'art, que l'on ne peut détacher d'une histoire de la pensée, aussi bien philosophique que scientifique.

Si, comme on l'a vu, il y a une quête du "Vrai", aussi bien dans l'idéalisme de Platon²⁹ que dans l'empirisme d'Aristote (avec l'idée immanente de causalité), il n'est plus raisonnable aujourd'hui d'affirmer, comme Emmanuel Malolo Dissakè, que "la vérité est tout à la fois le but et la justification ultime de la science³⁰." Du moins, nul physicien, mathématicien, scientifique, philosophe ou chercheur n'est en droit de le dire, au moins depuis

²² *Ibid.* [122, p. 277]

²³ Afin de pouvoir avancer dans le cosmos où il n'y avait pas d'eau, il récupérait celle à l'arrière du bateau, qui ne servait plus à rien, pour la transporter à l'avant et pouvoir ainsi la ramer. Jacques Rouxel, *Les Shadoks*, saison Un (Bu), 1968, épisode 20 (BuBuGa). [161]

²⁴ *Les Shadoks*, saison Un (Bu), 1968, épisodes 16 à 24 (BuGaGa à BuZoGa), et plus spécialement l'épisode 23 (BuBuMeu) : "L'Univers n'était pas infini, il était plutôt rond."

²⁵ *Les Shadoks*, saison Un (Bu), 1968, épisode 17 (BuGaBu).

²⁶ Gérard Berry, *Les Shadoks sont-ils décervelables ?*, 2008. [25, p. 2]

²⁷ Edmond Couchot, *op. cit.* [55, p. 269]

²⁸ Imre Lakatos (1922-1974). *Histoire et méthodologie des sciences*, 1986 [112, p. 185]

²⁹ Le Vrai, le Bon, le Bien, le Beau "en soi" étant confondus dans la philosophie de Platon.

³⁰ Emmanuel Malolo Dissakè, *Feyerabend. Épistémologie, anarchisme et société libre*, 2001. [123, p. 27]

que Karl Gödel a démontré l'incomplétude de tout système contenant l'arithmétique³¹. Seul quelque politique, manipulateur, économiste ou charlatan peut se le permettre. Il n'y a pas de vérité absolue, y a-t-il d'ailleurs quelque chose d'absolu ? Une vérité ne peut être que relative, dans une logique propre. Il est d'ailleurs intéressant à ce propos de voir la définition de cette dernière proposée par l'humoriste cynique Ambrose Bierce : "Logique, n. Art de penser et raisonner en stricte conformité avec les limites et incapacités de l'incompréhension humaine³²." Définition qui me semble bien plus appropriée et compréhensible que celle donnée par le Petit Robert (édition 2009) : "Science ayant pour objet l'étude, surtout formelle, des normes de la vérité ; « analyse formelle de la connaissance » (Piaget³³)."

Si pour les empiristes, "tous les raisonnements sur les faits paraissent se fonder sur la relation de *la cause à l'effet*³⁴", David Hume, avec ses doutes sceptiques, ira à l'encontre de l'en-soi de Platon en précisant même que "les chercheurs modernes reconnaissent que toutes les qualités sensibles des objets telles que dur, tendre, chaud, froid, blanc, noir, etc., sont purement secondes et qu'elles n'existent pas dans les objets eux-mêmes, mais qu'elles sont des perceptions de l'esprit sans aucun archétype ou modèle extérieur qu'elles représentent³⁵." Parmi les idéalistes quelques-uns aussi ont su marquer les esprits, tel Emmanuel Kant à propos de la pluie, confirmant par là même qu'aucune connaissance métaphysique n'est accessible à l'esprit humain³⁶.

"Non seulement ces gouttes de pluie sont de simples phénomènes, mais même leur forme ronde et jusqu'à l'espace où elles tombent ne sont rien en soi ; ce ne sont que des modifications ou des dispositions de notre intuition sensible. Quant à l'objet transcendantal, il nous demeure inconnu³⁸."

Emmanuel Kant, 1781

Ces exemples nous montrent à quel point la vision du monde se modifie au cours du temps et que le sens d'un mot comme "réalité" ou "vérité" doit bien toujours être contextualisé. Tâche d'autant plus délicate que, comme le rapporte si justement Paul

³¹Néanmoins, à une époque antérieure, la question pouvait être légitime.

³²Ambrose Bierce (1842-1913/4), *The devil's dictionary*, 1911. "Logic, n. The art of thinking and reasoning in strict accordance with the limitations and incapacities of the human misunderstanding." [27, p. 196]

³³Jean Piaget (1896-1980).

³⁴David Hume (1711-1776), *op. cit.* [102, p. 86]

³⁵*Ibid.* [102, p. 236]

³⁶Kant explicite à l'envi notre incapacité d'appréhension des choses en soi³⁷.

³⁷Emmanuel Kant (1724-1804), *Critique de la raison pure*, 1781. [106, p. 226, 290-291 par exemple (Analytique des principes, III, B et appendice)]

³⁸*Ibid.* [106, p. 99 (Esthétique transcendantale §8)]

Feyerabend, "la manière dont nous voyons l'histoire est influencée par les modèles qui nous ont hypnotisés³⁹." Mais cela confirme que la science n'est pas une accumulation de la connaissance, "l'esprit scientifique est essentiellement une rectification du savoir, un élargissement des cadres de la connaissance. Il juge son passé historique en le condamnant⁴⁰." "Quiconque observe sérieusement la réalité historique, en arrive obligatoirement à penser que la science n'approche pas l'idéal suggéré par l'image d'un processus cumulatif⁴¹." Thomas Kuhn distingue deux genres de périodes dans l'évolution de la science. Celles classifiées de "science normale", où il peut y avoir accumulation de faits ou de données, et celles révolutionnaires où une théorie est remplacée par une nouvelle. Dans ce cas, "son assimilation exige la reconstruction de la théorie antérieure et la réévaluation de faits antérieurs, processus révolutionnaire qui est rarement fait par un seul homme et jamais du jour au lendemain⁴²."

Conclusion

Au niveau de la "vérité" d'une théorie, le constat est sans appel car "jamais une théorie n'est en accord avec tous les faits auxquels elle s'applique⁴³." La science ne procède en rien d'un processus cumulatif, elle évolue en périodes entrecoupées de révolutions où un nouveau paradigme vient remplacer les anciennes croyances. Concernant la mathématique, nous ne sommes pas non plus plus avancés. Non seulement ses objets sont de pures abstractions, mais en plus elle ne peut pas se justifier par elle-même. Il lui faudrait alors un système l'englobant qui lui-même serait inconsistant. Le fait qu'une géométrie puisse être "avantageuse⁴⁴" se comprend alors par le fait qu'elle permette de résoudre de manière "simple et ingénieuse⁴⁵" certains types de problèmes mathématiques, et donner un cadre "intuitif" à une théorie physique. Généralement, on utilise une géométrie sphérique au niveau de l'Univers, une géométrie "euclidienne" au niveau local (*i. e.* à l'échelle humaine), et une géométrie hyperbolique au niveau subatomique. D'autres voies se sont ouvertes, avec un quasi monopole de la théorie des cordes⁴⁶, mais aussi avec les travaux d'Alain Connes et Dirk Kreimer en géométrie non commutative⁴⁷ ou Carlo Rovelli en

³⁹Paul Feyerabend, *La tyrannie de la science*, 2014. [82, p. 31]

⁴⁰Gaston Bachelard, *op. cit.* [10, p. 177]

⁴¹Thomas Samuel Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*, 1983. [111, p. 138-139]

⁴²*Ibid.* [111, p. 24]

⁴³Paul Feyerabend, *op. cit.* [79, p. 55]

⁴⁴Henri Poincaré, *op. cit.* [149, p. 91]

⁴⁵Le Littré parle alors de "l'élégance mathématique". Émile Littré, *Dictionnaire de la langue française. Abrégé du dictionnaire*. Paris, Hachette, 1881. Article « élégant, ante », p. 374. In Bruno Moysan, *La virtuosité*, 2014. [137, p. 179]

⁴⁶Aurélien Barrau, *Quelques éléments de physique et de philosophie des multivers*, 2007. [15, p. 66]

⁴⁷Pierre Julg, *Alain Connes : une autre vision de l'espace*. In *Images des Mathématiques*, CNRS, 2006. [104, p. 71]

théorie des boucles. Avec cet apport remarquable qui fait qu'aujourd'hui "le déterminisme et le continu, deux structures de base de la pensée classique sur la matière, sont désormais caducs⁴⁸."

3.2 Science et intentionnalités

"Les savants ne sont jamais les « génies singuliers » qu'en fait l'histoire hagiographique : ce sont des sujets collectifs qui, en tant qu'histoire collective incorporée, actualisent toute l'histoire pertinente de leur science⁴⁹."

Pierre Bourdieu, 2001

Si la science progresse par révolutions, celles-ci ne sont finalement qu'en nombre limité et l'histoire ne retient souvent que quelques noms quand une multitude de savants ont œuvré à l'édification d'une théorie nouvelle. On pourra en retenir pour principales, la mécanique classique avec Newton, l'astronomie avec Galilée, l'électromagnétisme avec Maxwell, la thermodynamique avec Boltzmann, la relativité restreinte et générale d'Einstein, la mécanique quantique avec Planck et Bohr, la cybernétique avec Wiener, et enfin la seconde cybernétique avec Heinz von Foerster. Mais, chaque révolution s'étale sur de longues périodes où à chaque fois des phénomènes de réticence se font sentir dans la communauté scientifique et même au-delà. Comme en témoigne Max Planck, "une nouvelle vérité scientifique ne triomphe pas en convaincant les opposants et en leur faisant entrevoir la lumière, mais plutôt parce que ses opposants mourront un jour et qu'une nouvelle génération, familiarisée avec elle, paraîtra⁵⁰."

Chaque révolution scientifique marque une rupture en ouvrant de nouvelles perspectives. L'exemple de Galilée est frappant, aussi bien au niveau des répercussions sur l'observation, la perception et la compréhension du monde qu'au niveau des réticences venues de l'Église. "Penser la nature comme un livre écrit en langue mathématique déchiffrable par la raison humaine, et non comme une création divine. Galilée, de manière radicale et moderne, affirme la nécessité d'une autonomie de la science qui ouvre sa propre voie⁵¹." La rupture est peut-être encore plus radicale pour la théorie quantique. Louis de Broglie s'interroge même en ces termes : "Pourquoi l'interprétation probabiliste, malgré le peu de satisfaction qu'elle fournit à notre désir instinctif de comprendre,

⁴⁸Carlo Rovelli, *Et si le temps n'existait pas ? Un peu de science subversive*, 2012. [163, p. 14]

⁴⁹Pierre Bourdieu, *Science de la science et réflexivité*, 2001 [34, p. 139]

⁵⁰Max Planck, *Scientific autobiography and other papers*. Tr. F. Gaynor. New York, 1940, p. 33-34. In Thomas Kuhn, *op. cit.* [111, p. 208]

⁵¹Michel Faucheux, *op. cit.* [78, p. 29]

a-t-elle depuis une trentaine d'années été admise par la presque totalité des physiciens (mises à part les notables exceptions constituées par Planck, Einstein et Schrödinger) ?⁵² Il est en effet question de la fin du déterminisme, mis en exergue par René Descartes dans le *Discours de la méthode*⁵³, séparant l'objet du sujet. Louis de Broglie souhaitant même revenir à "l'ancienne physique" et à "[ses] idées de 1926-27" pour proposer "une représentation claire et intelligible"⁵⁴. Tentative qui ne pourra assurément pas aboutir.

L'ambition d'unification, de formalisation scientifique de l'ensemble des savoirs sera poussée à son paroxysme par le Cercle de Vienne (1929-1936) avec pour finalité : "opérer la transmutation scientifique de la philosophie"⁵⁵. Car, "aux yeux de Carnap"⁵⁶, n'est alors doué de sens que le discours scientifique. L'inobservable ne peut être considéré comme réel⁵⁷. Parmi eux, Otto Neurath (1882-1945) ira jusqu'à unifier cohérence et vérité. Ce à quoi Moritz Schlick (1882-1936) rétorquera que la cohérence ne suffit pas, car alors toute fable serait vraie⁵⁸. S'appuyant sur les sensations élémentaires, l'idée était que toute théorie scientifique peut se réduire à une formulation logico-mathématique sur des bases observationnelles. Outre le fait même qu'une vérité physique, s'il en était, serait inatteignable, ou tout au moins nul ne pourrait alors en formuler une démonstration et donc l'affirmer comme telle, le projet du Cercle de Vienne était voué à l'échec. Néanmoins, il a eu une influence non négligeable sur les épistémologues, notamment aux États-Unis.

En particulier Karl Popper, proche du Cercle de Vienne sans jamais y adhérer, a élaboré le critère de falsifiabilité pour qualifier ou non une théorie de scientifique. Mais il préconisait de rejeter une théorie si celle-ci se trouvait contredite, ce qui est une position inacceptable en science. Car alors, par exemple, la théorie de Newton aurait dû être rejetée dès la fin du XIX^{ème} siècle, après la découverte de la déviation du périhélie de

⁵²Louis de Broglie. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 143]

⁵³René Descartes, *Discours de la méthode*, 1637 [69]

⁵⁴Louis de Broglie s'exprime explicitement : "Une telle situation rend légitime de se demander si ce ne serait pas l'interprétation formelle et purement statistique, imposée il y a trente ans à la mécanique ondulatoire, qui, en écartant toutes les images concrètes et intelligibles, serait à l'origine de nos déboires. C'est pourquoi, depuis 1952, [...] j'ai tenté de reprendre mes idées de 1926-27 qui tendent à représenter le corpuscule d'une façon concrète [...] et à obtenir ainsi une représentation claire et intelligible de l'association des ondes et des corpuscules assez analogue aux images qu'employait l'ancienne physique." In René Taton, *op. cit.* [178, p. 147]

⁵⁵Dominique Lecourt, *La philosophie des sciences*, 2001. [116, p. 42]

⁵⁶Rudolf Carnap (1891-1970).

⁵⁷*Ibid.* [116, p. 45]

⁵⁸Moritz Schlick : "Celui qui n'exige que la cohérence, sans plus, comme critère de la vérité doit tenir des contes pleins de fantaisie pour aussi vrais qu'un récit historique ou que le contenu d'un traité de chimie, à la seule condition qu'ils soient habilement inventés et exempts de contradictions." In Dominique Lecourt, *op. cit.* [116, p. 47]

Mercure⁵⁹. Et elle ne l'a pas été. Thomas Kuhn précise que "aucune théorie ne résout jamais toutes les énigmes auxquelles elle se trouve confrontée⁶⁰." Et par conséquent, aucune théorie ne devrait être acceptée. Plus encore, pour Popper, qui "reste gouverné par la physique classique⁶¹", toute théorie physique est comparable à une autre. Paul Feyerabend lui rétorquera : "une théorie physique peut paraître plus mélodieuse qu'une autre théorie physique quand elle est lue à haute voix avec accompagnement à la guitare⁶²." En témoigne le passage de la théorie classique à la relativiste⁶³, où l'on change même de cadre géométrique.

Pour en revenir à ce non-rejet de la théorie, il est important de noter que cela s'applique aussi au "modèle standard" qui fait effectivement défaut⁶⁴. Et pourtant, c'est bien celui-ci qui fait actuellement référence en physique et qui est accepté par l'ensemble de la communauté scientifique. Ainsi, si la "vérité" n'est pas du domaine de la science, celle-ci construit des modèles, qui peuvent et qui doivent être remis en cause, offrant une description plus ou moins intuitive d'une forme de "réalité." Et il s'agit bien de "constructions mentales⁶⁵" censées décrire "les lois de la nature⁶⁶." Il me semble à ce propos utile de préciser qu'alors le terme de "découverte" scientifique est abusif ou pour le moins inapproprié. Il est certes possible de rencontrer un fait inattendu, de manière fortuite, mais chaque théorie consiste en une élaboration d'un modèle abstrait, ce qui est un processus actif. Si, par exemple, certains éléments chimiques ont pu être "découverts", c'est toujours dans un cadre théorique préétabli où une place leur était potentiellement déjà accordée. En ce sens, Gaston Bachelard note aussi qu'épistémologiquement parlant, l'on va bien du "rationnel au réel⁶⁷." Toutefois nous pouvons utiliser le terme de découverte scientifique, mais uniquement à propos des conséquences, parfois inattendues, que la théorie nouvelle peut engendrer, celle-ci restant une création.

Si les expériences ne s'accordent généralement pas exactement avec les prédictions, il est un cas particulier qui mérite d'être retenu, celui de la relativité générale d'Einstein.

⁵⁹Urbain Le Verrier (1811-1877) a proposé l'existence d'une planète, Vulcain, plus proche du Soleil que Mercure, seule échappatoire pour rendre compte de cette déviation selon la théorie classique, mais alors elle aurait dû être visible en passant entre le Soleil et la Terre en 1877, ce qui ne fut pas le cas.

⁶⁰Thomas Kuhn, *op. cit.* [111, p. 202-203]

⁶¹Paul Feyerabend, *op. cit.* [79, note 2, p. 249]

⁶²*Ibid.* [79, p. 258]

⁶³"On suit donc une induction transcendante et non pas une induction amplifiante en allant de la pensée classique à la pensée relativiste." Gaston Bachelard, *op. cit.* [10, p. 46]

⁶⁴"Il se trouve que le flux observé pour [les neutrinos] est nettement plus petit que ce qui est prédit par le modèle." Roger Guesnerie. In Jean-Pierre Changeux, *op. cit.* [94, p. 190-191]

⁶⁵Paul Feyerabend, *op. cit.* [82, p. 141]

⁶⁶*Ibid.*

⁶⁷"Le sens du *vecteur* épistémologique [...] va sûrement du rationnel au réel et non point, à l'inverse, de la réalité au général comme le professaient tous les philosophes depuis Aristote jusqu'à Bacon⁶⁸." Gaston Bachelard, *op. cit.* [10, p. 8]

⁶⁸Francis Bacon (1561-1626).

D'une part par ses applications concrètes en astronomie avec l'envoi de sondes spatiales dont la concordance avec la théorie donne une précision exemplaire⁶⁹. Cas peu fréquent qu'il convient de nuancer à propos de la déviation du périhélie de Mercure. Chaque tentative de modélisation doit prendre en compte certaines données, en négliger d'autres et s'accorder sur une tolérance relativement aux approximations. Et il faut bien voir que "les approximations faites ne résultent pas de calculs relativistes, mais sont introduites pour faire en sorte que la relativité s'ajuste au cas donné⁷⁰." Ce phénomène d'"approximations *ad hoc*", très courant en physique mathématique moderne, "[donne] de notre science une fausse impression d'excellence⁷¹." Et permet de relativiser la qualification de "science dure" dont elle fait l'objet. Non seulement la science est une construction de l'esprit, mais en plus elle doit souvent être ajustée pour convenir aux observations.

Le cas des processus révolutionnaires en science doit aussi être précisé car il a donné et donne encore matière à controverse. Comme il a été dit à la fin de la section précédente (p. 67), celui-ci "est rarement fait par un seul homme et jamais du jour au lendemain⁷²." Effectivement, il ne peut y avoir de révolution scientifique sans remise en cause d'un modèle ou d'un paradigme donné, ce qui nécessite souvent de s'appuyer sur d'autres domaines de compétence. Si le terme de révolution fait penser à un basculement, il faut y voir, en science, un enchevêtrement de productions de travaux de divers savants. Encore une fois, le cas de la relativité d'Einstein est parlant puisqu'il est, étrangement encore à l'heure actuelle, sujet à polémique. La paternité de la théorie de la relativité restreinte devant être, pour certains, attribuée à Poincaré. Françoise Balibar a dû prouver le contraire en s'appuyant sur un discours de ce dernier de 1912, confirmant par exemple son opposition à « l'hypothèse des quanta⁷³ ». De même pour la relativité générale, si les équations ont bien été formulées par David Hilbert, celui-ci n'a jamais réclamé la paternité de la théorie, ni refusé que ces équations portent le nom d'Einstein, pour la simple et bonne raison que c'est ce dernier qui en a eu l'intuition révolutionnaire.

Enfin, sur la question de la compréhension du monde, on peut voir qu'il s'agit aussi d'un vain espoir. L'exemple le plus parlant est celui de la mécanique quantique, dont Feynman⁷⁴ en dit que personne ne la comprend. Cependant, elle a permis des prédictions qui vont à l'encontre des espoirs des physiciens déterministes. En témoigne l'expérience

⁶⁹ André Lichnerowicz précise ainsi que "tous les satellites que l'on a envoyés autour du Soleil donnent une vérification expérimentale des équations de la théorie d'Einstein, avec une précision qui lui donne une rigidité ahurissante." In Alain Connes, André Lichnerowicz, Marcel Paul Schützenberger, *op. cit.* [52, p. 163]

⁷⁰ Paul Feyerabend, *op. cit.* [79, p. 64]

⁷¹ *Ibid.* [79, p. 64-65]

⁷² Thomas Kuhn, *op. cit.* [111, p. 24]

⁷³ Françoise Balibar, *Einstein et Poincaré, une affaire de principes. In Einstein, Newton et Poincaré, une affaire de principes*, 2008. [13, p. 9]

⁷⁴ Richard Feynman (1918-1988).

d'Alain Aspect⁷⁵ en 1982, suivie d'autres sur le même principe de "corrélation non-locale"⁷⁶. Sans entrer dans les détails, il a été possible de violer les inégalités de Bell⁷⁷ et ainsi d'entrer en contradiction avec la physique classique. Si l'interprétation de ces résultats donne lieu à plusieurs hypothèses (dont certaines au-delà de la physique), une notion reste partagée par la communauté, celle de l'impossibilité de "communication sans transmission"⁷⁸, réduisant de fait les applications possibles à l'intrication quantique. Celle-ci pouvant néanmoins servir à la sécurité des transmissions en cryptographie, Nicolas Gisin annonçant un "vrai hasard [...] non réductible à un mécanisme déterministe complexe"⁷⁹. Quoi qu'il en soit, cela permet de confirmer, s'il en était besoin, les propos de Kant sur l'impossibilité d'accéder à la nature des choses. Alors même que "le réel « en lui-même » n'existe pas"⁸⁰.

Conclusion

Si la science s'attache à décrire des phénomènes, elle reste cependant détachée de toute notion de vérité. Elle propose des théories qui ne peuvent dépasser le cadre intuitif. Celles-ci sont des constructions mentales⁸¹ qui, dans un cadre donné, sont censées s'adapter aux observations. Mais, pour se faire, elle a souvent besoin d'utiliser des approximations *ad hoc* pour réaliser ses prédictions. Ainsi, si la science s'autorise à donner des explications, toujours dans un cadre restreint, en aucun cas elle ne peut fournir de compréhension. Il est alors impropre de parler de découverte scientifique dès lors qu'il s'agit de construction de théories sur "des évènements que fondamentalement nous ne comprenons pas et ne pouvons pas comprendre"⁸². Enfin, en procédant par révolutions, la science change de paradigme en réfutant une ancienne croyance. Et comme pour tout rejet d'une croyance, elle s'attire des réticences, souvent de grande ampleur, au sein même de sa communauté. Leur résorption s'effectuant sur de longues périodes, voire même sur les générations suivantes.

⁷⁵ Alain Aspect, *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm. Gedankenexperiment : A New Violation of Bell's Inequalities*, 1982. [9]

⁷⁶ Nicolas Gisin, *L'impensable hasard. Non-localité, téléportation et autres merveilles quantiques*, 2012. [93, p. 89-90]

⁷⁷ John Stewart Bell (1928-1990).

⁷⁸ *Ibid.* [93, p. 45]

⁷⁹ *Ibid.* [93, p. 61]

⁸⁰ Aurélien Barrau, *De la vérité dans les sciences*, 2016. [16, p. 27]

⁸¹ Edgar Morin aussi l'indique comme fait majeur : "La grande importance de l'épistémologie moderne, c'est d'avoir montré de façon décisive que la théorie scientifique n'est pas le reflet du réel ; c'est une construction de l'esprit qui effectivement essaie de s'appliquer sur le réel." Edgar Morin, Jean-Louis Le Moigne, *op. cit.* [135, p. 45]

⁸² Paul Feyerabend, *op. cit.* [82, p. 141]

3.3 Art et intentionnalités

Si la définition d'Ambrose Bierce peut laisser perplexe, "Art, n. Ce mot n'a pas de définition⁸³", cela confirme la difficulté de la tâche, sachant que je partage l'opinion de Jean-Marie Schaeffer affirmant que "la notion d'œuvre d'art ne délimite pas de domaine ontologique spécifique⁸⁴." Dans le même sens, Edmond Couchot confirme "l'absence de propriété intrinsèque à l'art⁸⁵." Et comme on l'a vu, cette notion n'a pas de signification figée. Tout comme la science, l'art a besoin d'être contextualisé. Plus encore que la science, l'art a été et est encore parfois affublé de nombreux préjugés, signes de méconnaissance sur le sujet. Par exemple pour Jean-Jacques Rousseau, les sciences et les arts, à l'exception de l'art de la guerre, sont inutiles et il soutient que "le luxe va rarement sans les sciences et les arts, et jamais ils ne vont sans lui⁸⁶." Plus encore, il ne considère l'art (peinture et musique) que comme une "imitation⁸⁷." Certes celle-ci a pu jouer un grand rôle à cette époque mais cela montre un réductionnisme et une méprise sur le sujet. Un autre préjugé est de considérer l'art comme cumulatif, alors que l'histoire de l'art, on l'a vu, est faite de révolutions bien plus nombreuses qu'en science et que de multiples courants sont apparus suite à des remises en question.

Historiquement l'art a été longtemps lié à la religion avant une lente séparation à partir de la Renaissance. Les œuvres étaient alors destinées aux lieux de culte, ce qui pose le problème de l'accessibilité aussi bien que de la visibilité. Dans une église, un tableau est souvent en hauteur, éloigné ou sous un faible éclairage. À partir du XIV^{ème} siècle, les collections privées commencent à apparaître, d'abord réservées aux classes privilégiées, et ensuite accaparées par la bourgeoisie. Il est alors possible, dans ce contexte, de parler de luxe, en soulignant qu'il ne s'agit aucunement d'un quelconque attribut de l'art mais bien d'un usage impropre de celui-ci. Après quoi il faudra attendre la fin du XVII^{ème} siècle et la Révolution française pour qu'il devienne accessible avec l'ouverture du Louvre au public, suivi les décennies suivantes de la construction de musées dans tout le pays. Et même si les moyens sont relativement faibles, cela permet une diffusion des œuvres et une démocratisation de l'art. Cela est à mettre en lien avec une scolarisation progressive, au niveau primaire, qui deviendra obligatoire en 1881, au moment même où l'éducation religieuse est définitivement supprimée du cursus.

Pour en revenir à l'imitation, si imitation il y a, il convient d'en préciser la notion, comme Edmond Couchot qui affirme qu'elle "a toujours été une interprétation, une

⁸³"Art, n. This word has no definition." Ambrose Bierce, *op. cit.* [27, p. 27]

⁸⁴Jean-Marie Schaeffer, *op. cit.* [166, p. 108]

⁸⁵Edmond Couchot, *op. cit.* [55, p. 228]

⁸⁶Jean-Jacques Rousseau (1712-1778), *Discours sur les Arts et le Sciences*, 1750. [160, p. 18]

⁸⁷Jean-Jacques Rousseau, *Essai sur l'origine des langues*, 1781. [159, p. 49]

reconstruction, voire une rectification⁸⁸. " Et y trouver la même tentative qu'en science, à cette différence près que "la communication scientifique tend à être désobjectivisante⁸⁹." L'art suscite des émotions, "une expérience esthétique forte [qui] nous donne à voir le monde autrement⁹⁰." La science elle, n'a pas vocation à le faire même si elle peut en provoquer⁹¹, en témoignent les réticences à chaque changement de paradigme ou l'ampleur de la réaction de l'Église. L'art nous incite à la réflexion alors que la science, réfutant une ancienne croyance, nous en impose une nouvelle, "une théorie [qui] doit sembler être meilleure que ses concurrentes⁹³." Mais la place de cette dernière apparaît alors comme dogmatique puisqu'elle ne nécessite pas de remise en cause⁹⁴, étant la plus conforme avec les données disponibles. Néanmoins, elle peut apporter une certaine plus-value sur la connaissance. Ainsi par exemple, "si nous ne savons pas ce qu'est la gravitation, nous savons aujourd'hui que nous ne pouvons pas le savoir⁹⁶."

Cette incitation à la réflexion et à changer notre vision du monde peut être éclairée par, à titre d'exemple, les tableaux "post-impressionnistes" de Cézanne, dont le *Mont Sainte-Victoire* (Figure 3.2). Le monde n'apparaît pas en un tout brut. La profondeur, l'éclairage, le détachement des objets et leur volume se lisent en prenant le temps du cheminement du regard. L'espace se construit. Cézanne nous révèle "les fonctionnements de notre propre perception⁹⁷", le comment de la visibilité. Cela illustre bien le fait que la contemplation ne soit pas un processus passif mais engage une "activité cognitive⁹⁸." "La perception est déjà intellection⁹⁹." Plus généralement, le spectateur "va même jusqu'à attribuer des « états mentaux », des émotions aux personnages qui entrent dans la composition - retrouvant par là la démarche de l'artiste¹⁰⁰." Ainsi non seulement l'art nous fait vivre des émotions mais il nous apprend, nous ouvre des voies nouvelles sur l'appréhension du monde. Là où la science nous impose **un** modèle, l'art multiplie **les** approches et confirme notre propre multiplicité. En ce sens, l'art est indispensable à la science car aucun progrès majeur ne peut s'effectuer sans une vision nouvelle.

⁸⁸Edmond Couchot, *op. cit.* [55, p. 58]

⁸⁹*Ibid.* [55, p. 272]

⁹⁰*Ibid.* [55, p. 284]

⁹¹Contrairement à ce qu'indique Edmond Couchot alors même qu'il défend le fait qu'il soit "impossible de raisonner sans émotion⁹²."

⁹²*Ibid.* [55, p. 269]

⁹³Thomas Kuhn, *op. cit.* [111, p. 38-39]

⁹⁴Kant déjà l'avait bien fait remarquer, "la science ne peut pas ne pas être dogmatique, c'est-à-dire strictement démonstrative en vertu de principes *a priori* certains⁹⁵."

⁹⁵Emmanuel Kant, *op. cit.* [106, Préface à la seconde édition (1787), p. 51]

⁹⁶Christian Magnan, *op. cit.* [122, p. 83]

⁹⁷Edmond Couchot, *op. cit.* [55, p. 281]

⁹⁸Jean-Marie Schaeffer, *op. cit.* [166, p. 350]

⁹⁹*Ibid.* [166, p. 177]

¹⁰⁰Jean-Pierre Changeux, *op. cit.* [47, p. 129]

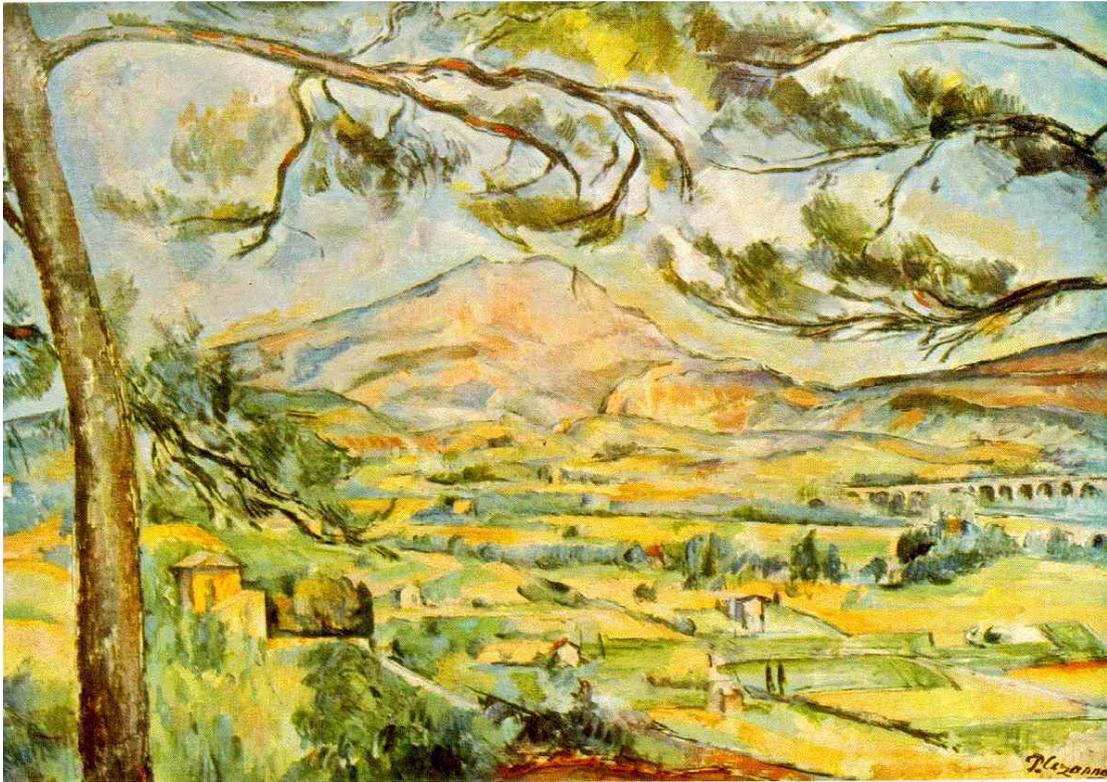


FIGURE 3.2 : Paul Cézanne : Mont Sainte-Victoire (1887)

Si les artistes bénéficient des progrès techniques de la science, ils devancent souvent cette dernière. L'exemple de la poésie, de l'épopée et de l'art dramatique montre bien une préoccupation sur des thèmes comme la psychologie et la sociologie bien avant que la science ne s'en mêle¹⁰¹. On peut voir aussi que les artistes se préoccupent des problématiques des scientifiques et apportent des solutions originales. De la perspective au cubisme, en passant par Cézanne, il y a bien construction de l'espace, jusqu'à son découpage avec le cubisme synthétique. L'impressionnisme déjà avait ouvert une voie en refusant l'idée d'une représentation du monde, la peinture devenant peinture en elle-même. Le pointillisme, avec ses couleurs de base juxtaposées, montre l'intérêt porté au fonctionnement de la vue. Le spectateur devant alors faire l'effort de recomposer celles-ci. L'expressionnisme enfin, en se dirigeant vers l'abstraction, s'oppose radicalement à toute forme de représentation. L'art n'est donc définitivement pas (ou plus) une représentation du réel, mais "l'œuvre d'art [...] présente du réel"¹⁰². De plus, comme l'avait déjà fait remarquer Nietzsche, "c'est la science qui dans l'évolution de l'homme prend la suite de

¹⁰¹Paul Feyerabend, *La science en tant qu'art*, 2003. [81, p. 44]

¹⁰²Xavier Lambert, *op. cit.* [113, p. 93] Ce que l'on peut rapprocher de la vision kantienne, "le pouvoir de la présentation correspond à l'imagination"¹⁰³.

¹⁰³Emmanuel Kant, *Critique de la faculté de juger*, 1790. [107, p. 212 (De l'idéal de la beauté, §17)]

l'art¹⁰⁴. " Et des thèmes comme "le rapport tendu entre le sujet et l'objet¹⁰⁵" montrent encore de nos jours une avance de l'art sur la science.

Quelle que soit l'œuvre, elle correspond à une époque, un lieu, un engagement, une vision du monde. Elle s'attache à un questionnement et propose une réflexion. Elle peut être inspirée par une ou plusieurs autres œuvres, en opposition, en composition, en recomposition, ou encore échapper à tout le reste. Mais "cette œuvre, pour être viable, demande à être *située*¹⁰⁶". Elle peut être immédiatement reconnue ou au contraire rejetée, oubliée et parfois être réhabilitée longtemps après, comme précurseur ou visionnaire. Elle peut aussi montrer un engagement moral ou politique, être en adéquation ou au contraire s'opposer aux conventions. En ce sens, actuellement, les artistes "prennent nettement plus de risques [que les scientifiques] dans leur activité créatrice¹⁰⁷". Non seulement l'artiste doit faire face à la critique mais aussi son appréhension du monde, si elle est nouvelle, doit être reçue ou tout au moins recevable. Le milieu scientifique est beaucoup plus tolérant, je devrais dire laxiste, face à des "théories" qui débordent du cadre scientifique, c'est à dire d'ordre purement spéculatif¹⁰⁸. À titre d'exemple, les hypothèses de l'existence d'autres univers "n'ont *a priori* aucune signification physique¹¹⁰". Nous vivons dans **un** univers et la science ne fait pas de théorie sur l'unique. De plus, dans le cas d'un autre univers, la communication entre les deux serait impossible¹¹¹, la question n'a pas à être posée.

"Le meilleur remède psychologique contre les dérives métaphysiques liées aux limites des sciences est de changer de perspective et de se dire que ce n'est pas le monde qui est magique, mais nous qui sommes bêtes¹¹²."

Jean Briquemont, 2000

L'art peut être apprécié de différents points de vue, selon le "sens commun, dans la plupart des sociétés", sa valeur réside dans le plaisir qu'il procure. Jean-Marie Schaeffer

¹⁰⁴Friedrich Nietzsche, *Humain, trop humain*, I, 1878. [139, p. 174, §222]

¹⁰⁵Paul Feyerabend, *op. cit.* [81, p. 44]

¹⁰⁶André Breton, *op. cit.* [37, p. 113]

¹⁰⁷Jean-Marc Lévy-Leblond, *La science expliquée à mes petits-enfants*, 2014. [118, p. 16]

¹⁰⁸À ce propos il pourrait être utile de se rappeler cette leçon de Kant : "tous ceux de nos raisonnements qui veulent nous conduire hors du champ de l'expérience possible sont illusoires et sans fondement¹⁰⁹."

¹⁰⁹Emmanuel Kant, *op. cit.* [106, p. 503 (Livre 2^{ème}, chap. III, appendice)]

¹¹⁰Christian Magnan, *op. cit.* [122, p. 163]

¹¹¹"Les gens qui habitent l'univers A ne savent pas ce qui se passe dans l'univers B. [...] Nous affirmons ainsi l'infirmité de nos capacités." Robert Vallée. In Evelyne Andreewsky et Robert Delorme, *Seconde cybernétique et complexité. Rencontres avec Heinz von Foerster*, 2006. [182, p. 67]

¹¹²Jean Briquemont, *Science et religion : l'irréductible antagonisme*, revue électronique Dogma. <http://www.dogma.lu/txt/JB-Science01.htm> In Christian Magnan, *op. cit.* [122, p. 210]

parle alors d'"*hédonisme esthétique*"¹¹³ mais en précisant bien que cette question est évitée dans les écrits consacrés à l'art¹¹⁴. Le sujet est en effet délicat car quand bien même on peut assigner la valeur d'une œuvre sur le message qu'il fait passer¹¹⁵, le plaisir peut jouer un rôle dans son efficacité, même s'il n'est ni "nécessaire [et même] hors de propos voire incompatible avec les buts réels de la création artistique"¹¹⁶. La tendance actuelle étant plutôt d'insister sur une "*révision* de nos valeurs"¹¹⁷ comme en témoignent les questionnements dans les discours critiques sur l'art. Et en effet, cette position semble de plus en plus nécessaire d'un point de vue éthique face à une normalisation forcée de la société au détriment de la diversité aussi bien culturelle qu'intellectuelle. Mouvement qui ne doit pas laisser indifférent et amener à une remise à plat de problèmes essentiels comme le dénuement de l'éducation ainsi que de la priorité donnée à l'économie sur tout le reste, jusqu'à l'humanité même. L'art a manifestement un grand rôle à jouer.

Conclusion

L'art peut s'apprécier sous différents points de vue et le sens commun ne lui rend généralement pas la place qui lui est due. Si la notion même d'œuvre d'art se doit d'être contextualisée, un grand nombre de préjugés pourraient être évités en prenant le temps de la confrontation historique et de la réflexion. À la différence de la science qui ne nous offre qu'un modèle unique pour chaque type de problème¹¹⁸, l'art nous fait appréhender notre propre fonctionnement et nous ouvre à la multiplicité. La contemplation est une activité, le rapport à l'œuvre se fait par la construction d'un espace ou d'un monde. Enfin, si l'on ne peut nier une forme de plaisir esthétique dans la contemplation de tableaux "classiques", l'idée même n'a plus nécessairement sa place à l'heure actuelle. "Le grand art n'est pas celui qui nous plaît perceptuellement, mais celui qui nous dérange intellectuellement"¹¹⁹. La société nous impose une normalité et un cadre restrictif que l'art peut et doit déconstruire.

¹¹³Jean-Marie Schaeffer. In Nathalie Heinich, Jean-Marie Schaeffer et Carole Talon-Hugon, *Par-delà le beau et le laid. Enquêtes sur les valeurs de l'art*, 2014. [167, p. 112]

¹¹⁴*Ibid.* [167, p. 106]

¹¹⁵Jean-Marie Schaeffer distingue quatre théories importantes sur la valeur d'une œuvre d'art, une auto-référentielle (esthétique), une cognitive, une éthique et une sur son efficacité sociale. *Ibid.* [167, p. 113]

¹¹⁶*Ibid.* [167, p. 108]

¹¹⁷Carole Talon-Hugon. In Nathalie Heinich, Jean-Marie Schaeffer et Carole Talon-Hugon, *op. cit.* [176, p. 66]

¹¹⁸Si dans quelques cas plusieurs approches peuvent être proposées, c'est toujours en nombre limité.

¹¹⁹Jean-Marie Schaeffer, *op. cit.* [166, p. 127]

Deuxième partie

Mélancolie des étoiles

*Tout acte de création est
d'abord un acte de destruc-
tion.*

Pablo Picasso

4

Motivations

4.1 Contexte

Si le sens commun et la société s'attachent à surconsidérer les sciences dites dures, laissant à penser à une rigidité et un absolutisme de "lois de la nature"¹, une réflexion s'impose pour montrer que non seulement l'histoire de la pensée est une succession de constructions mentales, mais encore qu'il existe une corrélation historique forte entre philosophie, mathématique, sciences et art. De plus l'art a souvent précédé les sciences, alors même que "l'art est souvent considéré comme un luxe inutile"³. Sur ce dernier point, il est intéressant de remarquer que les propos de Don Foresta sont non seulement encore pleinement d'actualité, mais de voir à quel point l'intensité s'en est démultipliée ces dernières décennies, appuyée par une prolifération de pratiques à caractère presque exclusivement commercial.

¹Comme l'a souligné Emmanuel Kant, "les lois universelles de la nature ont un fondement dans notre entendement, qui les prescrit à la nature. [...] ce pouvoir [de réflexion] se donne par là une loi seulement à lui-même, et non pas à la nature²."

²Emmanuel Kant, *Critique de la faculté de juger*, 1790. [107, p. 159 (Préface à la première édition (1790), IV)]

³Don Foresta, *Mondes multiples*, 1991. [88, p. 22]

Si la première partie de cet ouvrage a tenté de mettre à mal ces préjugés, il n'en reste pas moins un problème de taille. Car il semble bien que tout oppose ces deux domaines exploratoires, comme le résume Edmond Couchot, "si le scientifique cherche à créer de l'ordre à partir du chaos apparent du monde, l'artiste cherche au contraire à produire du désordre en regard de l'ordre établi⁴." Tenter un rapprochement s'avère alors une entreprise périlleuse. Plus encore, passer d'un domaine à l'autre nécessite une remise en cause totale car toute nouvelle approche implique "d'autres types d'explication et d'autres questionnements⁵."

Pour autant nous nous trouvons face à une multiplicité de ce type de rapprochements, en témoignent aussi bien le nombre de conférences pluridisciplinaires, voire transdisciplinaires que les liens qui se tissent entre laboratoires qui n'ont *a priori* pas ou peu de points communs. Si cela peut être une très bonne chose, tant pour les enseignants-chercheurs que pour les étudiants, il faut songer à faire attention aux dérives qui pourraient en découler. Du fait de l'hyperspécialisation des sciences et du cloisonnement qui s'ensuit, le premier danger vient du non-respect de cette règle de remise en question ou encore de la croyance en une espèce de supériorité d'un domaine sur un autre. Faut-il rappeler que la science "est une forme de connaissance intéressante mais en aucune façon exclusive, [elle] a beaucoup d'avantages, et aussi bien des inconvénients⁶."

Certes notre époque, celle de l'ère de l'information, est en plein bouleversement et des technologies nouvelles apparaissent à un rythme effréné, modulant implicitement notre rapport au monde et à l'autre. Ainsi d'un côté de nouvelles perspectives s'ouvrent avec une relative accessibilité, mais dont la structure interne est dissimulée, réduisant de fait non seulement nos possibilités et notre compréhension, mais surtout nous inclinant à un mode de fonctionnement limité, dirigé, voire forcé. D'un autre côté, si l'on cherche à s'appropriier ces technologies, cela demande une spécialisation et un investissement en conséquence. Pour les artistes, cela peut être un frein étant donné qu'il ne s'agit généralement pas d'une priorité et qu'il faut y porter un intérêt certain avant d'aboutir à des résultats.

Aussi les artistes peuvent-ils de plus en plus avoir besoin des compétences d'autres disciplines jusqu'à la création d'œuvres collectives. Ce cas posant des problèmes non seulement d'ordre technique mais surtout vis-à-vis du sens et de l'intentionnalité qui doivent être partagés alors même que la création est un processus évolutif dont l'aboutissement ne peut être connu à l'avance. Il ne s'agit donc nullement d'une simple récu-

⁴Edmond Couchot. In Xavier Lambert, *Le corps multiconnexe. Vers une poïétique de l'oscillation ?* 2010. [113, p. 7 (Préface)]

⁵Michel Morange, *À quoi sert l'histoire des sciences ?* 2008. [129, p. 45]

⁶Paul Feyerabend, *Contre la méthode. Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, 1979. [79, p. 242]

pération ou utilisation d'un savoir-faire ou d'une technique mis à disposition, mais bien d'une approche fondamentalement autre où tout est à construire et où il ne peut y avoir de finalité explicite donnée à l'avance.

La pièce *Mélancolie des étoiles* est née de dialogues et d'une réflexion sur différents questionnements. Edwige Armand, qui en est à l'origine, est partie d'un travail plastique antérieur, de touches colorées, peintures acryliques au doigt qu'elle a souhaité intégrer dans un tout autre contexte. Sa réflexion portant sur l'infralangage⁷, le métacorps et la singularité, l'idée a été de s'interroger sur la notion de "durée vraie"⁹. Concept introduit par Henri Bergson, pour qui "durée signifie invention, création de formes, élaboration continue dans l'absolument nouveau"¹⁰ mais aussi sur la déconstruction du langage, thème primordial à Jacques Derrida.

4.2 La langue et les mots

Si chaque langue peut être appréciée comme un formidable outil de communication, aucune ne saurait être réduite à cette simple fonction. Car la langue est avant tout le "support de la pensée, de l'imagination et du rêve"¹¹. Mais par là-même elle acquiert un statut limitatif malgré sa richesse potentielle et participe fortement à notre façon d'appréhender aussi bien le monde que soi-même ou le rapport à l'autre. Que la langue détermine ou non la pensée est un débat ouvert (déterminisme de Sapir-Whorf¹² contre relativisme linguistique) qu'il s'agit de nuancer, même s'il paraît indéniable que la pensée soit "fondamentalement articulée au biologique"¹³.

Ainsi, bien que des plus important, le langage n'est pas l'unique *medium* de la pensée. Et il a en effet été montré que les aires cérébrales engagées lors de "*calculs complexes exacts* sont non pas des aires du langage [...] mais des aires [...] connues pour être impli-

⁷Au sens que lui donne Xavier Lambert et comme le précise Edwige Armand : "l'infralangage est la voix sans les mots, et garde les virtualités qui n'ont pas été actualisées ni formalisées par la langue⁸."

⁸Edwige Armand, *Écriture d'un monde : Métacorps, Infralangage et Singularité*, PhD thesis, 2016. [8, p. 101]

⁹Henri Bergson, *L'évolution créatrice*, 1907. [23, p. 23]

¹⁰*Ibid.* [23, p. 11]

¹¹Claude Hagège, *Contre la pensée unique*, 2012. [97, p. 180]

¹²Edward Sapir (1884-1934), Benjamin Lee Whorf (1897-1941).

¹³Xavier Lambert, *op. cit.* [113, p. 23]

quées dans la mémoire de travail visuo-spatiale¹⁴. " Mais cela n'enlève rien à l'ampleur de l'influence de la langue ni au fait que "les mots et le sens des mots prédisposent l'enfant à penser et agir machinalement de certaines façons¹⁵. " Benjamin Lee Whorf va plus loin encore en indiquant que "la forme [même] des relations que l'on trouve dans la langue ne peut être que le pâle reflet, hésitant et déformé, sans substance, d'un MONDE CAUSAL¹⁶. "

Sur ce point, l'on peut remarquer avec Ferdinand de Saussure, le "caractère linéaire de la langue¹⁷. " Dans sa structure même, la langue n'acquiert de compréhensibilité que par une succession ordonnée de mots soumis à des règles, c'est-à-dire à une logique. Or, comme le souligne Bachelard, "notre langue est matérialiste, parce qu'on croit pouvoir par exemple enraciner la nature d'une substance dans une matière placide, indifférente à la durée¹⁸. " Non seulement son besoin de cohérence amène à exacerber la relation de cause à effet¹⁹, mais encore chaque mot est une idéalisation rigide, figée, unique, immuable et atemporelle.

"Une chose est une abstraction. Un nom est un symbole pour un complexe d'éléments dont on ne considère pas la variation. Nous désignons le complexe entier par *un* mot, par *un* symbole *unique*, lorsque nous avons besoin de rappeler en une fois toutes les impressions qui le composent²¹. "

Ernst Mach, 1886

Il y a une inadéquation intrinsèque des mots relativement aux choses, et "on peut comprendre un mot uniquement parce qu'il peut être répété²². " Mais dans tous les cas, "il manque toujours la singularité de l'évènement²³. " Un mot est un ajout, "le signe est toujours le supplément de la chose même²⁴, " c'est-à-dire quelque chose d'extérieur,

¹⁴Olivier Houdé, *La construction du vrai dans le développement cognitif de l'enfant*. In Jean-Pierre Changeux, *La vérité dans les sciences*, 2003. [100, p. 117]

¹⁵"Words and the meaning of words predispose the child to think and act automatically in certain ways." Marshall McLuhan, Quentin Fiore, *The medium is the Massage*, 1967. [126, p. 8]

¹⁶"The types of patterned relationship found in language may be but the wavering and distorted, pale, substanceless reflection of a CAUSAL WORLD." Benjamin Lee Whorf, *Language, thought, and reality*, 1956. [184, p. 269]

¹⁷Ferdinand de Saussure, *Cours de linguistique générale*, 1916. [165, p. 170]

¹⁸Gaston Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique*, 1934. [10, p. 64-65]

¹⁹Ainsi Hume qui conclut que "tous les raisonnements sur les faits paraissent se fonder sur la relation de la cause à l'effet²⁰. "

²⁰David Hume, *Enquête su l'entendement humain*, 1748. [102, p. 86]

²¹Ernst Mach (1838-1916), *Analyse des sensations*, 1886. In Dominique Lecourt, *La philosophie des sciences*, 2001. [116, note 53, p. 37]

²²Jacques Derrida, *Dire l'évènement, est-ce possible ?*, 1997. [67, p. 98]

²³*Ibid.* [67, p. 89]

²⁴Jacques Derrida, *De la grammatologie*, 1967. [64, p. 208]

"créant l'existence d'une absence potentiellement virale et nocive²⁵." Car "le supplément est ce que ni la nature ni la raison ne peuvent tolérer²⁶." Ce qui de fait le rend "donc aussi dangereux pour la raison, pour la santé naturelle de la raison²⁷."

Pour Saussure les mots sont des concepts "purement différentiels, définis non pas positivement par leur contenu, mais négativement par leur rapports avec les autres. Leur plus exacte caractéristique est d'être ce que les autres ne sont pas²⁸." Un mot n'a pas de correspondance univoque à une chose, il ne peut être que relatif et "un terme n'acquiert sa valeur que parce qu'il est opposé à ce qui précède ou ce qui suit, ou à tous les deux²⁹."

À l'inverse, "il y a des mots incapables d'être définis³⁰." Ainsi en est-il du désarroi et de la solution radicale d'Ambrose Bierce vis-à-vis du mot « art » (p. 73). Si les mots, comme représentations, échouent à transcrire notre pensée et nos impressions, il peut néanmoins y avoir "un sens à parler d'une esthétique du langage³¹" à propos de la poésie. Mais alors, tout comme pour l'approche surréaliste, cela serait au détriment de toute cohérence, et indépendamment "des servitudes de la signification³²." Cependant cette démarche n'est alors pas nécessairement dénuée de sens, comme le montre l'exemple d'Antonin Artaud qui "explorait l'infra-sens, aujourd'hui encore inconnu³³."

"Malgré la grande richesse de nos langues, le penseur se voit souvent embarrassé pour trouver une expression qui convienne exactement à sa pensée, et faute de cette expression il ne peut la rendre intelligible aux autres, ni, bien plus, à lui-même³⁴."

Emmanuel Kant, 1781.

Que les langues puissent différer dans leur approche n'entame pas le fait qu'elles soient composées selon une certaine structure et que "l'individu ignore totalement cette

²⁵Edwige Armand, *op. cit.* [8, p. 95]

²⁶Jacques Derrida, *op. cit.* [64, p. 213]

²⁷L'expression « supplément dangereux » venant de Jean-Jacques Rousseau. *Ibid.* [64, p. 214]

²⁸Ferdinand de Saussure, *op. cit.* [165, p. 162]

²⁹*Ibid.* [165, p. 171]

³⁰Blaise Pascal (1623-1662), *De l'esprit géométrique*, 1658. In *De l'autorité en matière de philosophie*, 1886. [142, p. 52]

³¹Gaston Bachelard, *Fragments d'une poétique du feu*, 1962. [11, p. 36]

³²*Ibid.* [11, p. 45]

³³Gilles Deleuze, *In Logique du sens*, 1969. [63, p. 114 (Du schizophrène et de la petite fille)]

³⁴Emmanuel Kant, *Critique de la raison pure*, 1781. [106, p. 316 (Des idées en général)]

organisation et est entièrement contraint par ces liens incassables³⁵." Danger dont Poincaré nous avait déjà bien mis en garde, "notre langage n'est pétri que d'idées préconçues et ne peut l'être d'autre chose. Seulement ce sont des idées préconçues inconscientes, mille fois plus dangereuses que les autres³⁶." Nous nous retrouvons alors face à un dilemme où non seulement il est délicat de formuler sa pensée mais surtout d'échapper à sa structure interne.

En outre le sens d'un mot est non seulement lié à un certain *corpus*³⁷, à une forme de tradition, à une époque, mais il est aussi souvent plurivoque. D'où il peut ressortir "de l'ambiguïté dans les termes³⁸" comme le faisait remarquer Hume, traitant de la controverse. D'autres formes encore de discours peuvent nous induire en erreur, comme le sophisme, qui permet de justifier tout et son contraire. Une formulation comme "une chose quelconque ressemble toujours à une autre en quelque manière³⁹" est de cet ordre. Non seulement elle ne nous apprend rien, mais elle pourrait nous induire en erreur, mettant arbitrairement en relation deux choses quelconques. Confronté à une situation similaire, Bergson rétorquera que dans ce cas l'on "n'explique pas du tout pourquoi l'une évoque l'autre⁴⁰."

En résumé

Si la langue n'est pas l'unique *medium* de la pensée, son influence est des plus importante sur cette dernière. Un mot est une idéalisation, une abstraction et ne peut être défini que négativement, il est "ce que les autres ne sont pas⁴¹." Un mot n'est pas la chose, c'est un « supplément dangereux » potentiellement nocif à la raison. Chaque langue a une structure interne qui nous échappe. Ainsi non seulement elle nous limite mais aussi nous contraint avec des "idées préconçues inconscientes⁴²." Et alors "nous échouons à traduire entièrement ce que notre âme ressent : la pensée demeure incommensurable avec le langage⁴³."

³⁵"The individual is utterly unaware of this organization and is constrained completely within its unbreakable bonds." Benjamin Lee Whorf, *op. cit.* [184, p. 256]

³⁶Henri Poincaré, *La science et l'hypothèse*, 1902. [149, p. 141]

³⁷Claude Hagège, *op. cit.* [97, p. 181]

³⁸David Hume, *op. cit.* [102, p. 149]

³⁹Platon, *Protagoras* [147, § 331d]

⁴⁰Henri Bergson, *Matière et mémoire. Essai sur la relation du corps à l'esprit*, 1896. [22, p. 97]

⁴¹Ferdinand de Saussure, *op. cit.* [165, p. 162]

⁴²Henri Poincaré, *op. cit.* [149, p. 141]

⁴³Henri Bergson, *Essai sur les données immédiates de la conscience*, 1888. [19, p. 74]

4.3 Le réel et la réalité

Avant de s'engager sur la délicate notion de réalité, il peut être intéressant de formuler quelques mots sur celle de vérité. Par la mathématique, en émettant les réserves nécessaires, il est possible d'accéder à certaines d'entre elles. En se focalisant sur des ensembles finis et en s'interdisant toute forme non finie de récurrence pour ne pas tomber sur les problèmes d'incomplétude et de cohérence formulés par Gödel, nous pouvons ainsi affirmer par exemple que $1 + 1 = 0$. C'est en effet le cas dans \mathbb{F}_2 , le plus petit corps mathématique⁴⁴, mais l'on peut tout aussi bien confirmer la vérité de $1 + 1 = 1$, ce qui est le cas en logique⁴⁵.

Il nous est alors tout à fait possible d'atteindre quelques formes de vérité. Certes celles-ci sont des constructions mentales mais elles conservent une cohérence. Elles permettent ainsi de formuler des raisonnements confirmés par la démonstration. Mais la mathématique ne s'occupant aucunement de la réalité, elles ne pourront pas nous être d'un grand secours. Un des tout premiers axiomes de la logique (et en théorie des ensembles) est Soit E un ensemble, $\forall a \in E, a = a$ (tout élément est égal à lui-même). Que cet élément désigne une chose, cela signifierait une immuabilité, que celui-ci soit une fonction, cela impose le déterminisme. Dans tous les cas, cela va à l'encontre de la notion de créativité, chère à Bergson⁴⁶.

Ce rêve d'une connaissance scientifique déterministe de la nature a longtemps été ancré dans le monde de la physique. La relativité, de même que la théorie quantique, ne font pas exception⁴⁷. Et malgré les incroyables prédictions confirmées que toutes deux ont fait naître, il ne faut pas oublier que "la stabilité de nos concepts et idées n'implique pas que nous ayons trouvé la vérité⁴⁹." Et en effet, le propre même de toute théorie est que "n'importe quel énoncé du corpus scientifique, jusqu'aux lois les plus profondes de la logique, peut être remis en question⁵⁰."

⁴⁴ $\mathbb{F}_2 = \{\{0, 1\}, +, *\}$ est le corps trivial, c'est à dire celui réduit aux seuls éléments neutres, notés additivement et multiplicativement. Ainsi 1 a pour opposé (*i. e.* inverse de la 1^{ère} loi) lui-même et donc $1 + 1 = 0$

⁴⁵En logique, la loi $+$ correspond au ou logique, 1 signifiant vrai, 0 faux, d'où $1 + 1 = 1$

⁴⁶Henri Bergson, *op. cit.* [23, chap. III, p. 187 sq.]

⁴⁷"La relativité et la mécanique quantique sont toutes deux héritières de la tradition classique : le changement temporel est conçu comme réversible et déterministe⁴⁸."

⁴⁸Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, *Entre le temps et l'éternité*, 1988. [153, p. 123]

⁴⁹Paul Feyerabend, *Philosophie de la nature*, 2014. [83, p. 265]

⁵⁰Hervé Zwirn *Les limites de la connaissance*, 2000. [187, p. 45]

L'introduction des probabilités dans la théorie quantique, alors considérée comme une "expression de notre ignorance⁵¹," n'a pas pour autant mis un terme au dogme du déterminisme. C'est en étudiant les systèmes instables, loin de l'équilibre, que Prigogine a pu montrer que l'imprécision inhérente à toute mesure physique nous conduit inexorablement à l'incertitude et l'imprévisibilité⁵². Il n'est plus alors possible d'obtenir de prévision fiable même en augmentant de façon drastique la précision des mesures. Ce résultat négatif nous conduit pourtant à l'introduction d'un "brisement de symétrie temporelle et dès lors [à] l'irréversibilité⁵³." Les lois physiques perdent alors ce caractère d'équivalence entre passé et futur dans un temps spatialisé. Et de même une connaissance du présent, aussi précise qu'elle puisse être, ne nous permet pas d'inférer un passé unique prédéfini.

La science construit des théories, parfois incompatibles⁵⁴, en fonction de problèmes qu'elle se pose. Elle propose des expériences dépendant "[d']hypothèses que nous avons conçues nous-même et dont *on sait* dès lors qu'elles expriment nos attentes (subjectives⁵⁵)." Elle s'appuie de plus sur des notions purement abstraites⁵⁶ pour tenter de dégager des lois universelles. Pourtant cette idéalisation nous a permis des prédictions de plus en plus précises dans de nombreux domaines tout en nous conduisant à des limites indépassables. Nous concevons des modèles dont nous conservons les plus fructueux, même s'ils se révèlent être contre-intuitifs, comme en mécanique quantique. Mais cette progression nous a tout de même beaucoup apporté en modifiant notre regard sur le monde, quand bien même les réticences ont été et sont encore bien nombreuses.

Ainsi l'affirmation de Prigogine qui constatait en 1996 que "la tradition d'un temps spatialisé reste toujours d'actualité⁵⁷" me semble encore valable aujourd'hui. Pourtant, comme l'a fait remarquer Bergson dès le début du XX^{ème} siècle, cette position empêche de donner corps à des notions comme l'évolution et la créativité⁵⁸. Le « principe de raison suffisante » de Leibniz, précepte du déterminisme, est désormais caduc, l'évènement

⁵¹Ilya Prigogine, *Les lois du chaos*, 1992. [151, p. 15]

⁵²Dans un système chaotique, une moindre différence des conditions initiales augmente l'erreur de prédiction exponentiellement en fonction du temps. Il existe alors un domaine (horizon de Liapounov) au-delà duquel plus aucune prédiction n'est possible.

⁵³*Ibid.* [151, p. 75]

⁵⁴Par exemple un électron suit une trajectoire dans la théorie de Bohm alors que ce n'est pas le cas en physique quantique, mais les prévisions sont identiques. Voir Hervé Zwirn, *op. cit.* [187, p. 348]

⁵⁵Paul Feyerabend, *Adieu la raison*, 1987. [80, p. 244]

⁵⁶Comme "un gaz idéal, un fluide parfait, un corps parfaitement élastique, une sphère." *Ibid.* [80, p. 247]

⁵⁷Ilya Prigogine, *La fin des certitudes. Temps, chaos et les Lois de la Nature*, 1996. [152, p. 66]

⁵⁸Ainsi le présente-t-il : "l'intelligence ne se présente clairement que le discontinu." Or il y a "plus dans l'évolution de la forme que les formes réalisées l'une après l'autre." Aussi, "l'intelligence est caractérisée par une incompréhension naturelle de la vie." Henri Bergson, *op. cit.* [23, p. 155, 315, 166 resp.]

ne peut y prendre place⁵⁹. C'est ainsi que Prigogine, suivant la pensée bergsonienne, en arrive à donner "une épaisseur à l'instant"⁶⁰. Si un tel concept va à l'encontre des modèles logico-mathématiques, il semble être le prix à payer pour s'émanciper de théories où le vivant est intrinsèquement exclu.

En prenant soin de distinguer réel et réalité, comme l'explique Xavier Lambert, à savoir que "le réel est de l'ordre de ce qui advient" alors que la réalité "procède de ce qui est déjà formalisé"⁶¹, nous pouvons nous pencher sur la question. En premier lieu, si malgré ses limites la science tente de nous livrer des explications de ce réel en devenir, la prudence s'impose car "les questions de réalité sont trop importantes pour être laissées aux seuls scientifiques"⁶². Mais quelle qu'en soit l'approche, "nos idées ne sont pas des reflets du réel, mais des traductions du réel"⁶³ dans un processus de construction, émanant de la réalité, plus précisément de notre réalité. Pour le dire autrement, "nous regardons le présent à travers un rétroviseur. Nous marchons vers l'avenir à reculons"⁶⁴.

Ainsi la réalité est affaire de construction mentale, propre à chaque individu, dans un schème dont il n'a pas conscience. "La réalité a plus à voir avec ce que nous faisons dans le monde qu'avec ce que nous pensons à son sujet"⁶⁵. La science, à l'image des mots, ne peut alors nous en donner qu'une formalisation alors que "la chose même se dérobe toujours"⁶⁶. Le réel quant à lui est de l'ordre du se faisant, il est "de la réalité à venir"⁶⁷. Il incorpore des potentialités qui ne sont pas réductibles à l'unique, au même. Il permet d'appréhender le vivant en ouvrant à l'émergence et à la créativité. Aussi peut-on y reconnaître des similitudes avec l'approche artistique.

"Si donc, dans le jugement de goût, l'imagination doit être considérée dans sa liberté, elle sera comprise avant tout, non comme reproductive à la manière dont elle se trouve soumise aux lois de l'association, mais comme

⁵⁹Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, *op. cit.* [153, p. 46, 175-176]

⁶⁰"Le mouvement tel que nous le concevons aujourd'hui donne une épaisseur à l'instant et l'article au devenir." *Ibid.* [153, p. 192]

⁶¹Xavier Lambert, *op. cit.* [113, p. 10]

⁶²Paul Feyerabend, *La tyrannie de la science*, 2014. [82, p. 75]

⁶³Edgar Morin, *Science avec conscience*, 1990. [132, p. 134]

⁶⁴"We look at the present through a rear-view mirror. We march backwards into the future." Marshall McLuhan, *op. cit.* [126, p. 75]

⁶⁵Ian Hacking, *Representing and Intervening. Introductory Topics in the Philosophy of Science*. Cambridge University Press, 1983, p. 17. Cité par Jacques Bouveresse et Jean-Pierre Changeux, *Le problème de la vérité dans les sciences*. In Jean-Pierre Changeux, *La vérité dans les sciences*, 2003. [35, p. 19]

⁶⁶Jacques Derrida, *La voix et le phénomène. Introduction au problème du signe dans la phénoménologie de Husserl*, 1967. [66, p. 117]

⁶⁷Xavier Lambert, *op. cit.* [113, p. 10]

productive et spontanée (en tant que créatrice de formes arbitraires d'intuitions possibles⁶⁸).

Emmanuel Kant, 1790.

Que la démarche soit scientifique ou artistique, nous sommes contraints par la structure de l'intelligence. Mais alors que la science nous fournit des théories, souvent uniques⁶⁹, cela amène à un rapprochement avec les mots et la structure de la langue. D'où il en ressort une idéalisation rigide, figée, unique, immuable et atemporelle⁷¹. À l'inverse, il semble bien que l'art soit plus en relation avec le réel. Comme on a pu le voir avec Cézanne (p. 74), l'artiste propose "des possibles plurivoques desquels émergent d'autres représentations du monde⁷²." Nous nous trouvons alors face à un réel multiple, en devenir, où chacun construit sa propre réalité.

Conclusion

À l'instar des mots, incapables de décrire notre ressenti et nos impressions, la science ne peut parvenir ni à la vérité, ni à la compréhension. Si elle s'autorise à expliquer le réel, elle nous en éloigne en nous imposant son propre modèle. Elle permet certes des prédictions dans bien des domaines, mais "tout notre comprendre n'est que *relatif*, c'est-à-dire suffisant pour une fin ; *absolument*, nous ne comprenons rien⁷³." L'art en revanche amène à un champ de possibles en renouvelant nos représentations du monde. Il s'émancipe de la linéarité et de la rigidité de la langue, il est ouverture au multiple, au changeant.

⁶⁸Emmanuel Kant, *Critique de la faculté de juger*, 1790. [107, p. 220 (Analytique du beau, § 22)]

⁶⁹Quand bien même il peut coexister plusieurs théories incompatibles, elles sont en nombre limité et ce fait n'enlève rien au propos, sinon que de confirmer l'inadéquation entre la science et la vérité⁷⁰.

⁷⁰"La seule vérité accessible est celle de l'adéquation empirique et elle ne peut être l'apanage d'une seule et unique théorie. Le fait qu'elle doit être partagée entre des théories incompatibles interdit désormais de conférer aux théories en question une vertu de vérité intrinsèque." Hervé Zwirn, *op. cit.* [187, p. 273]

⁷¹Cependant, "même les théories les plus abstraites, bien que anhistoriques dans leur *intension* et leur *formulation*, sont historiques dans leur *usage*." Paul Feyerabend, *op. cit.* [80, p. 143]

⁷²Edmond Couchot. *In* Xavier Lambert, *op. cit.* [113, p. 7 (Préface)]

⁷³Emmanuel Kant, *Logique*, 1800. [105, p. 95 (Introduction, VIII)]

Créer, c'est vivre deux fois.

Albert Camus

Le mythe de Sisyphe, 1942

5

Implémentation

5.1 Des phonèmes aux virus

Mélancolie des étoiles est née d'un travail antérieur, de touches colorées, peintures acryliques au doigt, dû à Edwige Armand. Patiemment, elle en a réalisées de toutes sortes sur différents supports, jour après jour, au gré de ses sensations. Épinglées à divers endroits, elles suivaient le rythme de la lumière tout autant que de ses humeurs passées, offrant à voir l'impermanence malgré l'unicité du concept. Son idée a alors été de s'en servir comme matière première pour la création d'une œuvre interactive concernant notre rapport au monde, dans une époque marquée par le changement rapide et l'instabilité.

Cette démarche s'inscrit dans une réflexion autour des notions telles que le réel vivant et la déconstruction du langage vues au chapitre précédent. Mais aussi dans le contexte bien particulier qui est le nôtre, celui de l'ère numérique, en plein bouleversement. Si la Renaissance avait apporté à l'homme une place centrale, le milieu du $xx^{\text{ème}}$ siècle a ouvert la voie à l'interaction (p. 53), le spectateur n'étant plus réduit à un simple lecteur, regardeur ou écouteur. Ce mouvement a alors pu prendre une grande ampleur

avec les progrès technologiques. Le spectateur devient ainsi impliqué, avec ou sans son assentiment, et les possibles en sont démultipliés.

Si la physique classique nous avait imposé un monde déterministe, cette position n'est désormais plus défendable. Malgré cela les théories scientifiques contribuent toujours à façonner nos outils conceptuels et, plus insidieusement encore, la langue et les mots y participent aussi. La technoscience quant à elle ne nous inflige pas moins qu'un nouveau langage, peut-être plus dangereux encore puisqu'il s'agit du sien propre, c'est-à-dire qu'il "ne fait plus référence au monde. Il ne fait référence qu'à lui-même, qu'à la technique qui le constitue¹." Plus encore il remanie en la codifiant l'image que l'homme peut avoir de lui-même, constat qui amène Michel Faucheux à avancer l'idée de "rupture anthropologique²."

Que le réel soit création et que nous puissions l'appréhender de multiples manières n'empêche pas que "le langage articulé ne peut pas, à lui seul, épuiser le registre de ces images mentales³." Mettre un mot sur une chose, un concept, une sensation ou un ressenti, c'est en premier lieu réduire, catégoriser et en même temps détacher le sujet de l'objet. C'est nier le réel *se faisant* par une réalité atrophiée et fatalement figée. "La pensée la plus vivante se glacera dans la formule qui l'exprime. Le mot se retourne contre l'idée. La lettre tue l'esprit⁴." C'est ainsi que dans *Mélancolie des étoiles* nous avons introduit l'idée que les mots contaminent la pensée et considéré ceux-ci comme de véritables virus.

À partir de tous ces éléments et du travail plastique antérieur, nous avons voulu construire un monde à l'image du nôtre, à savoir en mouvement, évoluant, vivant, mais où notre compréhension tout autant que notre action sont limitées. Il en résulte le choix de s'intéresser à la parole car plus encore que le mot, "le son nous touche, nous intéresse, nous passionne d'avantage parce *qu'il nous pénètre*⁵" et ainsi faire participer le spectateur avec sa voix. Les touches colorées ont alors pu être assimilées à des cellules vivantes et associées à des phonèmes pour faire ce lien.

Au niveau de la réalisation, plusieurs essais ont été nécessaires et il en résulte une différenciation pour chaque phonème (Figure 5.1), au nombre de trente-cinq dans notre cas, déclinées de même en version infectée (Figure 5.2), auxquels il faut ajouter les cellules souches et le silence. Et comme la mort fait partie intégrante de la vie, il a aussi fallu

¹Michel Faucheux, *La tentation de Faust ou la science dévoyée*, 2012. [78, p. 220]

²*Ibid.* [78, p. 223]

³Xavier Lambert, *op. cit.* [113, p. 22]

⁴Henri Bergson, *op. cit.* [23, p. 128]

⁵Jacques Derrida, *De la grammatologie*, 1967. [64, p. 341]

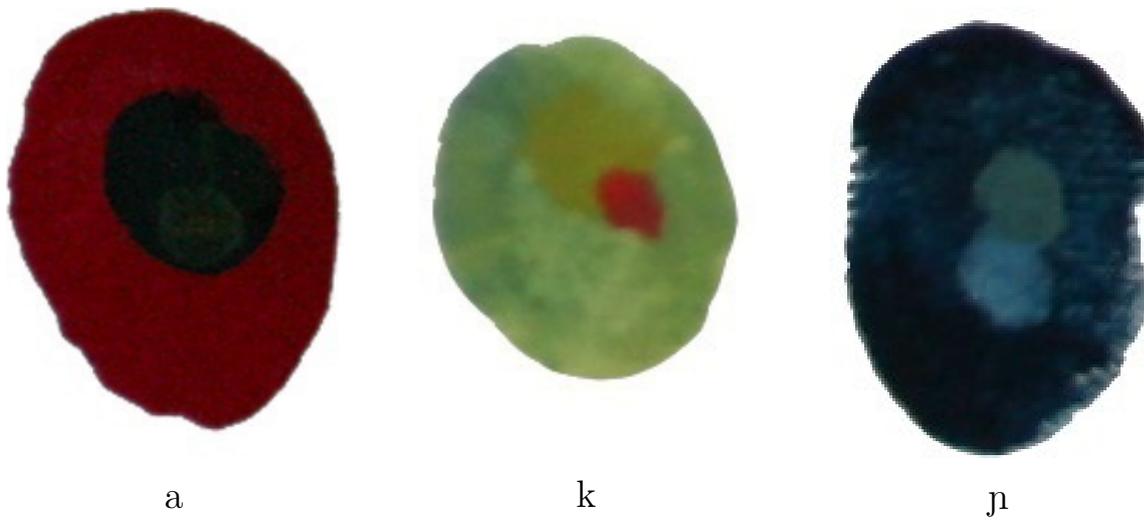


FIGURE 5.1 : Touches colorées : phonèmes a, k et n

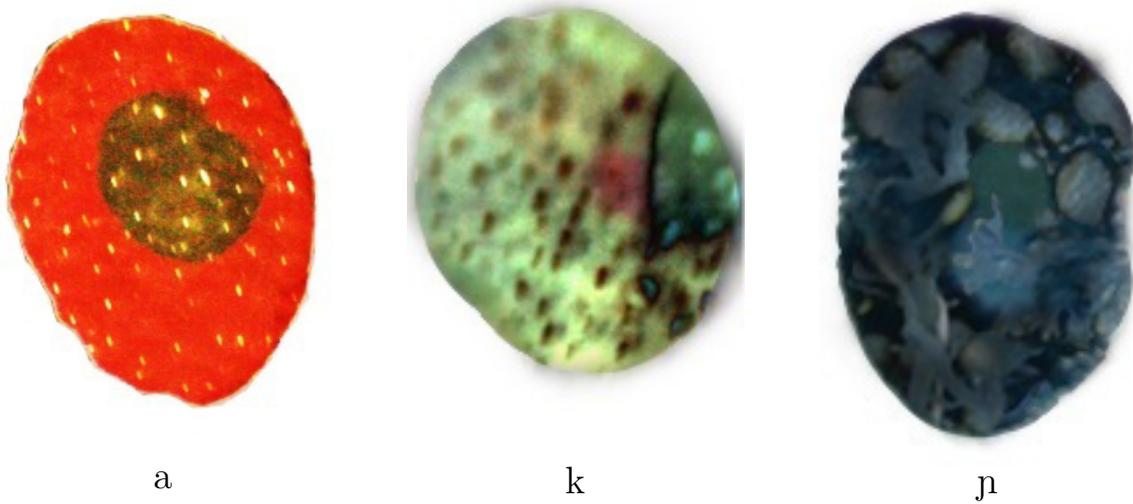


FIGURE 5.2 : Touches colorées infectées

intégrer l'apoptose des cellules (Figure 5.3). Enfin, pour ajouter à la diversité, chaque phonème a été reproduit en une dizaine de versions, d'où il en résulte la réalisation et le détourage de milliers de touches colorées pour au final n'en conserver qu'environ mille.



FIGURE 5.3 : Touches colorées en apoptose

5.2 Interactivité

La première interactivité, au sens d'Edmond Couchot⁶, a bouleversé le rapport entre l'œuvre et le spectateur, plus encore avec l'introduction du virtuel comme on a pu le voir avec *Les pissenlits* (p. 57). Mais l'interaction reste de l'ordre de l'action-réaction, le public étant restreint à un rôle de déclencheur. Les possibilités sont alors limitées à un scénario préprogrammé et une diversité ne peut être conçue que par une écriture en amont de choix possibles ou par l'introduction d'un "hasard" pseudo-aléatoire⁷. Quoi qu'il en soit, le spectateur devient actif et potentiellement acteur.

Le développement de l'informatique, plus particulièrement de l'intelligence et de la vie artificielles, accompagné du perfectionnement et de l'augmentation rapide des capacités des ordinateurs, a permis de franchir un nouveau cap en ouvrant la voie à l'émergence. Sans pour l'instant entrer dans les détails, les algorithmes génétiques, inspirés du vivant, permettent d'un côté une capacité d'apprentissage et de l'autre l'apparition de solutions, parfois originales, dont une des caractéristiques majeures est l'imprédictibilité. Et ce non

⁶Edmond Couchot, Norbert Hillaire, *L'art numérique. Comment la technologie vient au monde de l'art*, 2003. [56]

⁷Les algorithmes, certes performants dans une certaine mesure, de génération de nombres "aléatoires" n'en n'ont que le nom puisqu'il s'agit d'algorithmes conçus à partir de lois mathématiques d'une remarquable simplicité. Il existe cependant des cartes intégrant des phénomènes quantiques qui promettent un "vrai hasard," dans le sens rapporté par Nicolas Gisin (p. 72).

pas au sens d'un hasard mais suite à une construction, par essais-erreurs, renforcement et perfectionnement.

C'est ce principe qui a conduit à la seconde interactivité, où l'œuvre ne se met plus à réagir de manière automatique mais est capable de s'adapter à son environnement, de construire et d'adopter différents comportements face aux spectateurs. La pièce entre alors dans un virtuel réel, elle est de l'ordre du *se faisant* et s'élabore avec la complicité du public. La connaissance d'un présent ne nous permet pas alors d'inférer un futur et il devient possible de s'émanciper de la représentation spatialisée du temps. L'ensemble s'élabore mutuellement avec les spectateurs mais peut aussi introduire une rétroaction dont la portée nous échappe.

Le spectateur acquiert ainsi une nouvelle dimension puisqu'il participe à l'actualisation de l'œuvre, mais en aucun cas il ne peut dépasser certaines limites et être considéré comme coauteur. La pièce ayant été réalisée en amont, son rôle est contraint par des choix qui ont été effectués antérieurement, en dehors de lui. Son influence sur la progression de la pièce peut alors non seulement être perturbée, mais aussi se retourner contre lui. À l'image de notre monde, où nous pouvons penser maîtriser nos actions alors même que les nouvelles technologies modifient notre appréhension de celui-ci, sans que l'on en prenne nécessairement conscience.

Dans *Mélancolie des étoiles* nous avons souhaité intégrer ce fait. Le spectateur, placé dans un monde qu'il n'a pas choisi, peut sembler comprendre et se prêter au jeu de la prolifération des touches colorées par le son de sa voix. Mais, dès qu'un groupe de phonèmes forme un mot, ils se transforment en virus et attaquent les cellules saines. Le rôle du spectateur est alors ambivalent, en participant à son évolution il augmente le risque d'une contamination sur laquelle il n'a aucun contrôle. Il participe à ce monde qui, en retour, ne se soucie nullement de lui. La trace qu'il peut y laisser, ses propres mots, peut bien influencer la pièce, mais il ne saura pas même comment, ni encore moins pourquoi.

D'un point de vue plus général, le titre *Mélancolie des étoiles* fait référence à l'envie de créer un monde, "c'est le désir que l'on n'atteint jamais, c'est l'étoile qui ne peut jamais nous combler⁸." À l'image du monde que chacun se construit tout en étant inaccessible et hors de contrôle, la pièce se veut en constante évolution, en mouvement permanent jusqu'à en devenir inidentifiable et indéfinissable. Sentiment qui a pu être renforcé par l'introduction de mutations aléatoires, toujours plus nombreuses, donnant à penser à l'insaisissable.

⁸Edwige Armand, *op. cit.* [8, p. 187]

L'évolution de la pièce est aussi imprédictible et les cellules, naïves dans un premier temps, vont apprendre à se méfier, ou non, des autres phonèmes en fonction des virus créés, processus relativement lent qui ne peut concerner que les générations à venir. Ce mécanisme, invisible au spectateur, a quand même pu être constaté lors d'une présentation de *Mélancolie des étoiles*, où après trois heures de fonctionnement en forte activité, la formation de virus était plus faible qu'au lancement. La contamination s'est alors trouvée retardée, mais toujours présente, conservant l'intention première. Les cellules adoptent en effet un comportement antagoniste, se regrouper pour leur survie tout en évitant de former un mot qui les condamnerait.

Conclusion

Mélancolie des étoiles (Figure 5.4), cocréation de la seconde interactivité, offre au public la possibilité d'influencer la progression de l'œuvre. Mais si le spectateur pense pouvoir contrôler le cours des choses, il devra être confronté au fait qu'il ne peut rien faire et que ses croyances étaient vaines. Ce qui pourra peut-être alors l'inviter à la réflexion, car "l'essence même de la réflexion, c'est de comprendre qu'on n'avait pas compris"⁹. Métaphore de notre condition humaine face aux nouvelles technologies, présentées comme une aide alors qu'elles façonnent notre appréhension du monde, notre façon même d'agir et de penser. Le spectateur participe à la multiplication des cellules et semble partager ce développement alors même qu'à tout moment cela peut se retourner contre lui par la contamination virale¹⁰.

⁹Gaston Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique*, 1934. [10, p. 178]

¹⁰Thomas Breton, Edwige Armand, and Yves Duthen, *Phonemes to Viruses : An Aesthetic Transformation*, 2014. [39]

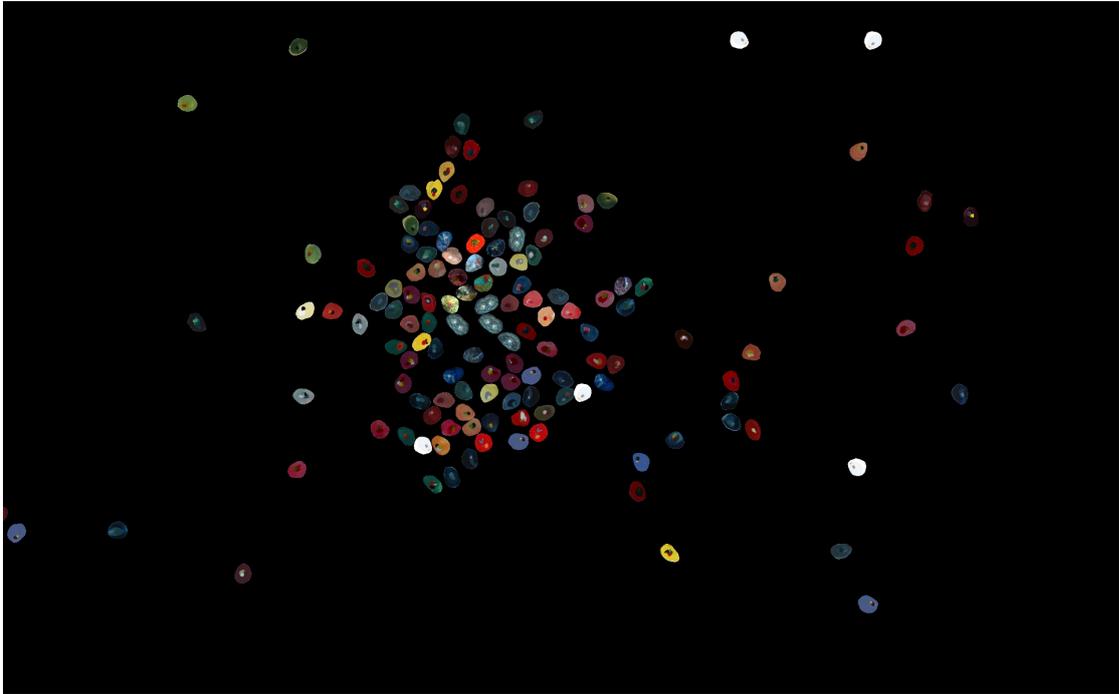
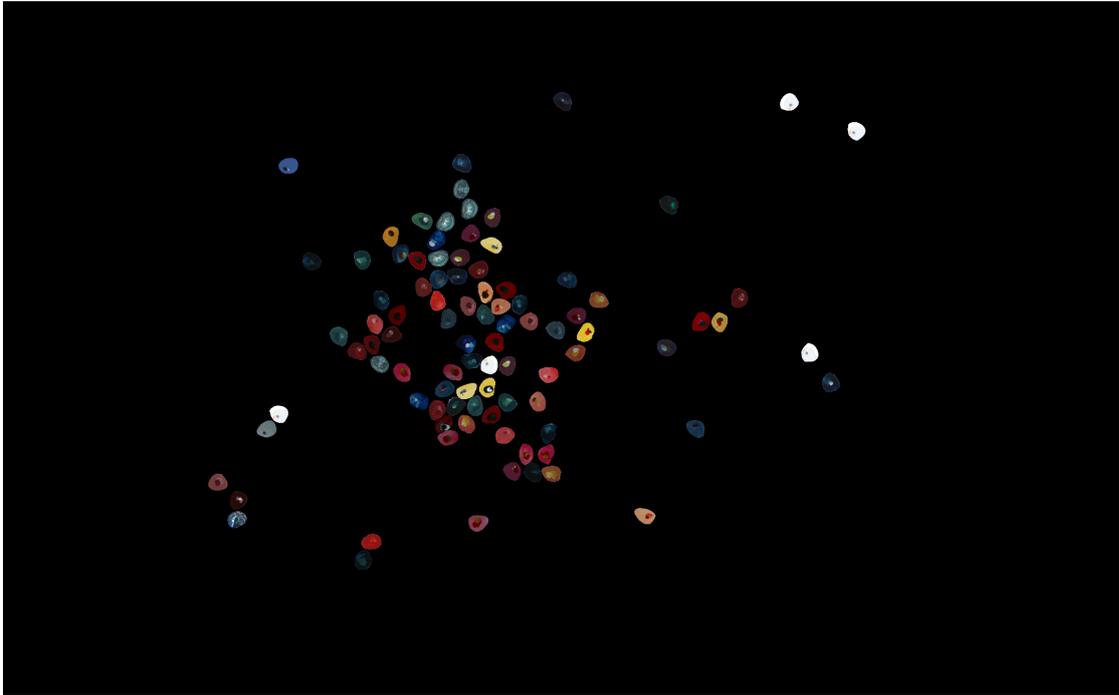


FIGURE 5.4 : Edwige Armand, Thomas Breton : *Mélancolie des étoiles*, 2017

*Un mot et tout est sauvé. Un
mot et tout est perdu.*

André Breton

Le Revolver à cheveux blancs,
1931

6

De la parole aux phonèmes

Préambule

La réalisation de la pièce *Mélancolie des étoiles* n'a pas été un simple défi technique en soi mais bien plus une remise en cause continue entre réflexions et adaptations. Elle a nécessité de nombreux retours en arrière, reformulations et réécritures, dans un élan à l'image du vivant, entre envies, besoins, possibilités, limites, non seulement pratiques mais aussi à cause de mésententes liées à des visions parfois divergentes ou même opposées sur des points critiques, ou encore sur un langage propre à des disciplines particulières.

Néanmoins, il en résulte une approche spécifique pour chaque défi rencontré où, mis à part pour la reconnaissance vocale, tout a été écrit à la main afin de conserver la plus grande liberté possible pour la réalisation de l'œuvre et l'agencement entre chacune des parties. Ce chapitre et les deux suivants présentent les principaux domaines abordés, la reconnaissance vocale, ce qui relève de la synthèse d'images et du rendu, puis de la programmation massivement parallèle afin de répondre aux contraintes de temps réel avant d'aborder la vie artificielle. Les parties les plus techniques seront volontairement

tues et reportées en annexes pour ne pas alourdir le propos. C'est le cas par exemple d'un schéma récapitulatif du fonctionnement du programme (Annexe A p. 155), ou d'une partie de code sur processeurs graphiques (Annexe C p. 165).

6.1 Contexte

À elle seule, la reconnaissance vocale a fait l'objet de nombreuses études et recherches et dépasse largement le cadre de cet ouvrage. Cette partie a été facilitée par l'utilisation du logiciel Sphinx¹ développé par la Carnegie Mellon University et du modèle acoustique du français développé par l'Université du Maine². À partir de ces outils, il a été possible d'obtenir des résultats satisfaisant aux besoins de la pièce quand bien même ceux-ci restent relativement éloignés de la réalité. C'est que, d'une part, le contexte est largement défavorable, accumulant les difficultés inhérentes à ce type de problème. D'autre part, la tâche est loin d'être triviale comme il est possible de le remarquer une fois la question détaillée. Enfin, le processus de détermination implique une large part d'apprentissage et l'utilisation de modèles adéquats. Cependant, les résultats paraissent étonnants au vu de conditions inappropriées.

La toute première difficulté vient du contexte dans lequel s'effectue la reconnaissance. Si de plus en plus d'outils et de logiciels s'attachent à utiliser ce *modus operandi*, loin s'en faut que les résultats soient automatiques. Il est en effet nécessaire d'avoir une base solide et la plus large possible, aussi bien en nombre qu'en précision, pour tenter d'obtenir quelque satisfaction. Comme cela sera plus détaillé par la suite, il existe en réalité trois grands champs exploratoires bien distincts.

Le premier est lié à un faible nombre de mots à reconnaître, réduisant drastiquement ce champ exploratoire. Il est évident que plus ce nombre est petit et plus les mots sont éloignés (acoustiquement parlant), plus la tâche est aisée. Cependant, même dans ces cas, rien n'est automatique et une phase d'apprentissage est toujours nécessaire. De meilleurs résultats sont aussi obtenus lorsqu'il ne s'agit que d'une seule personne. Pour autant, plus le nombre de mots est faible, plus il est possible de les reconnaître convenablement pour un groupe d'individu donné (de même langue, de même sexe, d'accent proche, etc.)

¹CMU Sphinx. <http://cmusphinx.sourceforge.net/> [1]

²Modèle acoustique du français. <http://www-lium.univ-lemans.fr/fr/content/modeles-acoustic> [2]

Le deuxième est approprié à un interlocuteur unique. Ici, après une phase d'apprentissage relativement courte, le logiciel arrive à reconstituer des phrases, tant bien que mal, grâce aux modèles décrits ci-après. Généralement, ce n'est qu'après les rectifications effectuées manuellement par le locuteur que le logiciel "apprend" et minimise les erreurs futures. Mais, en se spécialisant, il devient plus sensible au ton de la voix et peut se comporter étrangement (devenir inopérant) lorsque la personne se trouve enrôlée par exemple. Ce groupe est aussi confronté, dans une moindre mesure, à la principale difficulté du suivant.

Une troisième forme est la reconnaissance par contexte, à proprement parler. C'est à dire à un public spécifique, un mode de parole particulier. Celui qui a fait le plus l'objet de recherches (et donné le plus de résultats) est l'étude des discours journalistiques. Dans ce cas, c'est par des données facilement accessibles et en nombre qu'une phase d'apprentissage conséquente est possible. Une fois encore, des corrections peuvent être apportées après coup. Malgré cela, les difficultés liées aux homonymies ne sont pas pour autant écartées, car relevant d'un problème bien plus large.

Quelle que soit l'approche et quand bien même les résultats sont prometteurs, ils ne peuvent rien à ce que ni les chercheurs en neurosciences, ni les théoriciens du langage ne savent résoudre, à savoir la formation du langage et surtout du sens. Le problème de la compréhension induit des erreurs et empêche les distinctions entre toutes les subtilités d'une langue. Une même phrase pouvant avoir différentes significations selon le contexte, l'intonation ou le but, sans même parler des jeux de mots. Ceci étant vrai non seulement au niveau du langage parlé, mais aussi écrit. Enfin, la voix étant un signal sonore, elle est soumise au bruit environnant, à la qualité des instruments de mesure et à la finesse de discrétisation de ce signal.

Dans le cadre de la pièce *Mélancolie des étoiles*, la situation est particulièrement équivoque. Il s'agit de faire parler des spectateurs différents, sans *a priori* sur aucun d'eux et sans qu'une phase d'apprentissage ne puisse leur être dédiée. Aucune information non plus sur le sexe, l'âge ou même l'accent. Cependant, l'idée est d'obtenir le plus de diversité possible dans les paroles afin que l'impact de chaque spectateur sur la pièce soit maximal. Ces conditions extrêmes, si elles peuvent entraver la reconnaissance vocale, seront néanmoins minimisées dans le cas précis de cette expérience.

6.2 Les phonèmes du français

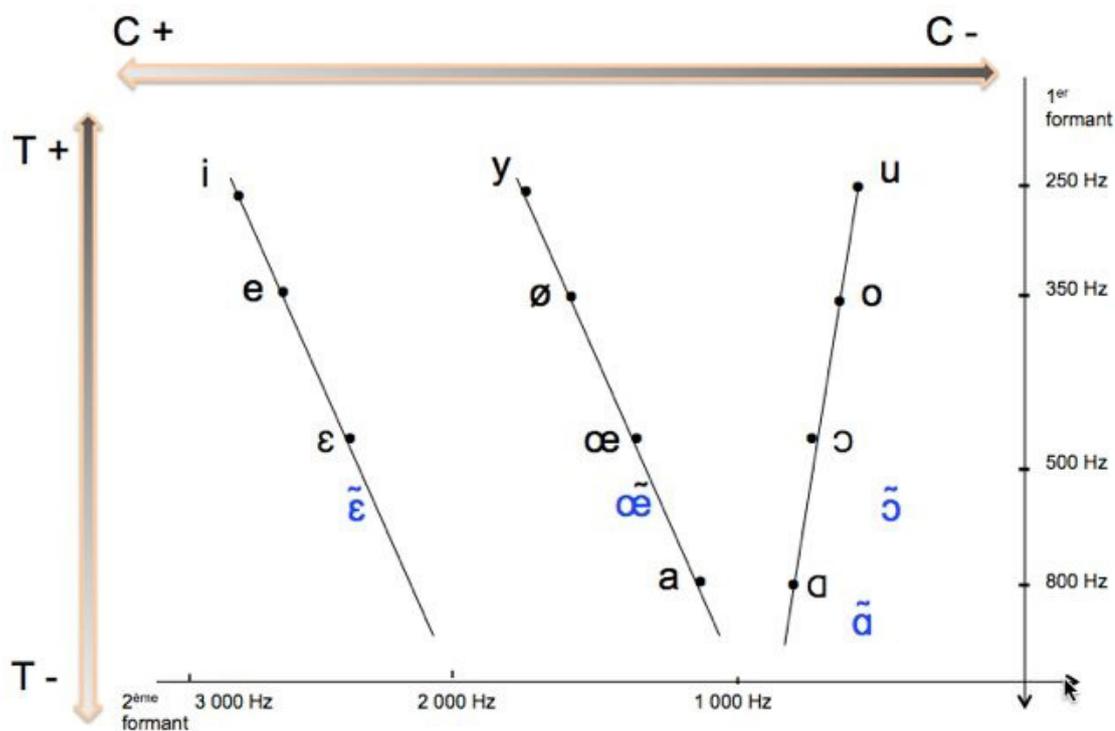


FIGURE 6.1 : Les voyelles du français, classées selon les deux premiers formants. Plus ou moins claires (antérieures C+, postérieures C-) et tendues (fermées T+, ouvertes T-).

Mélancolie des étoiles a été conçu, dans un premier temps, pour être présenté à un public francophone, c'est pourquoi les phonèmes du français sont pris pour illustration. Il en irait de façon similaire pour d'autres langues, quand bien même se présentent des différences notoires, par exemple en anglais américain où le nombre de voyelles³ est de 22 contre 15 dans notre cas. La figure 6.1 montre une classification des phonèmes du français selon les deux premiers formants⁴ (à noter l'absence du [ə] correspondant au e muet). Celle-ci correspond au placement de la langue dans le palais lors de la prononciation.

³Ces chiffres correspondent à ceux pris en compte par le logiciel CMU Sphinx et ses modèles acoustiques principaux. Il est plus généralement admis 12 voyelles et 14 diphtongues en anglais. En français, le logiciel ne fait pas de différence entre le [a] de "patte" et le [ɑ] de "pâte". En revanche, les phonèmes [œ] de "brun" et [ɛ̃] de "brin" sont tous deux représentés.

⁴Un formant est une fréquence renforcée du spectrogramme. Elle détermine le timbre caractéristique.

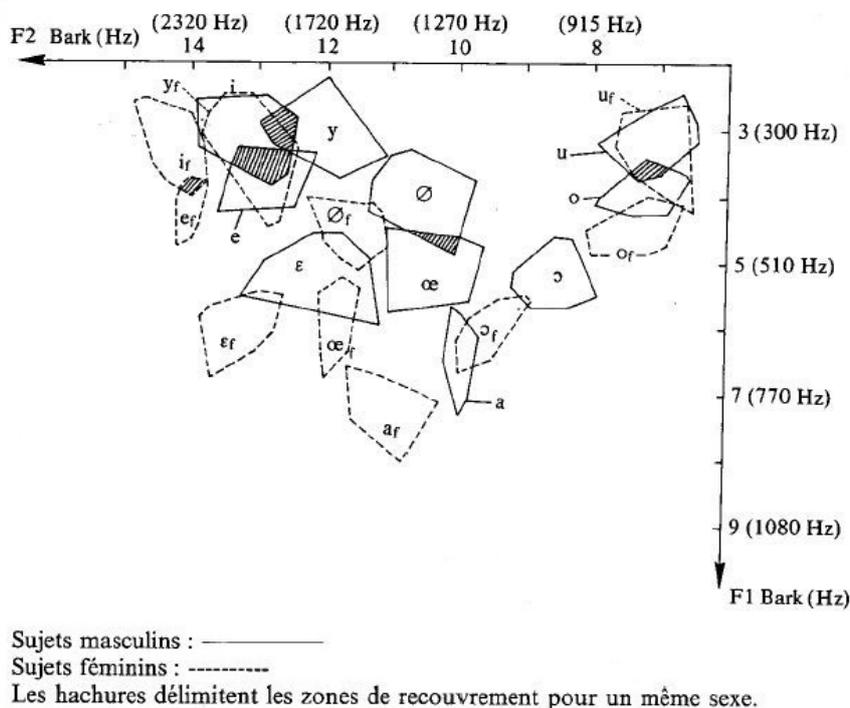


FIGURE 6.2 : Zones de dispersion des voyelles non nasales du français selon le plan F1/F2 (échelle de Bark).

À la vue de cette représentation il pourrait sembler aisé de reconnaître ces voyelles dans un environnement adéquat (peu bruité, avec un bon échantillonnage, etc.) mais ce n'est malheureusement pas le cas. Non seulement ces valeurs sont approximatives mais elles varient d'un locuteur à un autre et plus généralement en fonction du sexe, de l'âge et de l'appartenance communautaire. La figure 6.2 en donne une illustration avec ses aires de recouvrement⁵.

En pratique cependant, c'est cette approche qui est employée, du moins dans un premier temps. En effet, contrairement aux consonnes, les voyelles (et les semi-voyelles [j] de "fille", [w] de "oui" et [ɥ] de "lui") sont sonores, elles ont ainsi un spectre d'énergie élevé qui permet de les retrouver et les distinguer des consonnes et silences.

⁵Extrait de Calliope, *La Parole et son Traitement Automatique*, 1989. [44, p. 85]

6.3 CMU Sphinx

S'appuyant sur des recherches menées à la Carnegie Mellon University (CMU) depuis plus de vingt ans, CMU Sphinx est un projet *open source* proposant des outils de reconnaissance vocale. Initié par Kai-Fu Lee en 1986, CMU Sphinx est devenu libre de droit et ouvert à partir de l'an 2000. Plusieurs versions se sont succédées, améliorant efficacité et performances. L'idée principale est de fournir un programme informatique de reconnaissance vocale continue, multilocuteur et au vocabulaire dense. Pour cela, il s'appuie sur des chaînes de Markov cachées et d'un modèle statistique du langage (*n-gram*). Des résultats intéressants ont été obtenus et plusieurs centres de recherche ont pu contribuer à son enrichissement, et y introduire d'autres langues, comme le français, grâce aux travaux de l'Université du Maine. Cette dernière ayant développé un modèle et un dictionnaire phonétique de 56 000 mots, ce qui peut sembler peu au regard des plus de 250 000 mots qu'une encyclopédie peut contenir (noms propres compris) auxquels il faudrait ajouter les formes conjuguées des verbes. Cependant, pour un usage courant, ce nombre est respectable.

En pratique, écrit originellement en langage C++, les dernières versions sont déclinées en Java. Le code source est disponible et nous avons opté pour une version "légère" en C++ (Pocket-Sphinx) de reconnaissance en continu, correspondant à nos besoins. Après quelques recherches et tentatives, il n'a finalement fallu que peu de modifications pour pouvoir l'utiliser de manière autonome. Sur le principe, le moteur de reconnaissance se lance dès qu'un signal sonore (un son ou un bruit) dépasse un certain seuil et se poursuit jusqu'au prochain silence ou un temps déterminé. Ensuite, le programme tente de déchiffrer une phrase et ce sur un seul processeur (un seul cœur), ce qui s'avère prendre un certain temps. De deux secondes pour un seul mot, cela peut tendre vers les trente pour une phrase entière (et parfois se bloquer plus longtemps en cas de reconnaissance infructueuse). S'il s'agit d'une prouesse au vu de la complexité de la tâche, cela peut être un inconvénient pour nos besoins. C'est pourquoi nous avons choisi de mobiliser trois cœurs pour cette fonction, permettant de relancer directement une nouvelle reconnaissance en parallèle d'une phase de transcription et évitant les problèmes liés aux blocages éventuels.

Aussi, des phrases courtes augmentent l'efficacité de la reconnaissance tout comme elles réduisent le temps de latence. En effet, malgré le fait qu'il soit multi-locuteurs, CMU Sphinx parvient à retranscrire relativement correctement des mots isolés ou des phrases très courtes, alors que la situation se dégrade très vite pour les phrases. Cependant, ce que nous recherchons est qu'il reconnaisse quelque chose, même de façon erronée, le spectateur ne disposant *a priori* d'aucun indice sur la correspondance des signes

plastiques relativement aux phonèmes. Enfin, pour répondre le plus rapidement possible à sa voix, dès que la phase d'enregistrement débute, les signes représentant les cellules souches se reproduisent, avant qu'elles ne mutent une fois la reconnaissance achevée. Il en résulte une absence de temps mort qui permet de retenir l'attention du spectateur.

Danger du langage pour la liberté de l'esprit : chaque mot est un préjugé.

Friedrich Nietzsche

Humain, trop humain, 1879.
Vol. II *Le voyageur et son ombre*. § 55

7

Représentation des cellules

Mélancolie des étoiles se présente sous la forme de "cellules" affichées sur un écran. Chacune représentant un phonème, le silence, ou encore une cellule souche. Chaque phonème est décliné en trois versions, normale, vérolée ou dérivée, cette dernière représentant l'apoptose d'une cellule. Pour chaque version, une dizaine de touches colorées ont été réalisées par Edwige Armand, sous forme de peinture acrylique au doigt. Au total, il y en a plus de mille qui, à l'origine tout au moins, étaient de taille et de forme différentes. Une fois photographiées, chacune a ensuite été détournée. À partir de là, plusieurs choix se sont offerts.

L'idée étant de représenter plusieurs centaines voir quelques milliers de cellules "vivantes" avec la possibilité de muter, s'infecter, se reproduire et mourir. À cela s'ajoute la contrainte de temps réel (soit 60 images par secondes pour une bonne fluidité). Pour conserver une cohérence et faciliter le développement sous ces conditions, une première étape a été de trianguler ces images, traitement qui dû être automatisé. Ensuite, pour leur donner un semblant de "vie", l'utilisation de déformations de Bézier m'a paru adapté pour ce problème. Enfin, les mutations font intervenir un morphing entre triangulations distinctes, réalisé en adaptant les déformations "As Rigid As Possible" en ce sens, solution aussi valable pour la phase de reproduction cellulaire.

7.1 Triangulation automatique

Afin de gérer l'ensemble de toutes les touches colorées (plus de mille conservées à la fin), chaque traitement doit être automatisé. N'utiliser que des textures n'aurait pu permettre des déformations en temps réel, et moins encore des mutations esthétiquement acceptables. Une triangulation fine, couplée à un lissage bilinéaire des textures, a semblé le meilleur moyen de répondre à ces contraintes. S'il existe des méthodes, le choix d'une réécriture, comme pour le reste, nous laisse une liberté d'action et nous a permis une adaptation à ces formes qui, au fur et à mesure, sont devenues de plus en plus homogènes.

Les touches colorées sont censées être presque convexes et d'une taille approximativement identique. Dans ces conditions, il est possible d'imposer un nombre fixe de points de contour pour chacune, orientés de la même manière. D'un côté cela offre une certaine cohérence générale et de l'autre prépare aux mutations et aux reproductions. La finesse du maillage quant à elle assure une fluidité aux déformations et aux transformations.

Cette opération s'effectue en cinq étapes :

- 1 - Création d'un masque. Le but étant de représenter une forme par un maillage de triangles, il est impératif de déterminer l'ensemble des points à recouvrir. Les formes étant "presque convexes", un balayage double de chaque ligne suffit (en partant du bord gauche et du bord droit).
- 2 - Détermination des points de contour. À partir d'un nombre déterminé n de points de contour, lancer n rayons dans n directions à partir du centre et définir les points qui sont au bord de la forme. Ces directions seront fixes et demeureront les mêmes pour chaque touche colorée afin de faciliter les mutations.
- 3 - Éloignement des points de contour pour recouvrir entièrement la forme. Une fois ces points déterminés, le maillage interne recouvre l'enveloppe convexe des points de contour et n'englobe généralement pas toute la forme. Pour chaque pixel (point) du masque qui n'est pas pris en charge, il faut éloigner le point de contour le plus proche, itérativement jusqu'à ce que le masque soit entièrement recouvert. Cette étape nécessite un redimensionnement de l'image, le contour pouvant déborder de l'originale.
- 4 - Construction des triangles internes jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de trou. Ce processus se fait en intégrant les triangles équilatéraux internes de chaque paire de points de contour consécutifs. Ensuite, les sommets internes sont soit regroupés s'ils

sont assez proches, soit un nouveau triangle est construit, à partir d'un point de contour et des deux sommets conservés. Ce processus est réitéré pour les nouveaux sommets jusqu'à ce que toute la surface soit recouverte (absence de trou).

- 5 - Réajustement des sommets internes les moins homogènes. Enfin, le processus peut amener à une diversité dans la taille des triangles (longueur des arêtes). Un affinage est alors effectué pour homogénéiser l'ensemble. Itérativement, du sommet le plus mal placé jusqu'à obtention d'une distribution satisfaisante (en terme de minimisation des écarts de longueur).

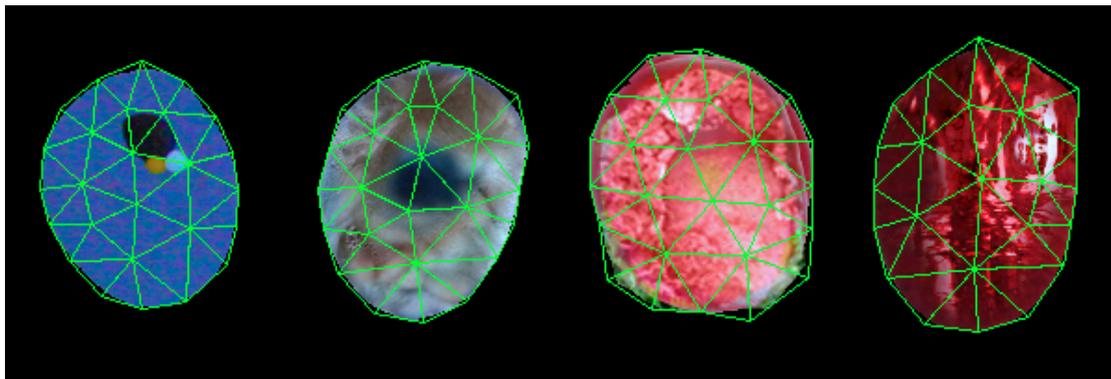


FIGURE 7.1 : Exemples de triangulation automatique

Une triangulation est effectuée pour chaque touche colorée et les résultats sont sauvegardés. Il n'y a aucune contrainte de temps réel puisque c'est une opération qui est exécutée en amont, une seule fois. Aucune optimisation n'a été nécessaire, cette étape ne prenant que quelques dizaines de secondes sur un seul processeur pour plus de mille cellules.

En fixant le nombre de points de contour à 16, nous obtenons des maillages jusqu'à 27 points et 34 triangles (Figure 7.1), nombres importants pour l'optimisation des calculs dans les sections suivantes. Ces triangles ne mesurent que quelques pixels, ce qui permet aussi une adaptabilité à tous nos besoins et une finesse dans leur application. Ces données sont sauvegardées et prêtes à être utilisées pour la suite.

7.2 Déformations de Bézier

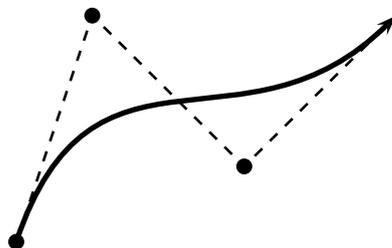


FIGURE 7.2 : Courbe de Bézier à quatre points de contrôle

Bien connues en synthèse d'images, les déformations de Bézier peuvent être vues comme une courbure du plan ou de l'espace. La courbe, le plan ou l'espace est exprimé comme fonction paramétrique où chaque point est reconsidéré en fixant des points de contrôle qui ont une influence (une attractivité) suivant le ou les paramètres. Un exemple simple est donné dans la figure 7.2. La formule permettant la construction de cette courbe est donnée par :

$$P(t) = (1 - t)^3 P_0 + 3t(1 - t)^2 P_1 + 3t^2(1 - t) P_2 + t^3 P_3, t \in [0; 1]$$

Ce type de déformation fait intervenir les combinaisons (avec les polynômes de Bernstein) et est facilement adaptable à deux ou trois dimensions. Une description formelle est donnée en annexe C. La figure 7.3 donne un exemple de plan déformé par seize points de contrôle, correspondant au modèle retenu. Typiquement, ces points sont à l'origine disposés régulièrement autour de la forme de manière à obtenir un quadrillage de quatre points par quatre (trois unités par trois). Ceci correspond à une forme bicubique de Bézier (de degré trois pour chaque axe). Ces points sont ensuite déplacés un à un autour de leur position d'origine.

Cependant, malgré la simplicité de la formule, son traçage a un coût non négligeable. Originellement, OpenGL (Open Graphics Library) offre la possibilité d'effectuer directement ces déformations mais, concernant leur application à des formes texturées (comme les touches colorées), et leur affichage, il n'est pas possible d'en obtenir plus d'une trentaine en temps réel (60 images par seconde). Cela ne convient donc pas à notre propos où il est question de centaines ou de milliers de cellules déformées en même temps.

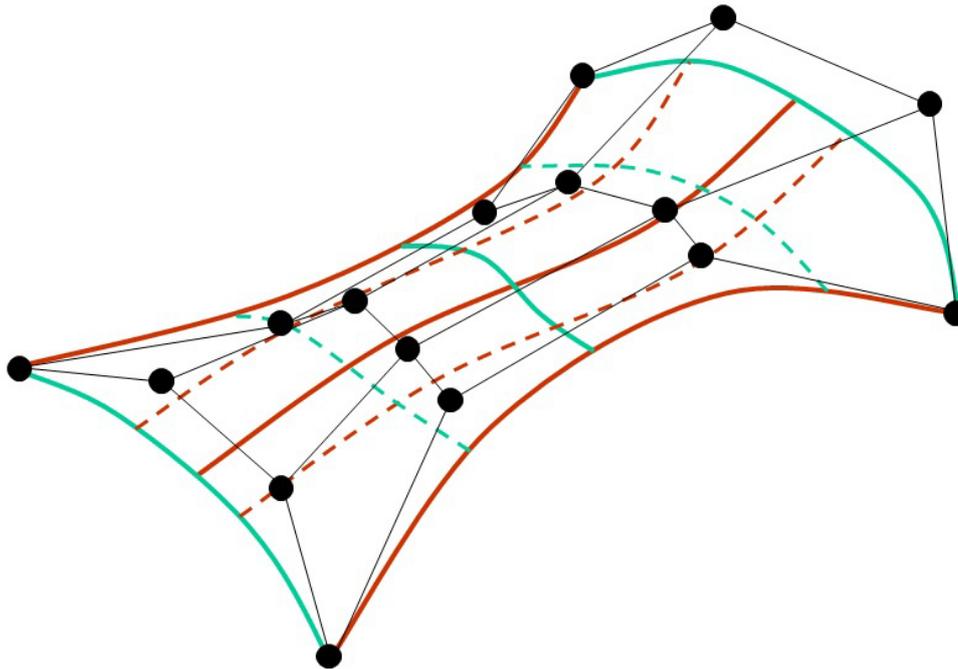


FIGURE 7.3 : Surface de Bézier bicubique

L'idée étant de donner un semblant de vie à ces cellules, il convient de déplacer chaque point de contrôle à chaque pas de temps pour chacune d'entre elles. En effet, les déformations doivent être continues pour donner une impression de mouvement interne. Pour réaliser cet effet, chaque point de contrôle est déplacé suivant une sinusoïde paramétrique, comme par exemple celle représentée par la figure 7.4, courbe représentative définie par la formule :

$$x(t) = \sin(1,321t), y(t) = \sin(0,733t), t \in [0; 27\pi]$$

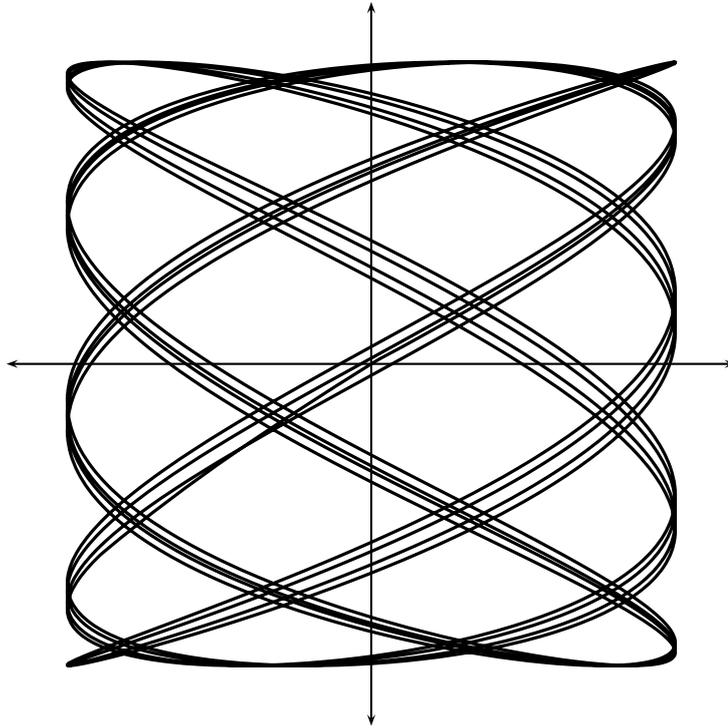


FIGURE 7.4 : Extrait de courbe sinusoïdale paramétrique

Sa représentation pour t tendant vers l'infini aurait plutôt la forme d'un carré noir¹. Ainsi chaque point oscille autour de sa position de départ, dans des limites raisonnables et le résultat est conforme à nos attentes, donnant un effet visqueux aux cellules. Chacune a son propre ensemble de courbes paramétriques (une pour chaque point de contrôle) dont les coefficients sont obtenus pseudo-aléatoirement.

Il reste cependant le problème du temps de calcul et d'optimisation pour supporter un nombre conséquent de cellules déformées en temps réel. Pour cela, du fait de la triangulation fine des signes plastiques (de seulement quelques pixels), l'idée retenue a été de ne calculer les déformations que pour les sommets des triangles avant d'effectuer

¹La courbe pouvant prendre n'importe quelle valeur entre -1 et 1 , mais elle n'est tout simplement pas représentable car il est possible de trouver une infinité de points où la figure ne passe pas quand bien même l'on peut en trouver d'autres aussi proches que l'on souhaite. Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'"aucune trajectoire différentiable, même de longueur infinie, ne peut recouvrir une aire dans le plan"², résultat dû (entre autres) à Plancherel. Hourya Benis Sinaceur indique que c'est à Dedekind (1831-1916) que l'on doit la preuve que toute bijection d'un continu à une dimension sur un continu à deux dimensions ne peut pas être continue (et donc encore moins différentiable). In Richard Dedekind, *La création des nombres*, 2008 [61, p. 55]

²Norbert Wiener, *La cybernétique*, 1948 [186, p. 125]

un lissage bilinéaire des textures. Le rendu visuel est très proche du résultat obtenu par un calcul direct complet et impossible à différencier à l'œil nu. Le principal avantage étant que d'une trentaine d'objets texturés déformés, il a été possible d'en produire plus d'un millier sans aucun ralentissement. La limitation étant essentiellement due au problème de l'affichage de plus d'une centaine de milliers de triangles texturés. Comme il sera vu par la suite, une optimisation supplémentaire nous a permis d'en obtenir plus de trois milles en temps réel (60 images par seconde).

7.3 Mutation As Rigid As Possible

Mélancolie des étoiles met en scène des signes plastiques représentant des cellules, celles-ci peuvent muter pour se spécialiser, devenir infectées ou encore entrer en apoptose. Enfin, elles sont capables de se reproduire. Concrètement, pour une mutation, il s'agit de passer d'un signe plastique à un autre, plus précisément d'une forme triangulée texturée à une autre. Si les formes sont relativement semblables, leur maillage ne l'est pas toujours. C'est donc dans cette perspective que les points de contour ont été fixés à seize pour chaque cellule.

Plusieurs techniques existent pour opérer cette opération de morphing. Dans tous les cas, il faut effectuer une retriangulation de l'une des deux formes pour appliquer une sorte de glissement de l'une à l'autre. Il est aussi important de s'intéresser aux contours de celles-ci pour éviter tout effet de disparition ou de création *ex nihilo* autour d'elles, tendance qui serait non seulement inesthétique mais qui décrédibiliserait cette mutation. Le choix a été fait de retriangler la première forme afin que, une fois la mutation achevée, celle-ci corresponde exactement à la forme finale, sans aucun calcul supplémentaire.

Les points de contour du maillage de la forme finale sont donc déplacés vers ceux de la forme initiale qu'il s'agit de trianguler suivant ce maillage. La technique la plus appropriée au sens d'une minimisation de l'énergie de transformation (au sens des moindres carrés) est la transformation dite ARAP (As Rigid As Possible). Celle-ci a d'abord été développée par Olga Sorkine³ pour la déformation d'objets solides, rendant celle-ci plus "naturelle" relativement aux techniques habituellement employées. Mais elle s'avère aussi très efficace dans le cas du morphing, comme l'a montré William Baxter⁴. Une description technique de cette méthode est donnée en annexe B (p. 161).

³Olga Sorkine, Marc Alexa, *As-Rigid-As-Possible Surface Modeling*, 2007. [174]

⁴William Baxter *et al.* *Rigid shape interpolation using normal equations*, 2008. [18]

Une fois le nouveau maillage obtenu, il reste à déplacer chaque sommet vers sa destination en mixant les textures. Cette opération, plutôt que de l'effectuer linéairement, est réalisée selon une sinusoïde afin de fluidifier le mouvement, obtenant une courbe de classe C^1 (une fois dérivable). Les textures sont mixées (mélangées) de la même manière, d'où un léger effet d'accélération-ralentissement dans la mutation. Pour des formes fixes, le remaillage n'aurait aucune conséquence visuelle lors du passage de l'ancien au nouveau mais il s'agit ici de maillages déformés par une transformation de Bézier. Du fait de la fine triangulation, aucun saut n'est à déplorer et la transformation s'effectue naturellement, la touche colorée conservant les mêmes déformations continues avant, pendant et après la mutation.

L'apoptose des cellules suit la même démarche, la touche colorée suit une mutation vers sa version dite dérivée puis s'efface progressivement jusqu'à disparaître complètement. Comme pour chaque mutation, celle-ci se fait relativement rapidement tandis que la dégradation est un peu plus lente, fusionnant graduellement avec le fond noir. Une fois encore, une fonction simple est utilisée pour l'intensité de la texture : $p(t) = \frac{1+\cos(\frac{t\pi}{a})}{2}$, $t \in [0; a]$ avec a la durée, qui conserve la classe C^1 de la courbe de transformation et évite ainsi une cassure au moment du passage à l'apoptose.

7.4 Reproduction

Les cellules sont capables de se reproduire, c'est à dire de se répliquer. Cette opération nécessite plusieurs étapes pour obtenir un rendu plausible satisfaisant. Il s'agit de simuler un accroissement cellulaire suivi d'une séparation. Techniquement, étirer une forme et combler son centre en faisant apparaître les parties manquantes au fur et à mesure de l'opération n'est pas envisageable. Il faudrait que cette forme soit parfaitement homogène et symétrique pour éviter que ne survienne une cassure à l'endroit de la séparation. S'agissant de maillages texturés, cela conduit à une juxtaposition incohérente de deux moitiés de formes, ôtant toute crédibilité au phénomène. Pour remédier à cela, à l'image des cellules qui dupliquent leur noyau avant de se séparer, la cellule est divisée en deux parties, la première ne subissant aucune transformation tandis que la seconde se métamorphose en un miroir de la première par la technique utilisée pour les mutations.

Ensuite, elles peuvent s'étirer chacune de son côté et les parties nouvelles qui apparaissent sont exactement le reflet l'une de l'autre, offrant une continuité dans le mouvement et la forme. Les déformations de Bézier sont conservées pendant ces deux phases (mutation, séparation) et une nouvelle cellule, miroir de la première, est ainsi créée (Fi-

gure 7.5). De même que lors des mutations, une sinusoïde est employée pour donner plus de vigueur dans le mouvement, se rapprochant, en accéléré, des reproductions cellulaires réelles.

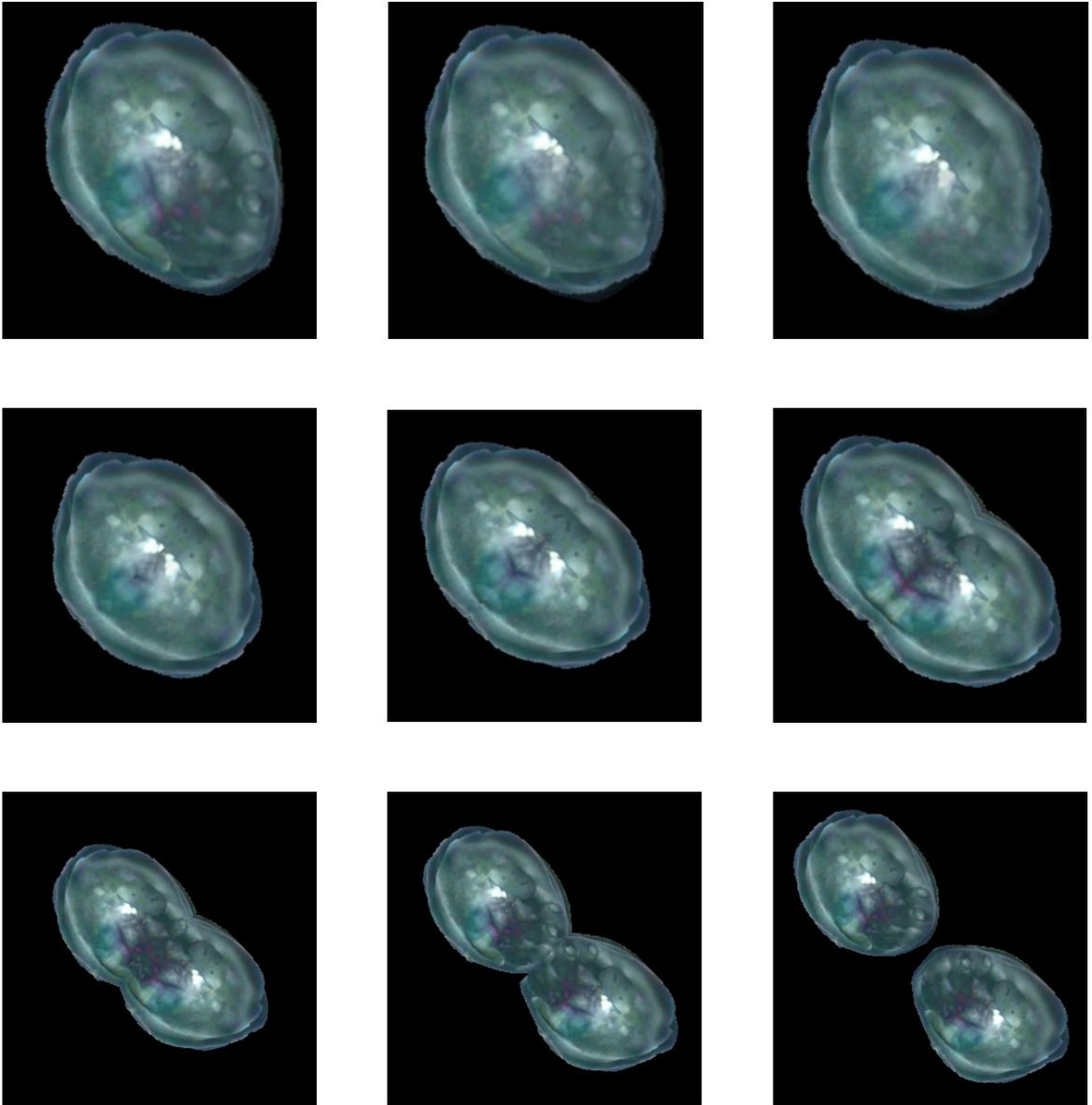


FIGURE 7.5 : Reproduction d'une cellule souche

7.5 Rendu

La question de l’affichage pose, outre la nécessité de rendu en temps réel (60 images par seconde, soit moins de 16,7 millièmes de seconde de temps de calcul disponible pour chaque image) d’une centaine de milliers de triangles texturés, celui de leurs déformations. Si cela n’est pas envisageable avec les fonctions basiques (à ce jour obsolètes) d’OpenGL, il a fallu reprogrammer non seulement celles-ci, mais aussi optimiser chaque opération et renvoyer le maximum de calculs directement aux processeurs graphiques (GPU, *Graphics Processor Units*), tout en limitant les échanges entre la mémoire centrale et celle de la ou des cartes graphiques. Et l’ensemble de ces traitements implique aussi de tenir compte de l’architecture interne de ces dernières, le code pouvant être optimisé non seulement pour une certaine marque de processeur graphique mais aussi selon un ensemble de modèles spécifiques.

Pour des questions de performances, le choix s’est porté sur des cartes NVIDIA, de modèle GeForce GTX 470 ou supérieur (architecture *Fermi* ou suivantes, *compute capability* 2.0 ou plus). Sans entrer dans les détails, cela a été nécessaire afin de pouvoir utiliser au mieux des blocs de calcul parallèle composés de 32 cœurs, qui restent en deçà du maximum des 27 sommets maximum par cellule. Ce choix a permis d’utiliser la programmation dans le langage *CUDA*, spécifique à NVIDIA, pour le calcul et l’optimisation des transformations de Bézier (le code est reporté en annexe C, p. 165). À ce jour, la carte utilisée est une GeForce GTX 970 (*Maxwell*, *compute capability* 5.2), dotée de 1664 cœurs (par blocs de 128), qui a été doublée en vue d’une possibilité de transfert à un écran ultra-haute définition.

Afin d’obtenir l’affichage en temps réel du maximum d’éléments, l’ensemble du millier d’images représentant les cellules est sauvegardé en une seule fois à la mémoire des cartes graphiques. Ensuite, il a fallu minimiser les appels (coûteux) d’OpenGL pour le rendu des triangles, chaque touche colorée est alors stockée dans des *Buffer Objects* et traitée via une reprogrammation des unités de calcul de rendu, effectué en *GLSL* (*OpenGL Shading Language*) selon l’effet désiré (mutation, reproduction ou apoptose). Le processeur est alors déchargé au maximum des besoins et la communication entre ce dernier et les cartes graphiques réduite.

*Des machines, filles de
l'homme et qui n'ont pas de
mère, vivent une vie dont
les sentiments et les passions
sont absents.*

Guillaume Apollinaire

L'Esprit nouveau et les
poètes, 1917

8

Évolution et comportement

Mélancolie des étoiles présente des phonèmes issus de la voix du spectateur sous forme de cellules. L'idée principale étant la déconstruction du langage et le fait que les mots nous enferment dans des représentations rigides, incapables de décrire notre ressenti. Et c'est ainsi pourquoi ils sont ici considérés comme des virus. Ce chapitre détaille les principes de fonctionnement de la pièce, de la manière dont se comportent lesdites cellules jusqu'à leur apoptose, en passant par l'éventualité d'une infection.

8.1 Comportement

Au départ, quelques cellules souches sont présentes et peuvent éventuellement se dupliquer au fil du temps. Leur présence est indispensable tout au long de la pièce, comme réserve, dans le cas d'une apoptose généralisée qui tuerait toutes les cellules. Leur situation est donc particulière et il a été décidé qu'elles ne pouvaient pas être infectées. Une fois qu'un son a été détecté, la reconnaissance vocale se met en marche, mais celle-ci doit commencer par enregistrer le signal sonore avant d'initier la phase de transcription.

Comme cela peut prendre jusqu'à plusieurs longues secondes, des cellules souches commencent immédiatement à se dupliquer afin de fournir la matière première aux prochains phonèmes. Une fois un mot ou une phrase reconnu, ces cellules vont se différencier. Si rien n'a été identifié, les phonèmes retenus sont obtenus de manière pseudo-aléatoire.

Une quantité d'énergie est assignée à chaque phonème, grande pour les voyelles et semi-voyelles, très faible pour les consonnes, à l'image de leur niveau sonore (de leur spectre d'énergie). Ce qui amènera ces dernières à tenter de se rapprocher des premières pour ne pas faiblir trop rapidement. Ainsi même si les cellules errent sur l'écran, des groupes peuvent se former. Dans un premier temps, chaque cellule est "neutre" et n'a aucune affinité particulière envers les autres. Elles essayent simplement de survivre le plus longtemps possible, mais cela risque de ne pas durer.

Du côté programmation, l'énergie est intégrée par une simple variable par cellule, les échanges se faisant de la plus forte vers la plus faible, sur un rythme relativement lent mais plus rapide que la perte "naturelle" les emmenant à l'apoptose. Une liste de l'ensemble des cellules est composée et mise à jour en temps réel. Les groupes, eux, sont représentés sous forme de graphes, gérés indépendamment, chaque cellule pouvant avoir au maximum huit voisins (chiffre choisi arbitrairement). Si deux cellules liées s'éloignent trop, elles se désolidarisent, bien qu'elles puissent toujours faire partie d'un même groupe sans être directement liées. Toutes ces opérations, de même que l'ajout ou le retrait d'une cellule, sont traitées dynamiquement en temps réel.

8.2 Virus et antagonismes

Les mots ont un effet réducteur sur la pensée, ils limitent nos possibilités et ont de ce fait un comportement de corruption sur les émotions. Dès lors que dans un groupe de phonèmes une suite d'au moins cinq phonèmes¹ forme un mot du dictionnaire, les cellules se retrouvent infectées et deviennent des virus. À partir de ce moment-là, elles se transforment en quelque sorte en zombies et ne perdent plus d'énergie, mais peuvent alors contaminer les autres phonèmes. Les cellules saines, quant à elles, vont être leurrées en ne sachant pas différencier les cellules vérolées et risquer à leur tour une infection. C'est ici qu'intervient la notion d'apprentissage.

¹Chiffre arbitraire mais nécessaire afin d'éviter que la moindre rencontre d'une consonne et d'une voyelle ne les transforme en virus.

N'ayant aucun moyen de savoir si une autre cellule est fiable ou dangereuse, les cellules saines vont devoir adopter un comportement antagoniste, risquer l'infection ou choisir la mort par manque d'énergie. Pour contrecarrer cela, les phonèmes disposent d'un génome qui leur permet d'évaluer le danger. Individualisé pour chaque phonème et neutre dans un premier temps, ceux-ci vont évoluer à chaque création de virus, modifiant une valeur de dangerosité (d'attraction-répulsion²) entre chaque couple de phonèmes. Mais, comme la tendance dans ce cas serait d'aller vers toujours plus de répulsion, un équilibrage est effectué par les phonèmes restés sains, proportionnellement à leur durée de vie. Cependant, l'évolution étant imprévisible, il est nécessaire d'introduire un garde-fou en utilisant des limites et une cohérence d'ensemble³.

Du point de vue informatique, chaque phonème a un génome composé de 35 valeurs d'attraction-répulsion, correspondant aux 35 phonèmes utilisés. Mais chaque cellule a son propre génome, miroir de celui du phonème correspondant, éventuellement avec de faibles mutations. Une rencontre provoquant un virus va affecter les génomes de base qui auront une répercussion sur les générations futures uniquement. Une cellule mourant sans avoir été infectée pourra limiter les effets de répulsion sur les suivantes. Les voyelles sont aussi moins affectées, étant donné qu'elles sont sources d'énergie et qu'elles participent plus fréquemment à la formation des mots. En ce qui concerne la recherche de virus, cela s'apparente à des parcours complets de graphes, avec un temps de calcul exponentiel. Cependant, celui-ci s'en trouve réduit dès lors que ne sont prises en considération que les cellules saines différenciées, celles en train de muter ou de mourir brisant la chaîne.

8.3 Vie et mort

Si les cellules saines, en épuisant leurs ressources, peuvent entrer en apoptose, il n'en est pas de même des virus qui sont dans un état figé. C'est alors le rôle du silence que de venir perturber la prolifération des mots. Ces cellules d'un autres type, blanches à l'image des lymphocytes⁴, sont les seules capables de reconnaître et venir à bout des virus. Elles n'ont pas à proprement parler d'énergie (le silence a un spectre sonore plat), mais sont capables de détruire les virus en les faisant muter et entrer en apoptose. C'est

²Cette valeur, initialisée à 0,5 se rapproche de 0 pour la répulsion ou de 1 pour l'attraction, influençant les distances critiques de rapprochement-éloignement entre cellules. Chaque modification de valeur s'effectue selon un pourcentage d'écart vers les valeurs limites (7,5% pour l'affinité pour une durée de vie sans infection de plus de 5 minutes (proportionnellement en deçà) et 12,5% pour la répulsion).

³Chaque phonème doit rester viable et ne pas se contenter d'une mort naturelle en évitant tout contact.

⁴Les lymphocytes, ou globules blancs, sont chargés de la défense immunitaire.

cette opération qui a un coût et leur donne une certaine durée de vie. Leur nombre et leur apparition, par reproduction, sont régulés en fonction de l'intensité de l'infection.

Ces cellules utilisent différemment leur génome, celui-ci leur servant à différencier et attaquer les cellules les plus susceptibles de former de nouveaux virus. Elles errent plus ou moins librement sur l'écran et repèrent les cellules infectées à une certaine distance. Elles parviennent à bloquer la prolifération en entrant en contact avec les cellules atteintes. Du point de vue programmation, rien de nouveau n'a dû être implémenté, la détection de collision étant déjà utilisée pour le maintien à distance des cellules d'un groupe. De plus, celle-ci est facilitée par le côté quasi-convexe des cellules, même déformées. L'évaluation du carré de la distance au centre de deux cellules étant réalisée, une détection de collision et le calcul de la distance "bord à bord" sont accomplis le cas échéant.

8.4 Expérimentation

Du fait de la forte dépendance aux phénomènes pseudo-aléatoires comme les mutations multiples, il est délicat de tirer des conclusions directes sur l'évolution de *Mélancolie des étoiles* au cours du temps. Cependant des tests artificiels ont fait apparaître certaines régularités statistiques mais aussi une progression générale. Trois simulations ont été conduites en laissant évoluer la pièce de quatre à dix heures avec une injection virtuelle de mots à un rythme soutenu. Deux ont été lancées sans apprentissage préalable et la dernière avec celui obtenu après une exposition au public de quatre heures, suivie d'essais en fonctionnement normal.

Cette exposition a été réalisée dans des conditions peu favorables car collective dans un espace restreint avec un public nombreux et beaucoup de bruit. C'est pourquoi le programme injectait des mots virtuels pour maintenir une population de 150 cellules. La parole des spectateurs pouvait alors s'ajouter et produire de nouveaux phonèmes en plus de ce seuil. Les personnes présentes du début à la fin ont alors constaté une évolution du comportement avec une formation de plus en plus tardive de nouveaux virus au fil du temps. Pourtant ce phénomène ne s'est pas reproduit de manière flagrante dans les essais virtuels qui ont néanmoins pu apporter d'autres résultats.

Ces expérimentations ont été réalisées avec une injection de mots à un rythme soutenu (un mot toutes les 5 secondes pour les deux premières, un toutes les 7,4 secondes pour la dernière). Si globalement les virus se forment statistiquement à une cadence si-

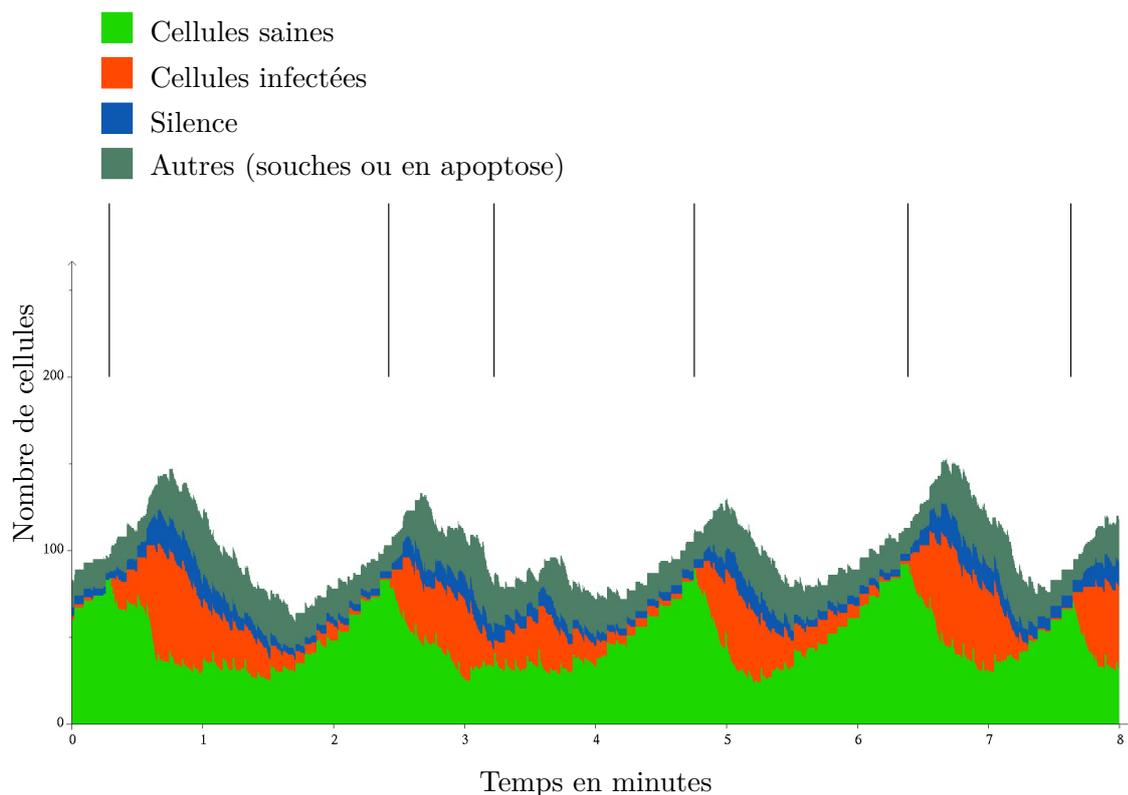


FIGURE 8.1 : Expérimentation sans apprentissage.

milaire (respectivement un nouveau toutes les 104, 105 et 108 secondes), des différences sont apparues. Dans tous les cas les virus se forment majoritairement lors de l'apparition de nouveaux phonèmes, avec une probabilité qui croît exponentiellement avec le nombre de cellules saines différenciées. Sans apprentissage, lors de la première heure de fonctionnement, rares sont les pics où plus de cent cellules saines sont présentes. La figure 8.1 représente le nombre de cellules au cours du temps en minutes. Vert pour les cellules saines, rouge pour celles infectées, bleu pour le silence et vert gris pour les autres (souches et en apoptose). Les traits verticaux indiquent la formation d'un virus.

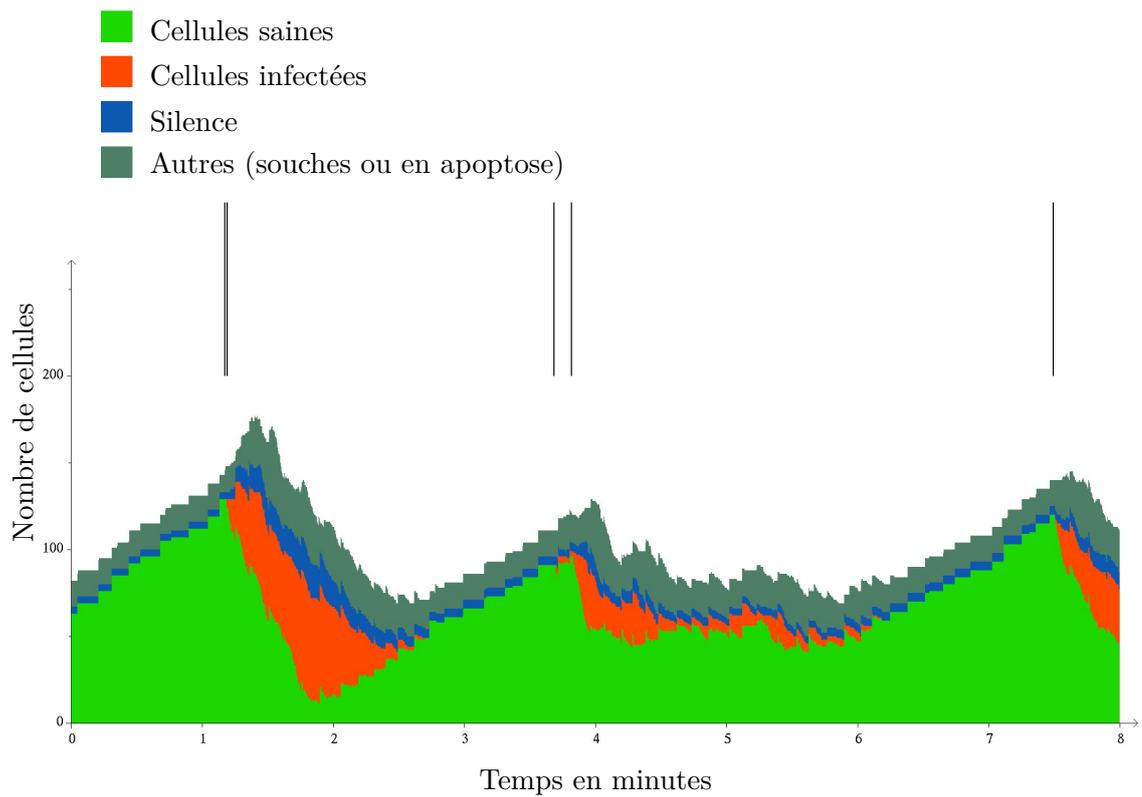


FIGURE 8.2 : Expérimentation sans apprentissage préalable, trois heures après.

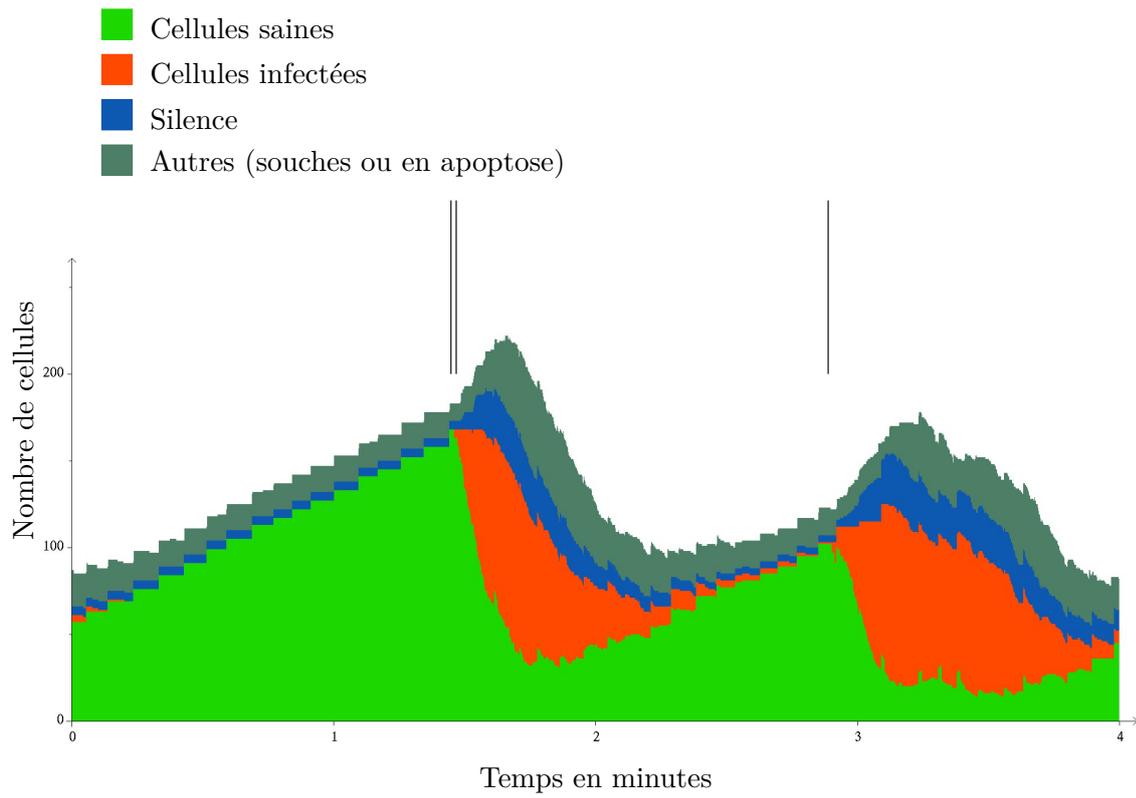


FIGURE 8.3 : Expérimentation sans apprentissage préalable, quatre heures après.

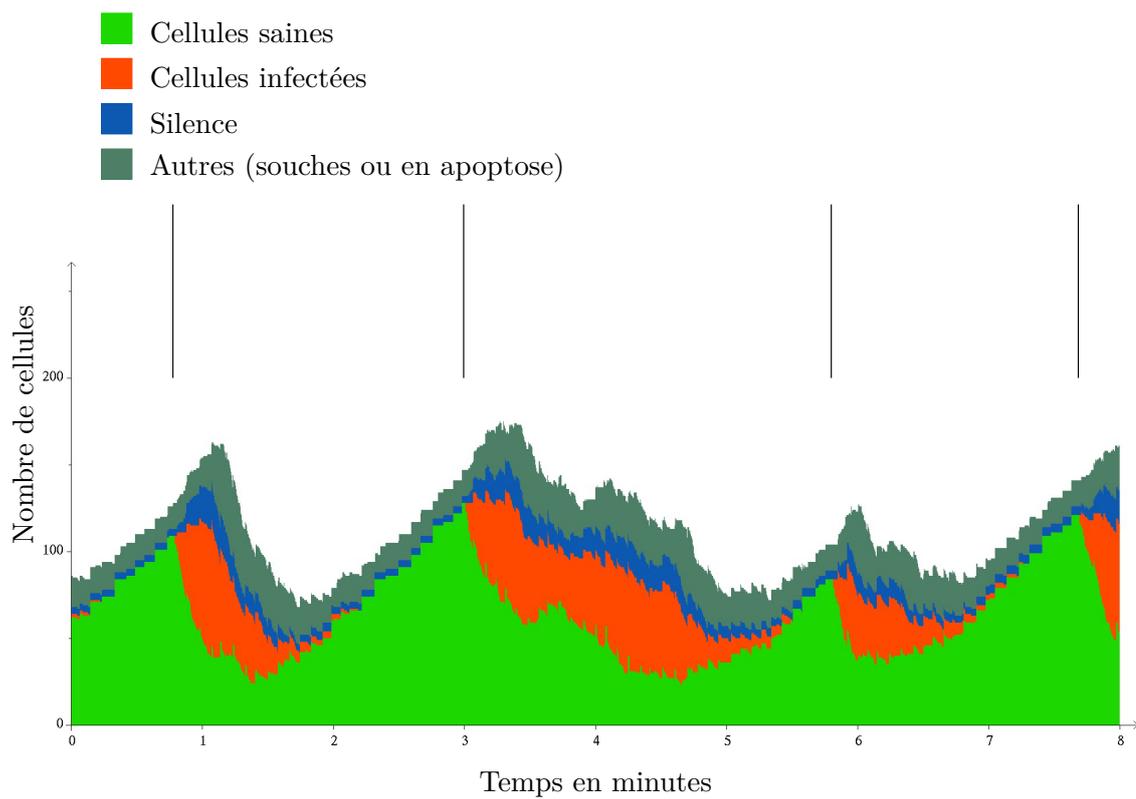


FIGURE 8.4 : Expérimentation avec apprentissage préalable.

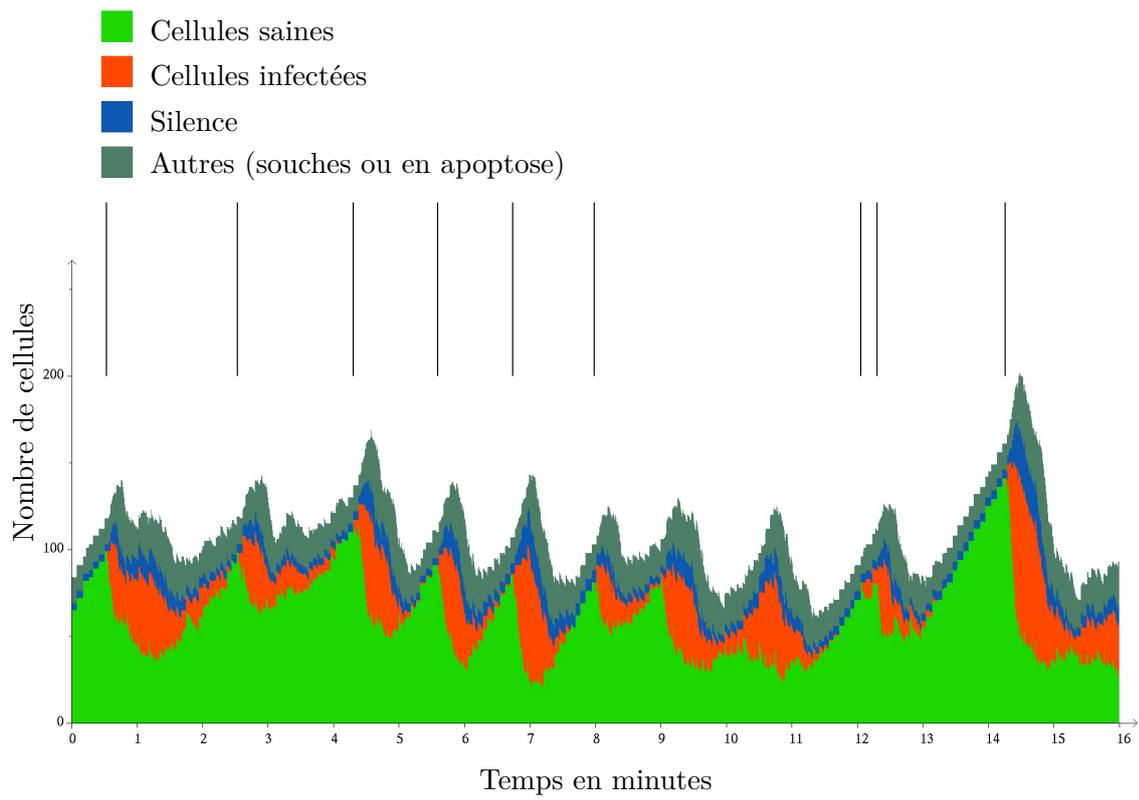


FIGURE 8.5 : Expérimentation avec apprentissage préalable, pics.

Ce n'est qu'à partir de la troisième (Figure 8.2) ou quatrième (Figure 8.3) heure de fonctionnement qu'apparaissent des pics plus conséquents. On pourra aussi remarquer l'apparition de plusieurs virus différents de manière très rapprochée. Si une phase d'apprentissage a été menée en amont, ces pics apparaissent dès les débuts de la simulation (Figure 8.4) et se rencontrent régulièrement (Figure 8.5). Il arrive plus rarement que l'on retrouve des pics moins conséquents, la pièce évoluant en phases distinctes, notamment selon l'efficacité du silence, parfois éloigné du lieu d'apparition du virus. Cependant, sans apprentissage ces hauteurs n'ont pas été atteintes. Si donc le rythme statistique d'apparition des virus reste quasiment le même pour toutes les simulations, la fréquence et surtout la hauteur des pics de cellules saines semble bien provenir de l'apprentissage de l'attraction-répulsion entre phonèmes.

La question du ralentissement de la formation de virus lors de l'exposition peut alors s'expliquer par le fait qu'un nombre de cellules avait été programmé à être maintenu, proche du seuil critique d'infection, conservant la finalité de *Mélancolie des étoiles*, mais n'aurait peut-être pas eu lieu si l'injection de mots nouveaux avait été systématique. Les cellules apprennent ainsi en quelques heures, lorsque le rythme est soutenu, à former des groupes de plus en plus conséquents en évitant autant que possible à former un nouveau virus.

Discussion

Partant d'une réflexion sur le langage, la pensée et le vivant, l'élaboration de *Mélancolie des étoiles* n'a pas été une simple mise en forme d'idées figées. Cette coécriture avec Edwige Armand est ainsi passée par des stades divers, elle-même travaillant en parallèle sur plusieurs projets. Les touches colorées ont par exemple été un temps remplacées par des morceaux de peau, dénaturant l'objet premier de la pièce. Ce fait parmi d'autres a engendré des sophistications inutiles, comme les mutations de triangulations différentes. Si les touches colorées finalement retenues ont une forme et des proportions similaires, une seule topologie aurait pu suffire. Cependant, la première version a été conservée, permettant une généricité pour d'autres applications.

Conclusion

Vie artificielle et art numérique

*Logic will get you from A to
B. Imagination will take you
everywhere.*

Albert Einstein

Du simple au complexe

Cybernétiques

Au début du XX^{ème} siècle, la science en est arrivée à un tel développement que certains physiciens pensent qu'elle est sur le point d'être totalement aboutie (p. 41). C'est tout le contraire qui s'ensuit avec l'avènement de la théorie quantique qui marquera l'effondrement du déterminisme et la spécialisation de toutes les sciences, appuyée par la multiplication des théories mathématiques (p. 44). Phénomène qui va conduire à un cloisonnement des diverses branches de la science qui pour autant vont connaître de formidables développements. En revanche certains problèmes vont être négligés car se situant dans des régions intermédiaires à diverses sciences. Mais, "en 1938, le mathématicien Norbert Wiener¹ et le cardiologue Arturo Rosenblueth² décidèrent d'entreprendre ensemble l'exploration de ces *no man's land* de la connaissance³."

C'est par ce type de questionnement, où prime l'interdisciplinarité, que vont avoir lieu les conférences Macy⁴ à New York. La première en 1942, initiée par le neurologue Warren McCulloch (1898-1969), a eu pour thème l'inhibition cérébrale. Les suivantes furent organisées une à deux fois par an entre 1946 et 1953 et prirent le nom de cybernétique. Elles ont regroupé des savants d'horizon fort divers, en particulier dans les différentes branches des neurosciences, des anthropologues, psychologues, psychanalystes, psychiatres mais aussi des mathématiciens et des physiciens. Il en est ressorti des concepts nouveaux comme le *feed-back* ou boucle de rétroaction et une discipline nouvelle, la science cognitive.

¹Norbert Wiener (1894-1964)

²Arturo Rosenblueth (1900-1970)

³François le Lionnais. In René Taton, *Histoire des sciences. Tome III. La science contemporaine. Volume 2. Le XX^{ème} siècle, années 1900-1960*, 1964. [178, p. 101]

⁴Du nom de la Josiah Macy Jr. Foundation.

Cette démarche marque une rupture radicale de l'approche scientifique traditionnelle, héritée de Descartes, où la difficulté d'un problème devait se résoudre par une décomposition en éléments plus simples⁵. À l'inverse la cybernétique s'attache à considérer les relations, les échanges entre les parties, de quelque ordre qu'ils soient, matériels, énergétiques ou informationnels. C'est l'étude du fonctionnement du système et non plus de ses composantes, ce qui amène à considérer l'influence de la rétroaction sur l'évolution globale. Celle-ci peut être positive, augmentant l'écart à la valeur initiale, ou au contraire négative, amoindrissant les déviations pour converger vers un équilibre.

Une conséquence directe en est la reconnaissance de similitudes entre systèmes ou modèles dans des domaines où ils n'étaient pas censés se rejoindre. Déjà en 1938, Nicolas Rachevsky (1899-1972), l'un des pionniers de la biologie mathématique, avait fait un lien entre "modèles abstraits de circuits électroniques [et] certaines propriétés de circuits nerveux ; particulièrement de ceux qui forment des chaînes fermées"⁶. Avant lui, dès 1929, Léo Szilárd (1898-1964) avait amené à "la prise de conscience de cette irruption de la notion d'information dans le domaine de l'énergie"⁷. Par le biais de ces conférences, ces idées resurgissent et permettent de développer et préciser les théories de l'information et de la communication, enjeu crucial dans le cadre de l'effort de guerre américain relativement à la seconde guerre mondiale.

"Les théories mathématisées de l'information doivent être placées à la base de toute théorie rigoureuse de la mesure dans les sciences physiques. Elles seules permettent de tenir compte convenablement de l'interaction entre l'observateur et les opérations par lesquelles il mesure les phénomènes observés"⁸.

François le Lionnais, 1964

Toujours dans le cadre de ces conférences, dès le début des années 1950, Heinz von Foerster (1911-2002) s'attache à cette boucle rétroactive qui rend caduque la notion traditionnelle de cause à effet. Si l'on coupe une forme circulaire d'interaction, un effet peut devenir antérieur à sa cause et vice-versa⁹. Dans sa démarche, Heinz "von Foerster propose une critique radicale de l'idée d'objectivité en science"¹⁰. Sa réflexion porte sur

⁵"De diviser chacune des difficultés que j'examinerais en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre." René Descartes, *Discours de la méthode*, 1637 [69, p. 111]

⁶François le Lionnais. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 109]

⁷*Ibid.* [178, p. 103]

⁸*Ibid.* [178, p. 104]

⁹Heinz von Foerster emploie l'expression de "causalité circulaire." In Elena Esposito, Erich Hörl, *Réflexivité et Système. Le débat sur l'ordre et l'auto-organisation dans les années 1970*, 2015 [76, § 5, p. 3] <http://journals.openedition.org/trivium/pdf/5206>

¹⁰Serge Proulx, *Heinz von Foerster (1911-2002). Le père de la seconde cybernétique*, 2003 [154, p. 258]

le comment de l'évolution des systèmes et il est ainsi considéré comme le père de la seconde cybernétique, "cybernétique de la cybernétique"¹¹. Il prône l'idée d'interaction active, où l'observateur s'intègre lui-même dans le système observé. "Si l'on élimine les propriétés de l'observateur, il ne reste rien : ni observation, ni description"¹².

La cybernétique nous a amené à l'étude des systèmes, ce qui conduit à la notion de complexité, dans le sens de "*complexus* [qui] signifie ce qui est tissé ensemble"¹³. À partir de quoi des phénomènes comme l'émergence peuvent se produire, sans que l'on puisse la réduire aux composantes du système. Un des traits les plus remarquables de tout système rétroactif est la notion d'auto- et des possibilités offertes. Auto-régulation, auto-organisation, jusqu'à l'autopoïèse, selon le terme d'Humberto Maturana. Pour parler de ces systèmes, nous devons utiliser l'auto-référence et ces boucles de rétroaction nous amènent à ne plus considérer comme paradoxales mais plutôt comme complémentaires des notions *a priori* opposées dans une forme de dialogisme¹⁴. Il convient alors de rappeler l'expression visionnaire de la pensée surréaliste.

"Tout porte à croire qu'il existe un certain point de l'esprit où la vie et la mort, le réel et l'imaginaire, le passé et le futur, le communicable et l'incommunicable, le haut et le bas cessent d'être perçus contradictoirement"¹⁵.

André Breton, 1930

En résumé

Au début du ^{xx}^{ème} siècle, alors que l'on assiste à un foisonnement des théories mathématiques et que les sciences se spécialisent en donnant naissance à de nouvelles branches, Norbert Wiener initie un mouvement inverse. En s'intéressant aux systèmes plutôt qu'à ses composantes, dans un cadre interdisciplinaire, des similitudes apparaissent dans des domaines que l'on croyait indépendants. La notion de boucle rétroactive fait vaciller la notion de causalité linéaire et participe à l'effondrement du déterminisme. Des savants comme Heinz von Foerster et Humberto Maturana portent leur réflexion sur l'évolution des systèmes, ce qui les conduit à la notion d'émergence dans un tout qui ne peut être réduit à la somme de ses parties.

¹¹Heinz von Foerster, *Éthique et cybernétique du second ordre*. In Evelyne Andreewsky et Robert Delorme, *Seconde cybernétique et complexité*, 2006. [87, p. 77]

¹²*Ibid.* [87, p. 78]

¹³Edgar Morin, *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*, 1999 [133, p. 17]

¹⁴Edgar Morin, Jean-Louis le Moigne, *L'intelligence de la complexité*, 1999 [135, p. 330]

¹⁵André Breton, *Second Manifeste du surréalisme*, 1930 [37, p. 76-77]

Du déterminisme à l'indétermination

En 1936, le mathématicien Alan Turing (1912-1954) conceptualise un modèle abstrait permettant de définir un critère de calculabilité que l'on nommera par la suite machine de Turing¹⁶. Il s'agit d'une méthode s'appuyant sur des données et des instructions de lecture et d'écriture sur une bande d'une longueur éventuellement non finie. Et à l'exception de ce dernier point, la non finitude, c'est ce procédé qui a donné naissance à l'architecture des processeurs, dont la structure de base n'a pas changé depuis. Le tout premier ordinateur électronique, l'E.N.I.A.C. a alors pu être finalisé en 1946, grâce aux moyens mis à disposition dans le cadre de l'effort de guerre américain¹⁷. La conception du transistor à la fin de l'année suivante permettra la miniaturisation et le développement d'ordinateurs toujours plus performants. Dans un premier temps réservés aux laboratoires de recherche et à l'industrie, le fait marquant en est la grande "diversité dans les applications"¹⁸.

Le développement de l'informatique a connu depuis une évolution fulgurante, aussi bien au niveau des capacités calculatoires qu'au niveau de la mémoire et du volume de stockage. Il est à noter la précision de la 2^{ème} version de la loi de Moore qui prédisait que le nombre de transistors dans les processeurs doublerait tous les deux ans. Cette "loi", qui "n'est rien d'autre qu'une *décision économique concertée*"¹⁹, a été confirmée depuis 1970 jusqu'à récemment, et même si ce n'est plus exactement le cas²⁰, il y a toujours de l'innovation dans les fonctionnalités. L'informatique elle aussi a connu une spécialisation qui continue à se développer. Et même dans un domaine particulier, comme la vie artificielle, une approche chronologique est délicate du fait du développement en parallèle de différents procédés. C'est pourquoi il sera abordé ici par familles algorithmiques. On peut cependant en trouver une prémisse théorique avec les travaux de John von Neumann dès les années 1940, autour de machines autorépliquantes²¹.

En premier lieu apparaissent les automates cellulaires. Ils constituent un système dynamique discret de une à trois dimensions où chaque élément est représenté par une case qui évolue par pas de temps relativement à son voisinage. Généralement constitués de règles élémentaires, les possibilités croissent exponentiellement en fonction du nombre

¹⁶Jack Copeland *et al.* *The Essential Turing : Seminal Writings in Computing, Logic, Philosophy, Artificial Intelligence, and Artificial Life : Plus The Secrets of Enigma*, 2004. [54]

¹⁷François le Lionnais. In René Taton, *op. cit.* [178, p. 106]

¹⁸*Ibid.*

¹⁹Gérard Berry, *L'Hyperpuissance de l'informatique. Algorithmes, données, machines, réseaux*, 2017. [26, p. 86]

²⁰Essentiellement dû au fait que l'on est proche aujourd'hui de la limite théorique de 3 nm de la finesse de gravure des processeurs, les cartes graphiques les plus récentes en étant à 10 nm.

²¹John von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, 1966. [138]

d'états que peut prendre chaque cellule et du nombre de cases avoisinantes prises en considération. À partir de ce principe relativement simple, il est possible d'obtenir des "comportements" répliatifs, mais aussi parfois imprévisibles, chaotiques ou encore en évolution. Ce phénomène d'émergence peut apparaître grâce au principe de rétroaction, qui est à la base même de la cybernétique.

De nombreux exemples peuvent donner un aperçu des possibilités offertes par cette méthode. De John Conway en 1970 avec le jeu de la vie²², où sur une surface en deux dimensions, des "cellules" meurent, survivent où naissent en fonction du nombre de leurs voisins "vivants." Suivant la configuration initiale, des mouvements, une périodicité à plus ou moins long terme, ou une fin parfois rapide apparaissent. Plus étonnants encore sont les travaux de Christopher Langton²³, où une fourmi virtuelle peut tourner à droite ou à gauche selon la couleur de la cellule en la modifiant au passage. Avec très peu de couleurs et des règles basiques, on aboutit rapidement à un comportement soit chaotique, soit répliatif, soit en boucle, ou encore en une combinaison de ces types, alors même que nous ne disposons d'aucune méthode de prédiction.

²²John Conway, « *What is Life ?* », *Winning Ways for your Mathematical Plays*, 1982. [53]

²³Christopher Langton, *Studying artificial life with cellular automata*, 1986. [114]

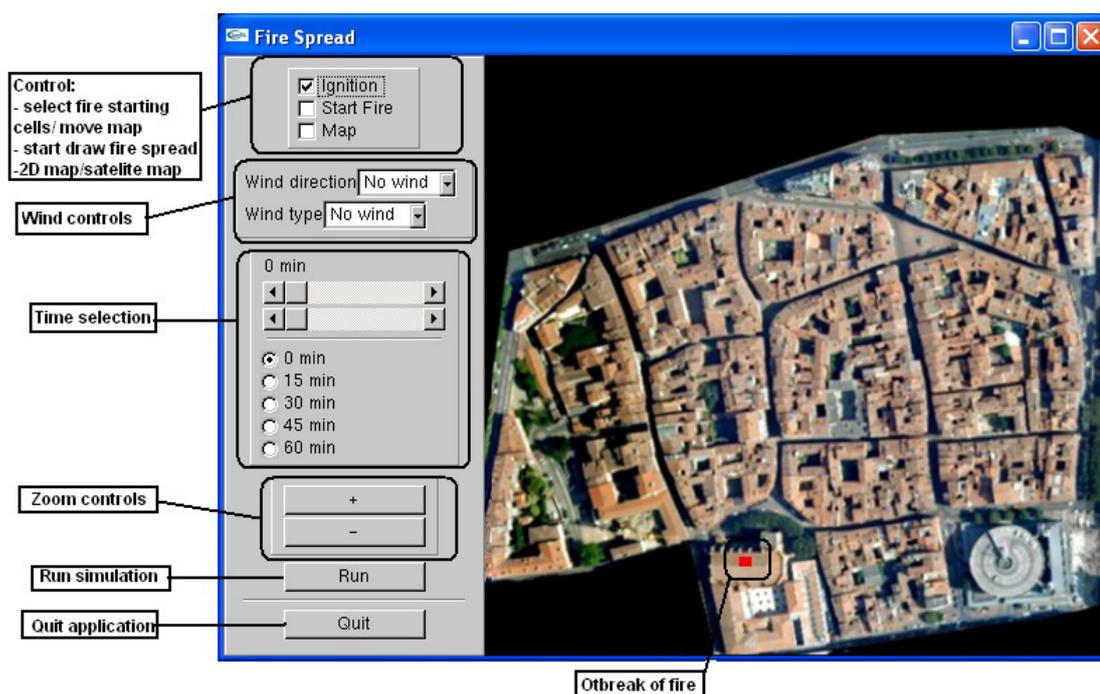


FIGURE 8.6 : Thomas Breton *et al.* : *Fire Spread*, logiciel de simulation de propagation de feu dans le quartier des Carmes à Toulouse (2009)

Des applications scientifiques tirent profit de cette méthodologie, comme par exemple la prédiction du développement de feux de forêt²⁴. Cette approche n'en est pas pour autant nécessairement directe, Gary Achtemeier proposant par exemple de remplacer les règles de propagation classiques par des lois comportementales relatives à des lapins²⁵. Il s'agit plus précisément d'un automate cellulaire "augmenté" car une des règles dépend de l'historique de l'évolution des lapins. Enfin, le problème d'une simulation de propagation d'incendie en milieu urbain est une question bien plus délicate à traiter²⁶, non seulement au niveau de la complexité du phénomène mais aussi du fait du manque d'informations précises sur les éléments en jeu. Toutefois, il m'a été possible de réaliser un programme, *Fire Spread* (Figure 8.6) dans le cadre d'un partenariat avec le Service Départemental d'Intervention et de Secours, *SDIS 31*. Celui-ci permet une évaluation statistique de l'évolution d'un incendie par les toitures dans le quartier des Carmes à Toulouse²⁷.

²⁴Par exemple, Stephen Berjak, *An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system*, 2001. [24]

²⁵Gary Achtemeier, *"Rabbit rules" - an application of Stephen Wolfram's "new kind of science" to fire spread modeling*, 2003. [4]

²⁶Thomas Breton, Yves Duthen, *Les simulations de propagation de feu en milieu urbain*, 2008. [41]

²⁷Thomas Breton, Dana Bogheanu, and Yves Duthen, *Cellular automata against fire threat on an urban area*, 2009. [40]



FIGURE 8.7 : Chu-Yin Chen : *Light Alive in situ*, 2007

Si les automates cellulaires ont été largement exploités pour des applications scientifiques, Chu-Yin Chen a su s'approprier cette méthode dans un dessein artistique avec la création de *Light Alive in situ* (Figure 8.7). Cette œuvre, exposée au Parc Scientifique de Taipei à Taïwan, interagit de deux manières différentes. D'une part avec l'environnement atmosphérique et lumineux, d'autre part avec le public ou tout élément s'en approchant, par le biais de capteurs de présence. Une étoile centrale émet alors des radiations qui provoque des rotations et des vagues qui se diffusent de proche en proche aux cubes adjacents. Cette propagation n'étant pas linéaire, des variations parfois soudaines engendrent des discontinuités, que l'auteure compare à des notes de musique jouées sur un piano. Le spectateur est alors nécessairement en interaction avec l'œuvre, que ce soit volontairement ou à son insu²⁸.

²⁸Chu-Yin Chen, *Un parcours de création : de l'automatisme psychique à l'évolutionnisme*, 2009 [50, p. 11-12]



FIGURE 8.8 : P. Prusinkiewicz, J. Hanan : *A three-dimensional rendering of the Mycelis models*²⁹(1987)

En aparté on peut citer une autre approche en vie artificielle, celle des algorithmes à base de grammaires et de règles, qui offrent des résultats intéressants à partir de formules simples. Aristid Lindenmeyer utilise ce principe dans ce qui forme les L-systems et l'applique à des phénomènes biologiques, entre autres sur la formation de levures ou sur les plantes. À partir d'un dictionnaire, d'une phrase de départ et de règles, on peut constituer un algorithme qui, après un certain nombre d'itérations, permet de reproduire des formes proches de celles que l'on peut rencontrer dans la nature (Figure 8.8). L'apport des L-systems relativement aux grammaires réside dans le fait qu'elle s'applique de manière parallèle au lieu de séquentielle et correspond ainsi mieux à notre approche de la nature. Poussé à la limite, ce principe permet d'arriver à une "construction" d'objets fractals, comme par exemple la célèbre courbe de Koch "en flocon de neige"³⁰, étant entendu qu'il n'est en aucune manière possible de réaliser une telle construction, s'agissant de reproduire un procédé à l'infini.

²⁹In Przemyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmeyer, *The algorithmic beauty of plants*, 1990. [155, p. 91]

³⁰Benoît Mandelbrot, *Les objets fractals. Forme, hasard et dimension*, 1975. [124, p. 34-35]

En résumé

À partir de machines entièrement déterministes, les ordinateurs, de modèles et de règles d'une remarquable simplicité, il est possible d'engendrer des comportements non seulement répliatifs, mais aussi chaotiques et même en évolution. Ces algorithmes, avec les raffinements qui leur ont été dotés, sont à la source de nombreuses créations et d'applications sur des problèmes que l'on peut considérer de l'ordre du complexe, comme l'étude de la propagation d'incendies. Il peuvent tout autant engendrer des comportements émergents, aussi bien dans le domaine scientifique qu'artistique, comme le montre l'œuvre *Light Alive in situ* de Chu-Yin Chen.

Complexification

Le mécanisme le plus utilisé en vie artificielle est celui des algorithmes génétiques. Sous un principe de base relativement simple, il peut prendre de multiples formes et s'appliquer à tout autant d'objets ou de problèmes. L'idée principale est de s'appuyer sur un ou plusieurs génomes et de leur appliquer, après sélection, des mutations et des croisements. Cette sélection nécessite alors une forme d'évaluation, appelée fonction de *fitness*. Ces algorithmes sont adaptés à des problèmes où le champ d'investigation est trop grand pour en avoir une résolution simple ou dont une approche directe est déraisonnable voire impossible. Ils peuvent répondre à certains types de problèmes comme la prise de décision, généralement avec un système de classifieurs, ou tels que le déplacement d'un robot. L'important étant qu'ils peuvent donner lieu à des phénomènes émergents et adopter des comportements imprévisibles. En revanche, plus le problème à résoudre est "complexe", plus le temps d'apprentissage est long et les résultats pas nécessairement en adéquation.

Plusieurs simulations d'apprentissage de créatures artificielles se sont succédées, à commencer par celles de Karl Sims³¹ suivies de celles de Nicolas Lassabe³² où, dans un environnement physique virtuel, ses créatures apprennent à monter des marches d'escalier ou encore à faire du skate-board³³. Ce domaine a été étendu à des simulations

³¹Karl Sims, *Evolving virtual creatures*, 1994. [169]

³²Nicolas Lassabe, Hervé Luga, and Yves Duthen, *A new step for evolving creatures*, 2008. [115]

³³Un tableau de différents exemples de robots et autres créatures modulaires est présenté dans : Yves Duthen *et al.* *An introduction to the Bio-Logic of Artificial Creatures*, 2011. [73, p. 13]

virtuelles de robots modulaires réels, à l'exemple de *ATRON*³⁴ ou des *Molecubes*³⁵. Dans les deux cas, il s'agit de modules ayant un axe de rotation interne et pouvant s'assembler dynamiquement. Pour les *Molecubes*, les modules sont des cubes découpés selon un axe séparant deux sommets opposés. C'est sur ce principe qu'a été modélisé un robot virtuel apprenant, par algorithme génétique, à avancer tout droit en jouant sur les forces de rotation de ses modules (Figure 8.9). D'autres modules ont aussi été réalisés, comme les *Roombots*, comparables au *Molecubes* mais dont l'attache des modules est rotative. Pour un apprentissage de la locomotion, une approche co-évolutive de la structure et du centre de contrôle a là aussi montré ses bénéfices³⁶.

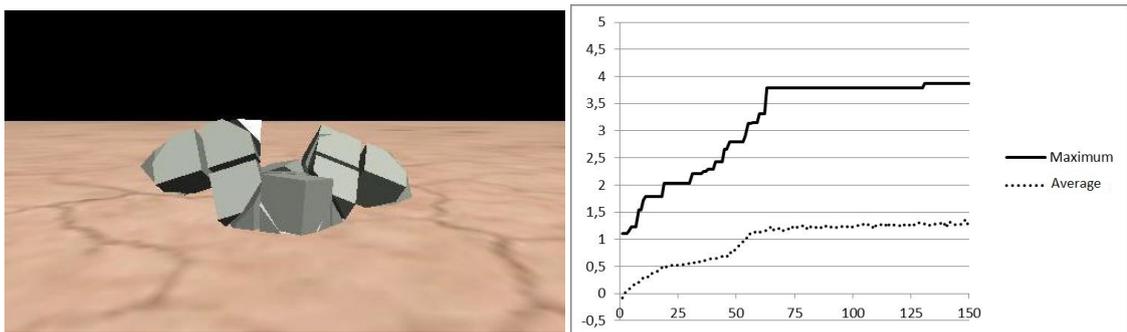


FIGURE 8.9 : Robot modulaire virtuel de huit entités et courbes de progression suivant les générations. Population de 1024 robots se déplaçant 15 secondes³⁷.

Ce type d'expérimentation n'a pourtant qu'une valeur théorique, la tendance étant à la réalisation de robots réels. Mais dans ce cas il y a souvent un fossé énorme avec la représentation virtuelle, ce qui constitue un problème critique de la robotique évolutionnaire³⁸. Ainsi des simulations peuvent afficher des résultats totalement déraisonnables qui ne correspondent plus à rien une fois les essais réalisés concrètement. Pour sortir de cette impasse, il devient nécessaire d'intégrer en retour, dans l'évaluation, des données mesurées sur le robot lui-même. Ce faisant, cela conduit à des problèmes de faisabilité en terme de temps d'évaluation et d'apprentissage. Une solution a toutefois été proposée avec des résultats probants en intégrant une mesure de transférabilité (de la disparité entre le résultat et ce qui était attendu) et en modifiant le processus d'évaluation par un critère multi-objectif³⁹.

³⁴Esben Hallundbæk Østergaard and Kristian Kassow, *Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot*, 2006. [140]

³⁵Victor Zykov, Andrew Chan, and Hod Lipson, *Molecubes : An Open-Source Modular Robotics Kit*, 2007. [188]

³⁶Chourouk Guettas, Foudil Cherif, Thomas Breton, and Yves Duthen, *Cooperative Co-evolution of Configuration and Control for Modular Robots*, 2014. [95]

³⁷Thomas Breton and Yves Duthen, *A Model for Virtual Reconfigurable Modular Robots*, 2011. [42] Une vidéo est disponible ici https://www.youtube.com/watch?v=J_OnBlmSFHs

³⁸Stéphane Doncieux *et al.* *Evolutionary robotics : what, why, and where to*, 2015. [70]

³⁹Sylvain Koos, Jean-Baptiste Mouret, and Stéphane Doncieux, *The Transferability Approach : Crossing the Reality Gap in Evolutionary Robotics*, 2012. [109]

S'inspirant du fonctionnement du cerveau, les réseaux neuronaux constituent la dernière grande famille des algorithmes de vie artificielle. À partir de capteurs, qui peuvent être de tout ordre, une ou plusieurs couches de neurones virtuels réagit aux entrées pour fournir une réponse via des effecteurs. Avec une structure donnée, différents poids sont affectés aux relations entre ces neurones qui peuvent combiner ces entrées et déclencher un nouveau signal suivant une fonction propre. Pour des questions simples comme celles relevant de la logique pure, ces relations, poids et fonctions peuvent facilement être choisis manuellement. Mais les réseaux neuronaux se montrent tout autant efficaces pour des problèmes plus complexes en leur adjoignant une phase d'apprentissage. C'est le cas par exemple pour la reconnaissance de forme. Plus important encore, ils autorisent une adaptabilité non préprogrammée face à un environnement inconnu.

Si plusieurs méthodes conviennent pour la phase d'entraînement des réseaux neuronaux, comme la rétropropagation de l'erreur, les plus fructueux semblent être ceux basés sur des algorithmes génétiques. Il existe en outre des raffinements qui ont conduit à NEAT⁴⁰ (NeuroEvolution of Augmented Topologies) où plutôt que de fixer un nombre de neurones et une structure rigide, le réseau se construit de proche en proche par l'ajout de neurones et de connexions jusqu'à obtenir un résultat adéquat. Cette méthode, bien adaptée aux problèmes complexes et aux réseaux de grande taille, a aussi été la base de travaux tentant de modéliser des structures plus proche du cerveau humain, où une hiérarchie peut être établie, connectant non plus simplement des neurones mais des groupes de neurones, avec des répétitions, approche à la base de ModNet⁴¹. D'autres raffinements ont aussi été élaborés, comme HyperNEAT⁴² (Hypercube-based NEAT) qui permet entre autres le mélange de formes.

Quand bien même les modèles les plus sophistiqués s'inspirent de nos représentations du cerveau humain, et malgré des résultats probants dans bien des domaines, il n'en demeure pas moins qu'une question fait toujours débat. Car, selon certains, "au moins en principe, aucune raison fondamentale ne s'oppose à l'idée d'une conscience artificielle. Pourtant de nombreux penseurs contestent cette conclusion⁴³." Il semble en effet que cette question soit liée au vivant plutôt qu'à des limites simplement techniques. Certes, nous ne sommes pas encore en mesure de modéliser complètement un cerveau humain artificiel⁴⁴, mais surtout "un simple accroissement de complexité ne suffit pas à lui seul

⁴⁰Kenneth O. Stanley, and Risto Miikkulainen, *Evolving Neural Networks Through Augmenting Topologies*, 2002. [175]

⁴¹Stéphane Doncieux, and Jean-Arcady Meyer, *Evolving modular neural networks to solve challenging control problems*, 2004 [71]

⁴²Jason Gauci, and Kenneth O. Stanley, *Generating Large-Scale Neural Networks Through Discovering Geometric Regularities*, 2007. [92]

⁴³Stanislas Dehaene, *Le code de la conscience*, 2014 [62, p. 334]

⁴⁴"Dans le cerveau humain, on compte *environ* cent milliards de neurones et de l'ordre de un million de milliards de connexions entre neurones⁴⁵."

⁴⁵Jean-Pierre Changeux, *L'Homme de vérité*, 2002 [46, p. 23]

à rendre compte du développement de la conscience⁴⁶." La proposition, par exemple, de Stanislas Dehaene d'introduire de l'aléatoire pour simuler l'autonomie⁴⁷ me semble plutôt être le signe de notre méconnaissance du vivant, car "le hasard et la nécessité ne s'appliquent pas au monde, mais à nos tentatives pour créer une description de celui-ci⁴⁸."

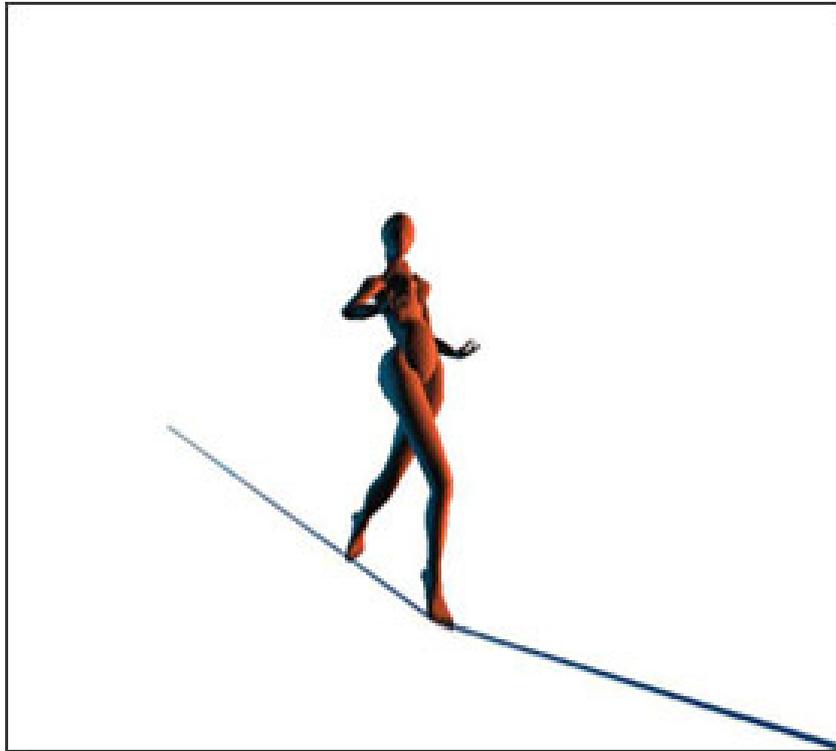


FIGURE 8.10 : Michel Bret, Marie-Hélène Tramus : *La funambule virtuelle*, 2002

Cependant les réseaux neuronaux artificiels offrent de nombreux avantages comme la possibilité d'un comportement adaptatif non préprogrammé. C'est le cas par exemple dans l'œuvre *La funambule virtuelle* de Michel Bret et Marie-Hélène Tramus (Figure 8.10). Le spectateur, armé d'un balancier, est amené à déstabiliser la funambule qui va automatiquement tenter de compenser ces mouvements pour garder l'équilibre. Basé sur un ensemble de modules et d'un réseau connexionniste de deux cents neurones, entraîné au préalable⁴⁹, l'humanoïde ajuste en temps réel ses déplacements sous la forme d'une combinaison d'actes "volontaires" et réflexes. Ce dispositif a ensuite été repris dans un tout autre contexte pour une étude comportementale centrée sur l'incarnation virtuelle, distinguant l'effet miroir, la sympathie, de l'effet rotationnel, associé à l'empathie⁵⁰.

⁴⁶ *Ibid.* [46, p. 113]

⁴⁷ Stanislas Dehaene, *op. cit.* [62, p. 333]

⁴⁸ Heinz von Foerster. Cité par Edgar Morin, *Science avec conscience*, 1990 [132, p. 207]

⁴⁹ Marie-Hélène Tramus, *Les artistes et la réalité virtuelle, des parcours croisés*, 2007 [181, p. 139]

⁵⁰ Bérangère Thirioux *et al.* *Walking on a line : A motor paradigm using rotation and reflection symmetry to study mental body transformations*, 2009. [179]

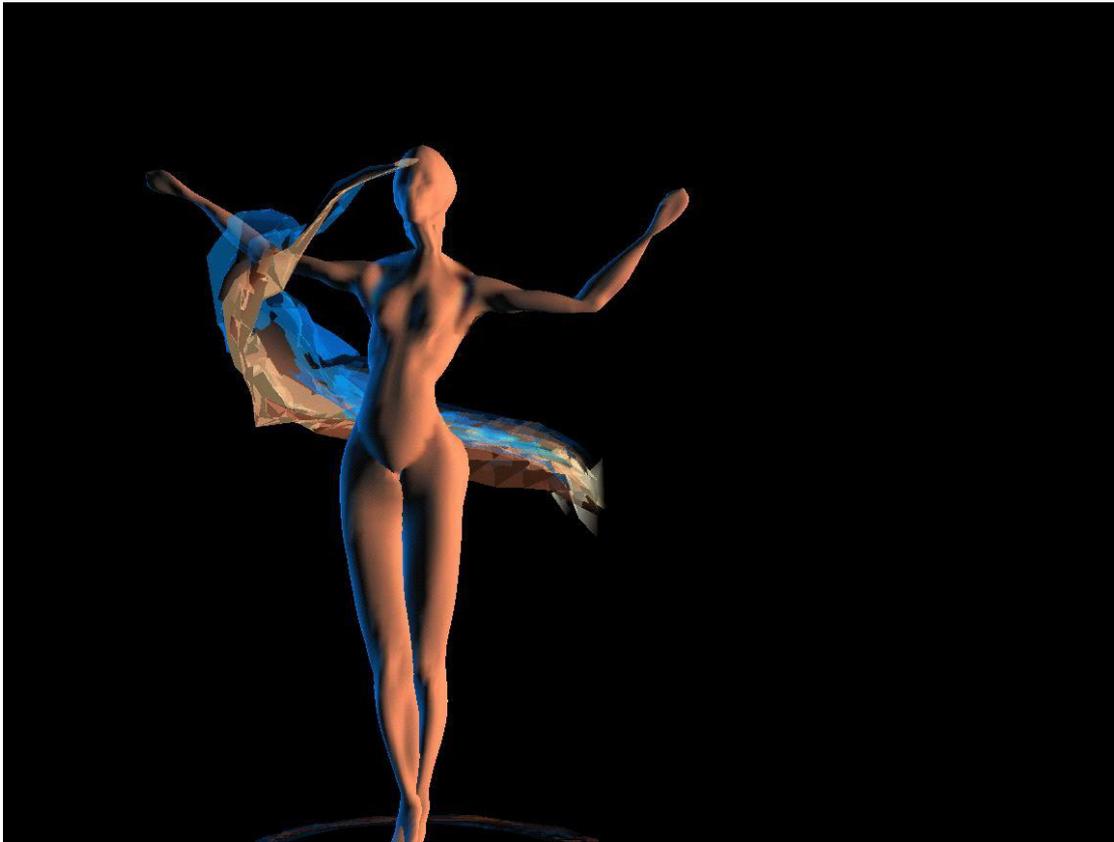


FIGURE 8.11 : Michel Bret, Marie-Hélène Tramus : *Danse avec moi*, 2002-2006

Avec *Danse avec moi*⁵¹, Michel Bret et Marie-Hélène Tramus sont allés plus loin en perfectionnant leur réseau neuronal par une approche modulaire dont certaines parties peuvent être mises à jour en temps réel. Par ce biais le réseau n'est plus figé et peut apprendre des spectateurs, au fur et à mesure de son interaction, par imitation et adaptation. Plus encore, plutôt que d'entraîner la danseuse virtuelle avec des acteurs réels, un apprentissage par algorithme génétique, conservant les chorégraphies valides, permet de diversifier les mouvements et d'introduire des stratégies inattendues. Ces deux dernières œuvres se situent pleinement dans la seconde interactivité où les réponses ne sont pas préprogrammées mais résultent d'un apprentissage et s'adaptent aux spectateurs. Avec *Danse avec moi*, le réseau neuronal évolue au gré des rencontres avec des spectateurs-acteurs qui participent à sa progression.

⁵¹Michel Bret, Marie-Hélène Tramus et Alain Berthoz, *Interacting with an intelligent dancing figure : artistic experiments at the crossroads between art and cognitive science*, 2005 [36]



FIGURE 8.12 : Chu-Yin Chen : Vita-Morph, 2009

Toujours dans le cadre de la seconde interactivité, *Vita-Morph* de Chu-Yin Chen (Figure 8.12) invite le spectateur à composer avec l'œuvre. Celui-ci se doit d'interagir pour profiter de l'évolution de la pièce. Dans un premier temps, par le biais d'un écran tactile, il fait apparaître des créatures dont la morphologie dépend de ses gestes. Ses créations vont alors évoluer dans un environnement simulé mais avec une tendance à fuir vers l'extérieur. Elles vont cependant tenter de survivre en adoptant un comportement reproductif avec d'autres partenaires, créant un microcosme en évolution. Le spectateur pourra alors intervenir en dirigeant les créatures qui lui conviennent et les faire se rencontrer, provoquant par là-même une sélection artificielle. Chaque nouveau spectateur vient ainsi ensemercer l'œuvre et influe sur le croisement des espèces⁵².

En résumé

S'inspirant des modèles de la biologie et des neurosciences, découlant eux-mêmes de la cybernétique, les algorithmes génétiques et les réseaux neuronaux apportent de nouveaux paradigmes à l'origine de la vie artificielle. Il devient possible de faire évoluer relativement rapidement des populations de créatures virtuelles et de les doter de capacités d'apprentissage et d'adaptation face à un environnement inconnu. Les applications en sont multiples et permettent de dégager une forme d'autonomie artificielle. Dans *La funambule virtuelle* par exemple, il y a émergence de comportements, "elle improvise, elle nous surprend⁵³." Cependant, quand bien même l'on s'éloigne de l'acte réflexe, il ne s'agit nullement de conscience. Chaque application est liée à un cadre et même si, en y mettant les moyens, on peut créer un adversaire redoutable à des jeux comme les échecs ou le go, "cette « décérébralisation » des fonctions cérébrales [...] signe en réalité les limites de la démarche cognitiviste⁵⁴."

⁵²Chu-Yin Chen, *op. cit.* [50, p. 10]

⁵³Marie-Hélène Tramus, *op. cit.* [181, p. 139]

⁵⁴Jean-Pierre Changeux, *Du vrai, du beau, du bien. Une nouvelle approche neuronale*, 2008 [48, p. 483]

Exiger l'immortalité de l'individu, c'est vouloir perpétuer une erreur à l'infini.

Arthur Schopenhauer

Pensées et fragments, 1900

Conclusion

Si, comme on l'a vu, "les évolutions de l'art et de la science ne sont ni parallèles ni linéaires"⁵⁵, chacune d'entre elles se doit d'être contextualisée pour en apprécier la valeur. Il en est exactement de même pour l'histoire de la pensée et la philosophie, qu'il n'est pas opportun de séparer. Pourtant il est manifeste que l'art et la science diffèrent dans leurs intentionnalités et leurs approches. En formalisant des théories sur des phénomènes que nous ne pouvons *a priori* pas comprendre, cette dernière tente de nous en donner une explication, alors que "l'art nous permettrait d'avoir une attitude différente sur la réalité, de rompre nos schèmes moteurs, de nous questionner sur le visible"⁵⁶.

Dans ce contexte, *Mélancolie des étoiles* est née d'une réflexion critique de la pensée articulée à la langue. Par un questionnement sur notre rapport au monde et à l'autre, l'idée a été de placer le spectateur dans une position où il croit maîtriser, dans une certaine mesure, le cours des choses alors que sa place est de l'ordre de l'insignifiance. Métaphore de notre société basée sur la surconsommation et la croissance économique, où l'humain a été relégué au rang d'individu. Un monde en pleine mutation où le sens même de l'existence humaine s'étiole au fur et à mesure des avancées technologiques.

Le fait de réaliser que "nous sommes les esclaves de nos moyens techniques"⁵⁷ n'est certes pas totalement nouveau. Paul Valéry (1871-1945) l'affirmait déjà en 1930 : "La machine gouverne. La vie humaine est rigoureusement enchaînée par elle, assujettie aux volontés exactes des mécanismes"⁵⁸. Mais ce qui est plus pernicieux encore, c'est que "au sein de ce dispositif, la machine impose son mode de fonctionnement et de pensée à l'homme, obligé de s'y résoudre"⁵⁹. Au point où il est aujourd'hui nécessaire de s'inter-

⁵⁵Jean-Pierre Changeux, *Raison et Plaisir*, 2002. [47, p. 145]

⁵⁶Edwige Armand, *Écriture d'un monde : Métacorps, Infralangage et Singularité*, 2016. [8, p. 46]

⁵⁷Norbert Wiener, *Cybernétique et société. L'usage humain des êtres humains*, 1954 [185, p. 78]

⁵⁸Paul Valéry (1871-1945), *Essais quasi politiques*, 1930. In Jean-Gabriel Ganascia, *L'intelligence artificielle*, 2007. [91, p. 106]

⁵⁹Michel Faucheux, *La tentation de Faust ou la science dévoyée*, 2012. [78, p. 164]

roger car "la création d'interfaces interactives comporte une responsabilité sociale⁶⁰." Et cette observation de David Rokeby, si elle concerne en premier lieu le milieu artistique, doit s'entendre pour tous les domaines.

La science, si elle a permis un accroissement phénoménal de notre pouvoir de prédiction et d'action sur la nature, ne doit pas négliger sa propre introspection. La tendance à la surspécialisation a eu l'effet inverse, éloignant le scientifique de toute mise en perspective, alors même qu'il est important de souligner que "la compétence implique la responsabilité⁶¹." Les progrès, au sens de possibilités nouvelles, sont si radicaux que l'on a pu assister à des changements de paradigmes. En 1970 par exemple, le biologiste et prix Nobel Jacques Monod (1910-1976), soulevant des questions d'ordre éthique, affirmait l'impossibilité, "sans doute à jamais⁶²", de modifier le code génétique humain. Le discours est tout autre aujourd'hui puisque la question n'est plus de savoir si oui ou non, ou même quand, mais simplement où pourrait naître le premier humain modifié⁶³.

Cet état de fait soulève deux questions. D'une part qu'il est bien mal aisé de prévoir correctement l'évolution aussi bien scientifique que sociétale, et d'autre part qu'au contraire de l'économie, qui est mondialisée, les valeurs liées à l'éthique sont d'ordre culturel. Sur le premier point, comme il est plutôt rare qu'une prévision s'accorde avec l'avenir, il convient d'honorer les plus perspicaces. C'est le cas de Jacques Rouxel qui dès 1968 nous a livré, par le biais de la célèbre émission *Les Shadoks*, une version fort convaincante du chapeau des Gibis⁶⁴ comme objet connecté, faisant dire à Gérard Berry, sur un ton quelque peu provocateur, qu'il s'agirait d'un "plagiat par anticipation du travail coopératif sur Internet dans le cadre du Web 2.0⁶⁵." Sur un sujet moins glorieux, mais de manière tout aussi perspicace, on peut remarquer que les deux programmes de télévision des Gibis étaient des émissions de télé-réalité⁶⁶, anticipant de plus de trois ans la première production considérée comme telle, *An American Life* en 1971⁶⁷.

⁶⁰David Rokeby, *Construire l'expérience : l'interface comme contenu*. In Louise Poissant, *Esthétique des arts médiatiques. Interfaces et sensorialité*, 2003. [158, p. 92]

⁶¹Heinz von Foerster, *Les responsabilités de la connaissance*. In *Seconde cybernétique et complexité. Rencontres avec Heinz von Foerster*, 2006. [86, p. 76]

⁶²Jacques Monod, *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, 1970. [128, p. 180]

⁶³Heidi Ledford, *Where in the world could the first CRISPR baby be born?* In *Nature*, n° 526, 15 octobre 2015. [117, p. 310-311] <https://www.nature.com/news/where-in-the-world-could-the-first-crispr-baby-be-born-1.18542>

⁶⁴Jacques Rouxel, *Les Shadoks*, saison 1 (Bu), épisode 13 (MeuBu), 1968. [161]

⁶⁵Gérard Berry, *Les Shadoks sont-ils décervelables?* 2008. [25, p. 8]

⁶⁶Jacques Rouxel, *op. cit.*, saison 1 (Bu), épisode 18 (BuGaZo), 1968. [161]

⁶⁷Diffusée en 1973

Sur le deuxième point, si l'eugénisme négatif, ne pas sélectionner un embryon porteur d'un lourd handicap par exemple, peut être de bon droit considéré comme une avancée, il en va tout autrement de l'eugénisme positif. Mais comme le soulignait déjà Jürgen Habermas en 2001, la frontière entre sélection et optimisation est labile et en fin de compte, cela "se transformera alors en une affaire de législation politique"⁶⁸. Par exemple, si le choix du sexe d'un embryon est interdit en France⁶⁹, cela est possible dans d'autres pays comme l'Inde, la Californie ou le Royaume-Uni. Opportunité qui a conduit plusieurs établissements à se focaliser sur un marché hautement lucratif, celui de la spécialisation et de la multiplication des critères de choix pour les futurs bébés.

La question est donc brûlante et se positionner est primordial. Le fait que la science apporte des possibilités nouvelles n'est pas un blanc-seing à toute exaction. C'est le laisser faire et pire encore la déresponsabilisation par effet de groupe qui ont conduit aux horreurs de la seconde guerre mondiale. Et malheureusement, "l'homme a tendance à mal comprendre les leçons de l'histoire"⁷⁰, c'est pourquoi nous nous devons d'être vigilants. L'exemple des manipulations génétiques est parlant puisque nous en sommes arrivés à créer la première chimère homme-mouton⁷¹. Plutôt que d'accepter mollement, il est plus que nécessaire de s'interroger et en outre apprécier le sens de la répartition d'Agnès Bihl⁷² : "Oh chouette, un nouvel électeur... On n'arrête pas l'progress !"⁷³

Quand bien même l'on peut parler de prouesse scientifique, il est clair que "la disjonction [...] entre science et éthique ne peut plus être maintenue"⁷⁴. La technique est certainement ce qui a le plus progressé ces dernières décennies, mais qu'en est-il à un niveau plus fondamental ? Il semble, comme Lee Smolin le confirme, que c'est, encore de nos jours, "le réalisme qui sous-tend la plupart des recherches scientifiques"⁷⁵. Mouvement pourtant très réducteur et contraire à l'entendement "puisque aucune chose ne peut jamais se présenter à moi autrement que dans le phénomène"⁷⁶ et que "nous attribuons nécessairement *a priori* aux choses toutes les propriétés constituant les conditions qui

⁶⁸Jürgen Habermas, *L'avenir de la nature humaine. Vers un eugénisme libéral ?*, 2001. [96, p. 24, 20-25 (chapitre II)]

⁶⁹Journal Officiel n° 0157 du 7 juillet 2012 page 11138, texte n° 5, et notamment le chapitre IV.<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000026151968>

⁷⁰Don Foresta, *Mondes multiples*, 1991. [88, p. 151]

⁷¹<https://www.futura-sciences.com/sante/actualites/corps-humain-hybride-homme-mouton-obtenu-laboratoire-70228/>

⁷²Agnès Bihl, auteure-compositrice-interprète et écrivaine.

⁷³Réplique d'Agnès Bihl suite à la parution de l'article précité.

⁷⁴Edgar Morin, *La voie. Pour l'avenir de l'humanité*, 2011. [134, p. 248]

⁷⁵Lee Smolin, *Rien ne va plus en physique ! L'échec de la théorie des cordes*, 2006 [171, p. 27]

⁷⁶Emmanuel Kant, *Critique de la raison pure*, 1781 [106, p. 290 (Remarque sur l'amphibolie des concepts de la perception)]

seules nous permettent de les concevoir⁷⁷." Pourtant, Bergson a bien marqué l'incommensurabilité de ces deux approches.

"Quand le réalisme parle de choses et l'idéalisme de représentations, ils ne discutent pas simplement sur des mots : ce sont bien là deux systèmes de notation différents, c'est-à-dire deux manières différentes de comprendre l'analyse du réel⁷⁸."

Henri Bergson, 1904

La seconde cybernétique nous amène à l'introspection, tout au moins à la prise en compte de l'observateur dans l'analyse du système observant-observé. Une conclusion en est que "l'environnement tel que nous le percevons est notre invention⁷⁹." Le réalisme ne peut alors être maintenu, "le monde n'est pas un ensemble de choses, c'est un ensemble d'événements⁸⁰." Heinz von Foerster, avec son sens incisif de la formulation, nous précise encore ce changement de point de vue, "ce qui est nouveau, c'est qu'on a pris profondément conscience que pour écrire une théorie du cerveau, il faut un cerveau⁸¹." Au-delà du fait que nous ne pouvons parler de choses mais seulement de phénomènes, il est clair que "il n'y a pas de fait qui ne soit lié à une certaine modélisation théorique⁸²."

Or ces schémas s'appuient sur des constructions mathématiques qui sont purement virtuelles, fondées sur la logique. Louis Couturat (1868-1914), reprenant Cauchy⁸³, indique que "dans le langage mathématique, un symbole est une expression qui n'a pas de sens par elle-même, un signe qui ne signifie rien⁸⁴." L'existence au sens mathématique ne reflète que la possibilité d'une conception mentale dont le ou les objets ne peuvent correspondre à aucune matérialité. Ses notions n'ont pas toujours été claires et précises et ont pu évoluer, comme par exemple le concept de continuité⁸⁵. Richard Dedekind (1831-1916), s'apercevant que les mathématiciens l'utilisaient sans jamais l'avoir défini, a été le premier à le faire dans une formalisation purement arithmétique.

⁷⁷ *Ibid.* [106, p. 342 (Des paralogismes de la raison pure)]

⁷⁸ Henri Bergson, *Le cerveau et la pensée : une illusion philosophique*, 1904. In *L'énergie spirituelle. Essais et conférences*, 1919 [20, p. 106]

⁷⁹ "Environment as we perceive it is our invention." Heinz von Foerster, *Understanding understanding. Essays on cybernetics and cognition*, 2003 [85, p. 212]

⁸⁰ Carlo Rovelli, *L'ordre du temps*, 2018 [164, p.67]

⁸¹ Heinz von Foerster, *Éthique et cybernétique du second ordre*, 1991 [84, p. 44]

⁸² Aurélien Barrau, *Qui a peur de la déconstruction ? : Pour une philosophie du don*, 2017. [14]

⁸³ Augustin Louis, baron Cauchy (1789-1857)

⁸⁴ Louis Couturat, *De l'infini mathématique*, 1896 [59, p. 70]

⁸⁵ Pour des raisons d'ordre topologique, les mathématiciens auront plutôt tendance aujourd'hui à parler de connexité. Voir par exemple Frédéric Patras, *Les traits du continu mathématique*, 2003 [143, p. 87]

"Admettre cette continuité à la ligne n'est rien qu'un axiome, par lequel seul nous conférons à la ligne sa continuité, par lequel nous mettons en pensée la continuité dans la ligne. Si l'espace a quelque existence réelle, il n'a cependant *pas* besoin d'être nécessairement continu ; nombre de ses propriétés resteraient inchangées même s'il était discontinu⁸⁶."

Richard Dedekind, 1872

Pour autant, Dedekind évite d'employer directement le terme d'axiome à son « principe de continuité » mais seulement sur l'interprétation que l'on peut en faire "bien que, du point de vue actuel, son principe en ait la fonction⁸⁷." Malgré la conception commune que l'on peut trouver⁸⁸, "la continuité ne se présente pas à nous comme une donnée immédiate mais comme un problème⁹⁰." Tout au plus pouvons-nous dire que du fait qu'il s'agit d'un axiome, "l'hypothèse du continu [...] est parfois vraie, parfois fausse, selon l'univers mathématique dans lequel on se place⁹¹." C'est une construction abstraite et comme telle "il n'y a pas, il ne saurait y avoir de continu physique⁹²."

Certes ces modèles amènent à des formulations relativement simples et terriblement efficaces dans bien des domaines, mais il s'agit toujours de constructions simplificatrices, quelle qu'en soit la complexité. Kant nous avait pourtant prévenu sur de prétendues "lois de la nature⁹³" et malgré une vision réductrice et totalement erronée de la mathématique⁹⁴, sa conclusion n'en est que plus remarquable, puisque "nous savons enfin par la critique de notre raison que, dans son usage pur et spéculatif, nous ne pouvons en réalité rien savoir⁹⁵." Et chaque avancée scientifique nous amène à penser que "les choses qui nous paraissaient évidentes ne sont en fait que des préjugés⁹⁶."

⁸⁶Richard Dedekind, *Continuité et nombres irrationnels (1872)*. In *La création des nombres*, 2008 [61, p. 73-74]

⁸⁷Hourya Benis Sinaceur, in Richard Dedekind, *op. cit.* [61, p. 24]

⁸⁸Le petit Robert 2009 donne cette définition pour l'adjectif continu : "ce qui n'est pas interrompu dans le temps." Cela suppose plusieurs choses, comme la possibilité de penser le temps par lui-même alors qu'il semble délicat d'en avoir une notion en dehors d'un espace-temps et plus insidieusement encore que "le temps" serait lui-même continu alors que "nous ne pouvons pas penser la durée comme continue⁸⁹."

⁸⁹Carlo Rovelli, *op. cit.* [164, p. 58]

⁹⁰Gaston Bachelard, *La dialectique de la durée*, 1950 [12, p. 8]

⁹¹Frédéric Patras, *op. cit.* [143, p. 91]

⁹²Louis Couturat, *Les principes des mathématiques*, 1905 [58, p. 90]

⁹³Emmanuel Kant, *Critique de la faculté de juger*, 1790 [107, p. 159 (De la faculté de juger comme pouvoir légiférant *a priori*)]

⁹⁴Emmanuel Kant, *Critique de la raison pure*, 1781 [106, p. 539-594, 550 (Méthodologie transcendantale)] Il est tout de même à signaler à sa décharge que la mathématique souffrait à cette époque d'un manque crucial de rigueur. Néanmoins son arrogance envers les mathématiciens (p. 555-556) et le commun (p. 567-573) n'en est pas moins plus que regrettable.

⁹⁵*Ibid.* [106, p. 579-580 (Discipline de la raison pure par rapport aux hypothèses)]

⁹⁶Carlo Rovelli, *op. cit.* [164, p. 14]

Ces considérations doivent nous amener à nous interroger sur l'approche et le sens à donner à quelque "loi" physique ou "vérité" mathématique et du comment de l'enseignement, car "professer, c'est donner un gage en engageant sa responsabilité⁹⁷." Il pourrait être trompeur d'user du terme d'éducation là où la tâche primordiale est d'instruire plutôt que d'éduquer. Cela n'a rien d'anodin et peut s'avérer dangereux puisque "moins on a de connaissances, plus on a de convictions⁹⁸." Jacques Rouxel pourrait-il avoir été une nouvelle fois visionnaire si l'on se remémore le résultat du produit de l'enseignement des Shadoks⁹⁹ et de leur épanouissement¹⁰⁰ de part leur persévérance et malgré leur faibles capacités intellectuelles¹⁰¹. Ce résultat est à comparer à celui des Gibis qui eux, grâce à leur chapeau connecté, n'ont eu à suivre aucun cursus. Par conséquent ils durent affronter un sort bien moins enviable¹⁰² sans même s'en rendre compte¹⁰³.

Les domaines scientifiques ont été surspécialisés et même si "l'heure semble être à une reconvergence de ces différentes approches¹⁰⁴," ce constat doit être nuancé. D'un côté il est flagrant que les artistes se sont toujours intéressés aux sciences et aux techniques, les devançant souvent. De l'autre les questions de reconvergence ont émergé avec la première cybernétique, mais marginalement dans un premier temps. La surspécialisation est encore et toujours une caractéristique des sciences. Ce qui est nouveau, c'est l'évolution foudroyante et exponentielle de l'informatique, qui ouvre des possibilités à une majorité des autres domaines et représente dès lors une révolution scientifique. Mais "une révolution scientifique ne produit pas uniquement de nouvelles connaissances, elle produit aussi de nouvelles manières de penser¹⁰⁵."

À l'heure actuelle, les algorithmes s'imposent à nous sans que l'on y ait accès, et quand bien même nous l'aurions, nous ne serions pas automatiquement en mesure de faire des prédictions. Rien qu'au niveau des *bugs* dans des domaines que l'on aurait pu croire protégés, à l'exemple du Therac-25 "qui a provoqué ou accéléré la mort d'au moins 5 patients et gravement blessé plusieurs autres par irradiation massive de juin 1985 à janvier 1987¹⁰⁶", nous ne pouvons que constater les dégâts. La recherche du court terme, toujours dans le but d'"accroître la productivité du travail, pas de libérer

⁹⁷Jacques Derrida, *L'Université sans condition*, 1998. [68, p. 35]

⁹⁸Boris Cyrulnik, *Un merveilleux malheur*, 1999. [60, p. 86]

⁹⁹Jacques Rouxel, *op. cit.* Saison 2 (Zo), épisodes 6 (BuZo), 20 (BuBuGa), 29 (BuMeuBu), 40 (ZoZoGa), 44 (ZoMeuGa), 45 (ZoMeuBu), saison 3 (Meu), épisode 24 (BuZoGa) pour l'enseignement "classique" et saison 4 (BuGa), épisode 14 (MeuZo) pour les hautes études supérieures.

¹⁰⁰*Ibid.* Saison 3 (Meu), épisode 49 (MeuGaBu).

¹⁰¹*Ibid.* Saison 1 (Bu), épisode 27 (BuZoMeu).

¹⁰²*Ibid.* Saison 3 (Meu), épisode 49 (MeuGaBu).

¹⁰³*Ibid.* Saison 3 (Meu), épisode 50 (MeuGaZo).

¹⁰⁴Mehdi Khamassi, Stéphane Doncieux, *Nouvelles approches en Robotique Cognitive*, 2016. [108, p. 12]

¹⁰⁵Serge Abiteboul, Gilles Dowek, *Le temps des algorithmes*, 2017. [3, p. 58]

¹⁰⁶Gérard Berry, *op. cit.* [26, p. 342]

les travailleurs¹⁰⁷", amène à la division des tâches, donc des erreurs possibles, et à la dissémination des responsabilités. Et pourtant, c'est toute la recherche fondamentale qui a été sacrifiée au profit de ce fol engagement.

Si "toute observation est menée et interprétée dans un paradigme, un cadre de pensée¹⁰⁸", nous en sommes arrivés à un point où c'est l'homme qui se laisse dominer par sa propre production. Cette situation n'est nouvelle que par son ampleur et sa perversité, du fait qu'elle s'appuie sur des instruments que l'on a doté d'autonomie et alors même que "la seule intelligence des machines, c'est celle que nous leur attribuons¹⁰⁹." Le seul moyen d'échapper à cette forme d'autodestruction serait, à l'opposé de la soumission aveugle, de prendre le recul de l'introspection, qui seule peut amener à des résultats salutaires, comme "la science est la reconnaissance de notre ignorance, de nos limites, et du fait que chez « l'autre » il y a plus à apprendre qu'à redouter¹¹⁰."

"Justement parce que la tyrannie de l'opinion est telle qu'elle fait de l'excentricité une honte, il est souhaitable, pour ouvrir une brèche dans cette tyrannie, que les gens soient excentriques¹¹¹."

John Stuart Mill, 1859

¹⁰⁷Rebecca Solnit, *L'art de marcher*, 2000. [172, p. 20]

¹⁰⁸Aurélien Barrau, *Big Bang et au-delà. Balade en cosmologie*, 2015 [17, p. 45]

¹⁰⁹Jean-Gabriel Ganascia, *op. cit.* [91, p. 76]

¹¹⁰Carlo Rovelli, *Et si le temps n'existait pas ? Un peu de science subversive*, 2012 [163, p. 60]

¹¹¹John Stuart Mill (1806-1873). *De la liberté*, 1859. [127, p. 53]

A

Mélancolie des étoiles



FIGURE A.1 : Installation de *Mélancolie des étoiles* à la Nuit des chercheurs à Albi (2017)

A.1 Schéma de fonctionnement

Mélancolie des étoiles commence par le chargement des textures, qui sont transférées à la mémoire de la carte graphique, et par la récupération du travail de triangulation effectué en amont. Après une phase d'initialisation, le programme se divise en parallèle entre une composante indépendante chargée des liens avec les modules de reconnaissance vocale, au nombre de trois pour éviter les effets de blocage, et une principale détaillée dans

la partie droite du schéma (Figure A.2). Celui-ci permet alors de distinguer les étapes nécessaires du passage du micro à l'écran en précisant les échanges entre le processeur (CPU), la mémoire (RAM) et les processeurs graphiques (GPU). À noter toutefois que *CMU Sphinx* répond par des phrases que *Mélancolie des étoiles* traduit en phonèmes grâce à un dictionnaire phonétique.

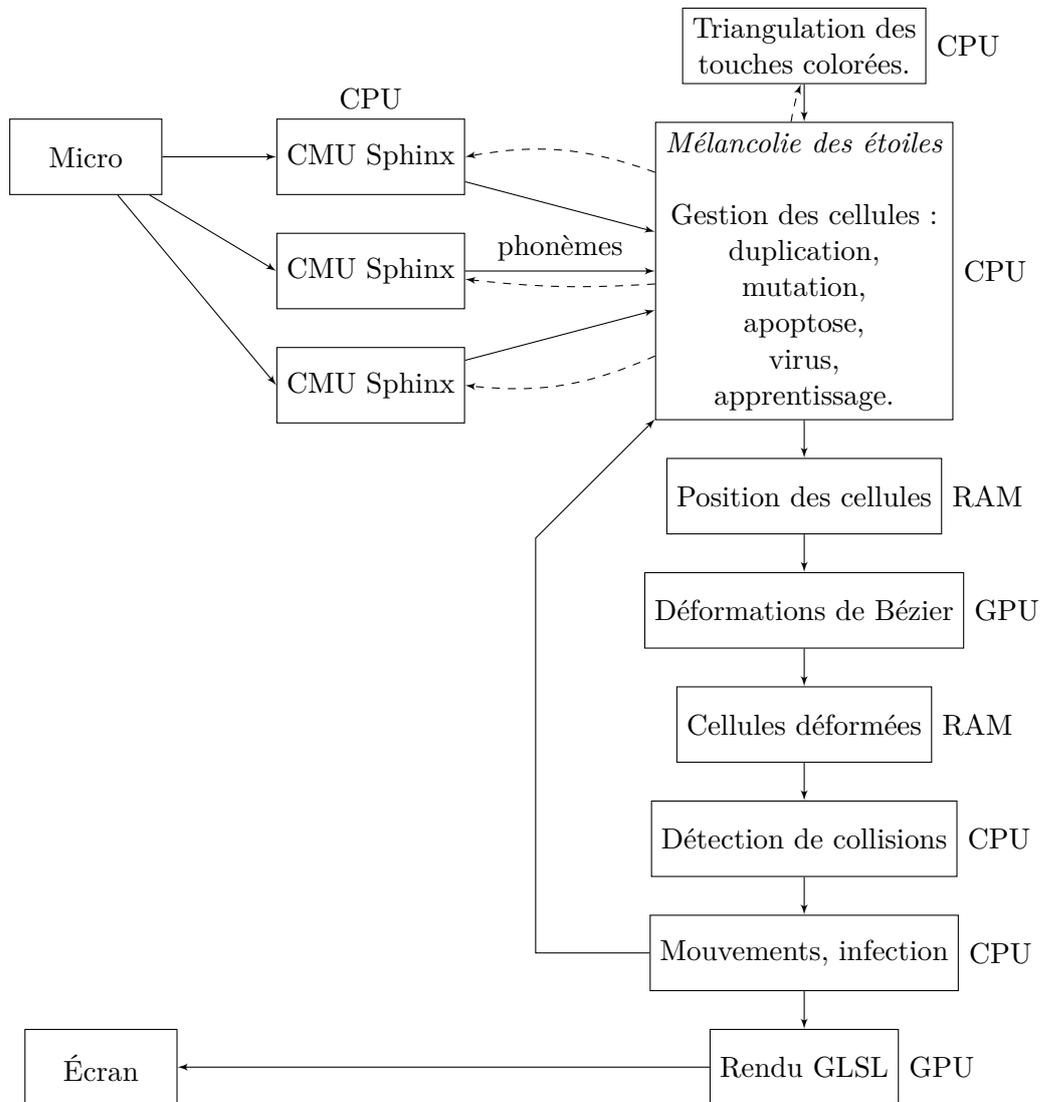


FIGURE A.2 : Schéma de fonctionnement de *Mélancolie des étoiles*.

A.1.1 Prise en charge de la reconnaissance vocale

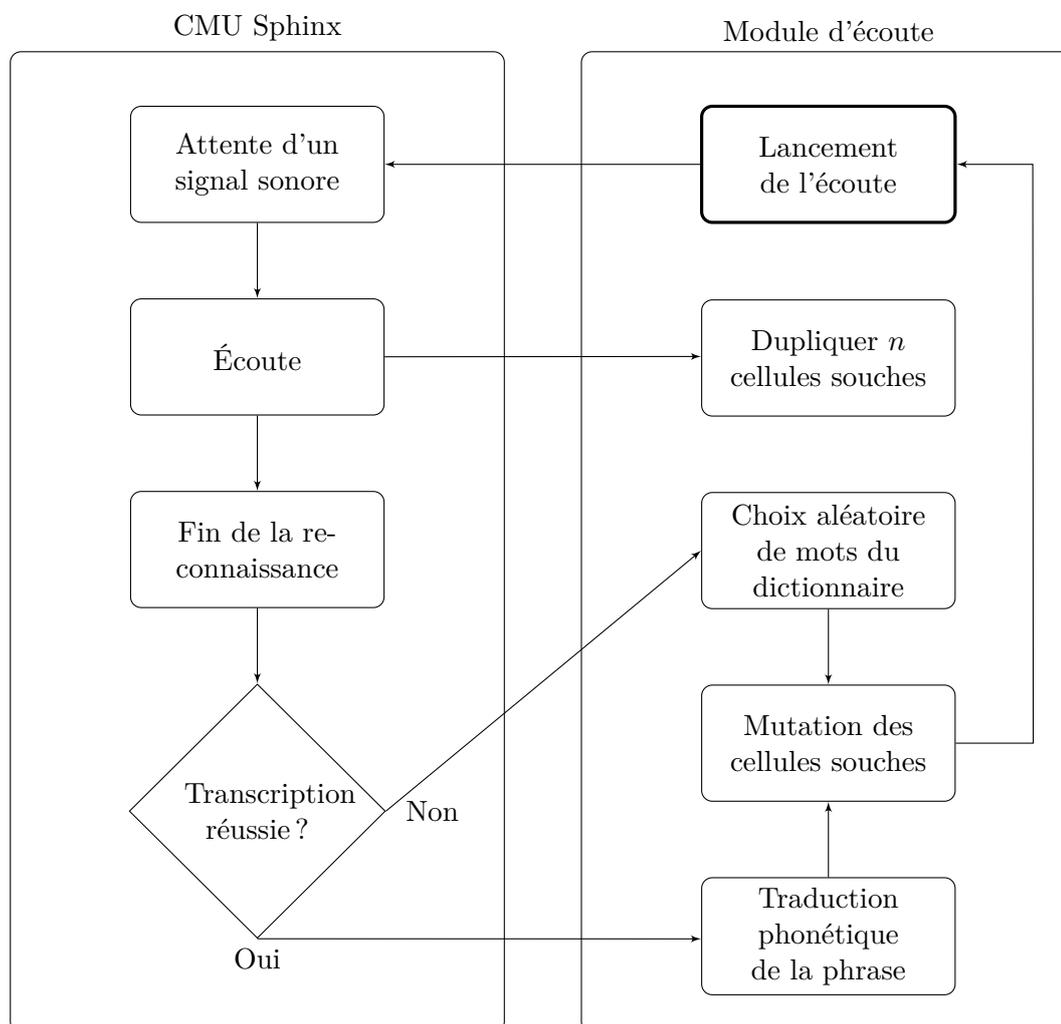


FIGURE A.3 : Algorithme simplifié de la reconnaissance vocale.

La gestion de la reconnaissance vocale a été confiée à des modules qui communiquent avec *CMU Sphinx* par le biais de *named pipes* héritées des traditionnelles *pipes* d'Unix. Lors du lancement de l'application, un premier module va demander à *CMU Sphinx* d'attendre un signal sonore. Lorsqu'un seuil est atteint, ce dernier va commencer l'écoute et la transcription et immédiatement avertir le module qu'un son a été reconnu. Le module va alors compter le nombre de cellules souches disponibles et le cas échéant ajouter à la liste d'actions à effectuer la duplication d'un certain nombre de ces dernières. Au même moment un compteur est déclenché au cas où la reconnaissance vocale prendrait trop de temps. Une fois celle-ci effectuée, *CMU Sphinx* va transmettre une phrase au module

qui va se charger de la transcrire phonétiquement. Si ce message est vide, c'est que la reconnaissance a été infructueuse, le module va alors choisir pseudo-aléatoirement des mots du dictionnaire. Dans tous les cas, de nouvelles tâches vont être ajoutées à la liste d'action, en commençant par reproduire de nouvelles cellules souches si nécessaire puis par leur mutation en phonèmes. Enfin, il reste deux possibilités, soit le compteur a atteint cinq secondes, auquel cas un autre module d'écoute a été démarré en liaison avec un processus *CMU Sphinx* libre, soit ce n'est pas le cas et le même module est relancé.

Mélancolie des étoiles a plusieurs tâches à gérer. Pour ce qui concerne l'apoptose et l'infection, ces opérations peuvent être appliquées directement. En revanche la reproduction de cellules et la mutation peuvent être différées puisqu'elles nécessitent d'avoir des cellules souches disponibles et en nombre suffisant. C'est pourquoi une liste d'actions à effectuer a été conçue pour répondre à cette attente. De la sorte, il y a toujours un nombre minimal de cellules souches et la reproduction précède les mutations, évitant tout blocage par disparition de ces cellules. Dans la pratique, même en mode soutenu correspondant à un flux ininterrompu de parole, cette liste n'a jamais dépassé 150 actions et se résorbe en quelques secondes, la reproduction des cellules étant exponentielle.

A.1.2 Déroutement du programme

Tout les soixantièmes de seconde le programme réitère le même processus avant de passer à l'affichage. Celui-ci vérifie qu'il y a un nombre minimum de cellules souches et le cas échéant ajoute à la liste d'actions d'en dupliquer de nouvelles. Ensuite, s'il n'y a plus assez de cellules immunitaires ou si le rapport entre le pourcentage de cellules infectées et les premières est trop bas, leur duplication est ajoutée à cette liste d'actions. Dans le cas peu probable où il n'y ait plus aucun silence, le programme remplace ces duplications par des mutations de cellules souches. Le fait de garantir un minimum de quatre cellules souches à tout moment interdit une apoptose généralisée et la fin du programme.

La première étape consiste à prendre en charge la liste d'actions à effectuer. Celles-ci sont considérées l'une après l'autre et une cellule est réservée si l'action est possible. Dans ce cas, l'action est retirée de la liste, sinon elle est conservée pour une prochaine itération. Cela se produit par exemple lorsque les cellules souches ne sont pas assez nombreuses pour faire les mutations demandées ou même lorsqu'il y a trop de duplications à effectuer. Cependant aucun blocage ne se produit dès lors que les cellules souches, non concernées par l'infection, doivent se dupliquer avant de pouvoir muter. La recherche de cellules disponibles devant être vérifiée pour chaque action, une liste des cellules souches disponibles et une autre des silences sont construites en amont.

L'étape suivante consiste à effectuer leurs déplacements. Une liste des cellules, incorporant leurs position, vitesses (linéaire et de rotation), état, énergie et génome, est mise à jour en tant réel dès qu'il y a un changement (apoptose, duplication, infection, mutation). Les cellules errent sur l'écran et certaines, selon leur affinité, forment des groupes où elles échangent de l'énergie. La liste des cellules est alors parcourue pour rechercher une chaîne (sans doublon) qui formerait un mot du dictionnaire phonétique. Si c'est le cas, les cellules en question commencent immédiatement leur mutation en virus mais ne deviendront éventuellement contaminantes qu'après ce processus. Enfin, les cellules saines peuvent être infectées ou encore entrer en apoptose par épuisement de leur énergie.

À toutes ces tâches il a été décidé de procéder constamment à des mutations aléatoires pour renforcer un côté insaisissable de la pièce. Une conséquence en est une réduction du temps de calcul pour la recherche de mots puisqu'il faut une chaîne d'au moins cinq phonèmes libres, c'est à dire qui ne soient ni en mutation, ni en apoptose, ni infectées. Cela affecte aussi la production de virus qui est ralentie mais toujours bien présente. De plus, du fait des attractions-répulsions entre phonèmes, cette tendance à former de moins en moins de virus évolue lentement sans pour autant être annihilée. Souhaitant diversifier l'apparence des touches colorées, certaines se figent quelques instants au milieu des mutations et forment alors des cellules hybrides multipliant leur apparence. Des mille touches colorées initiales il devient possible d'en obtenir un million par ces mélanges.

Enfin, l'idée première de *Mélancolie des étoiles* a été de s'adresser à un public restreint avec peu de locuteurs simultanément et dans un environnement peu bruité. Ces circonstances idéales ne peuvent pour autant être garanties, notamment lors d'une exposition collective comme à la nuit européenne des chercheurs. Dans ce cas, le nombre minimal de cellules a été triplé avec l'introduction de leurres, faisant office d'orateurs, pour maintenir une progression à la pièce. Il en résulte une activité continue avec une prolifération et un regain d'activité lorsque de la parole est reconnue.

B

As Rigid As Possible

L'idée générale de l'opération est la déformation d'objets de la manière la plus naturelle possible. Si plusieurs solutions et diverses implémentations sont possibles¹, il ressort que les déformations As Rigid As Possible (ARAP) donnent de très bons résultats et minimisent l'énergie de déformation². Chaque objet est représenté par un maillage triangulaire en deux ou trois dimensions. Dans la suite, ces objets seront détaillés en deux dimensions mais la généralisation à trois est immédiate.

Une transformation entièrement rigide ne modifie pas la géométrie de l'objet, ni son échelle. En revanche, une déformation ARAP peut le faire tout en conservant la topologie de l'objet. L'opération consiste à minimiser l'énergie de transformation, au sens des moindres carrés. Plusieurs approches sont possibles, suivant la représentation adoptée. Elle peut être au niveau des triangles³ ou des arêtes⁴. Dans le premier cas, l'énergie considérée est celle des rotations, alors que dans le deuxième, c'est celle de l'étirement-

¹Olga Sorkine, *Differential Representations for Mesh Processing*, 2006. [173] Mario Botsch and Olga Sorkine, *On Linear Variational Surface Deformation Methods*, 2008. [33]

²Ligang Liu *et al.* *A Local/Global Approach to Mesh Parameterization*, 2008. [120]

³Olga Sorkine and Marc Alexa, *As-Rigid-As-Possible Surface Modeling*, 2007. [174]

⁴Takeo Igarashi and Yuki Igarashi, *Implementing As-Rigid-As-Possible Shape Manipulation and Surface Flattening*, 2008. [103]

compression des arêtes qui est prise en compte. Mais, quelle que soit l'approche, les résultats sont similaires.

Nous nous intéressons ici aux angles des triangles et ainsi uniquement aux rotations. Le principe générique est de s'intéresser localement aux déformations pour minimiser l'énergie globale (la somme des énergies engendrées par les rotations) nécessaire à cette transformation. Cette approche est à comparer aux résultats obtenus par les méthodes courantes représentées sur la figure B.1⁵. Les transformations ARAP donne des résultats similaires à l'approche PRIMO mais avec une méthode plus intuitive et une résolution plus efficace.

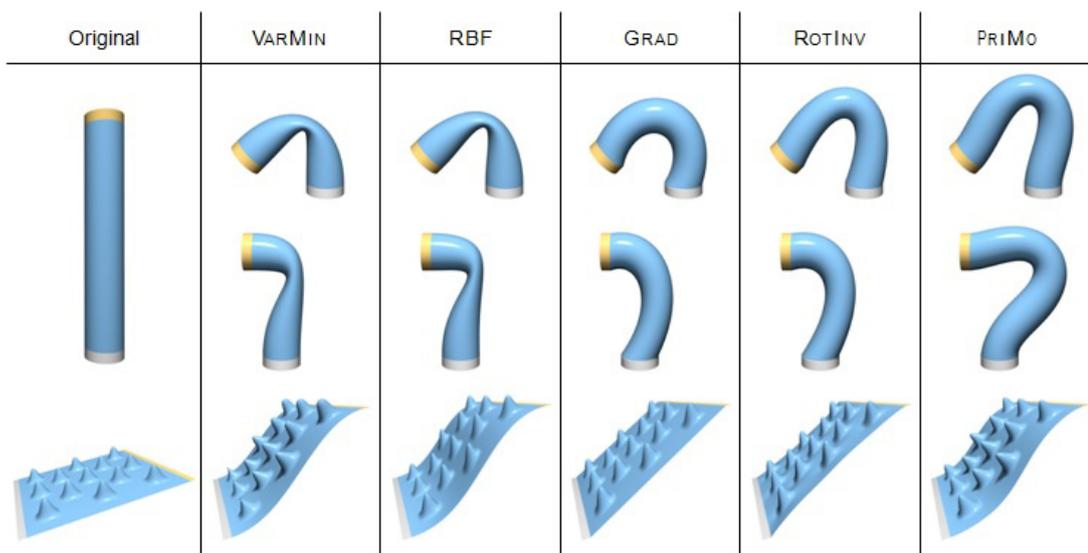


FIGURE B.1 : Exemples de déformations par VARMIN [30], RBF⁷ [31], GRAD [156], ROTINV [119] et PRIMO [32]

Concrètement, la démarche est la suivante :

- On note S le maillage, avec n sommets et m triangles.
- $N(i)$ l'ensemble des sommets reliés au sommet i , ses voisins directs.
- p_i les coordonnées des sommets ; $p_i \in \mathbb{R}^2$ (ou \mathbb{R}^3)
- Un maillage S est transformé en un maillage S' .
- Localement, on définit une cellule C_i correspondant au sommet i et à son voisinage direct $N(i)$.

⁵Mario Botsch, *et al.* *PriMo : Coupled Prisms for Intuitive Surface Modeling*, 2006. [32]

⁷Radial Basis Function

- Si l'opération $C_i \rightarrow C'_i$ est rigide, il existe alors une unique matrice de rotation R_i telle que : $p'_i - p'_j = R_i(p_i - p_j), \forall j \in N(i)$
- Dans le cas contraire, il est possible de trouver la meilleure rotation approximante, au sens des moindres carrés, qui minimise l'énergie de transformation :

$$E(C_i, C'_i) = \sum_{j \in N(i)} w_{i,j} |(p'_i - p'_j) - R_i(p_i - p_j)|^2$$

- Où $w_{i,j} = \frac{1}{2}(\cot(\alpha_{i,j}) + \cot(\beta_{i,j}))$ (Figure B.2)

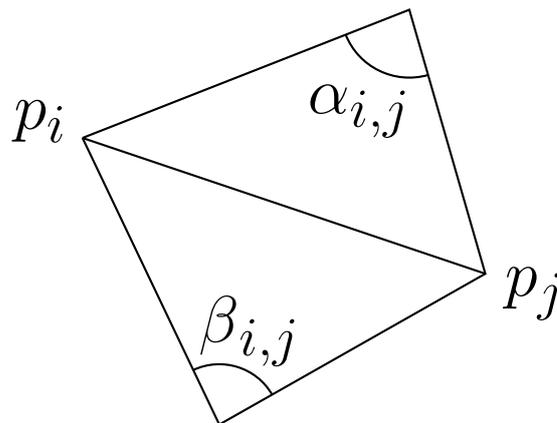


FIGURE B.2 : Calcul des poids $w_{i,j} = w_{j,i} = \frac{1}{2}(\cot(\alpha_{i,j}) + \cot(\beta_{i,j}))$

On obtient alors l'énergie globale :

$$E(S') = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N(i)} w_{i,j} |(p'_i - p'_j) - R_i(p_i - p_j)|^2$$

Le but est alors de trouver les rotations R_i qui la minimisent, mais il s'agit de la transformation d'un maillage sur lequel on a fixé et déplacé certains points, donc non seulement les rotations R_i ne sont pas connues, mais les positions finales de tous les autres sommets non plus et il apparaît que ce problème n'a pas de résolution linéaire. La méthode ARAP s'appuie alors sur le fait que la matrice des dérivées partielles de ces rotations amène à l'opérateur de Laplace-Beltrami discret, matrice clairsemée des relations entre sommets (affectée des cotangentes), qui est symétrique et semi-définie positive.

La solution proposée par Olga Sorkine et Marc Alexa⁸ permet, en relativement peu d'étapes, d'obtenir une convergence vers un minimum local qui s'avère très satisfaisant

⁸Olga Sorkine and Marc Alexa, *op. cit.* [174]

comparé aux différentes techniques explorées. Partant de l'opérateur de Laplace-Beltrami où les lignes et colonnes correspondant aux sommets fixes ont été retirées, la résolution passe par une inversion de cette matrice. En prenant soin de s'assurer que celle-ci soit définie positive⁹, l'algorithme ne demande que l'inversion d'une matrice clairsemée suivie, pour chaque étape, du calcul des candidats aux rotations pour chaque sommet, opération faisant intervenir une décomposition en valeurs singulières des matrices de voisinage.

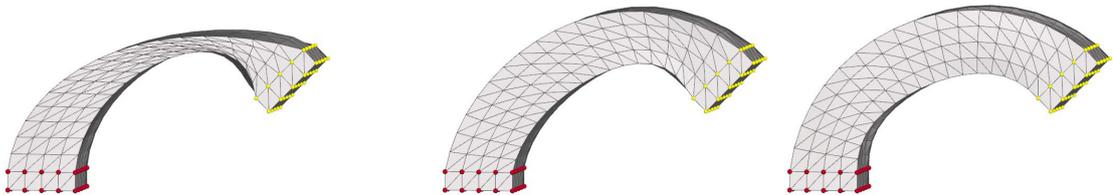
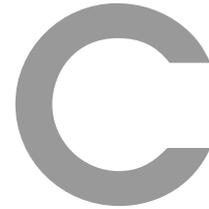


FIGURE B.3 : Déformation ARAP initiale, après une itération et quatre itérations¹⁰

Pour des maillages relativement conséquents, avec une faible proportion de points fixes et une utilisation "correcte" du positionnement de ces derniers, les résultats sont quasiment garantis, comme pour la déformation d'une tour (Figure B.3). Cependant le déplacement anarchique de ces derniers pourrait amener à des configurations exotiques. Dans *Mélancolie des étoiles*, c'est un autre problème qui est apparu lors de certaines mutations entre cellules. Du fait qu'il s'agisse de fixer-déplacer tous les points de contour, environ deux fois plus nombreux que les autres sommets, quelques cas d'oscillation entre deux configurations sont survenus et plus rarement encore entre trois. Ce phénomène a aussi été certainement amplifié par le fait qu'en deux dimensions il y a une perte de degré de liberté. Pour autant, à chaque fois, la convergence vers une ou plusieurs solutions est rapide et conserver la meilleure dans ce dernier cas abouti à l'effet escompté.

⁹Le cas contraire, s'il est très peu probable, n'est pas à négliger. Il se pourrait par exemple que l'approximation inhérente au codage informatique des nombres puisse amener à une valeur singulière nulle et rendre la matrice non-inversible. Néanmoins, cela ne s'est jamais produit dans le cas de *Mélancolie des étoiles* où cette opération a dû être réalisée de l'ordre d'un million de fois.

¹⁰*Ibid.* [174]



Optimisation des déformations de Bézier sur GPU

Chaque cellule comporte un maximum de 30 points (sommets des triangles) à déformer sur un patch bicubique, ce qui correspond à 16 points de contrôle en deux dimensions (indépendants pour chaque cellule). D'où l'emploi de blocs de 32 threads, chacun transférant une des coordonnées de chaque point de contrôle en mémoire partagée (la plus rapide) avant de calculer le déplacement (en x et y) d'un des sommets. Le transfert de l'ensemble des données, composées de suites de 96 flottants ($32 * 2$ pour les cellules et $16 * 2$ pour les points de contrôle) est réalisé en une seule passe et le résultat est stocké dans une place mémoire dédiée. Chaque étape a été optimisée pour réduire au maximum le nombre de calculs, aussi bien pour les puissances utilisées deux fois que pour le calcul final, bénéficiant de la fonctionnalité FMAF (Fused Multiply Add Float¹) imbriquée plusieurs fois en elle-même. Ce calcul devant être effectué à chaque frame pour chaque cellule, l'utilisation du parallélisme sur CPU n'est pas profitable à cause de la latence au lancement des threads. En comparaison, pour deux milliers de cellules, en prenant en compte le temps de transfert des données, le calcul est trois fois plus rapide sur GPU (NVIDIA GTX 970, 1 664 cœurs @ 1 GHz, et cinquante fois sans le transfert) que sur un processeur cadencé à 4 GHz. En effet, sur ce dernier, tant que les accès mémoire

¹Cette fonction : $a \leftarrow a * b + c$ dans une seule instruction est intégrée depuis 2010 dans les puces des cartes graphiques NVIDIA [183], alors qu'elle n'a été introduite dans les processeurs "classiques" haut de gamme que depuis 2014, sous deux formes différentes, incompatibles entre elles.

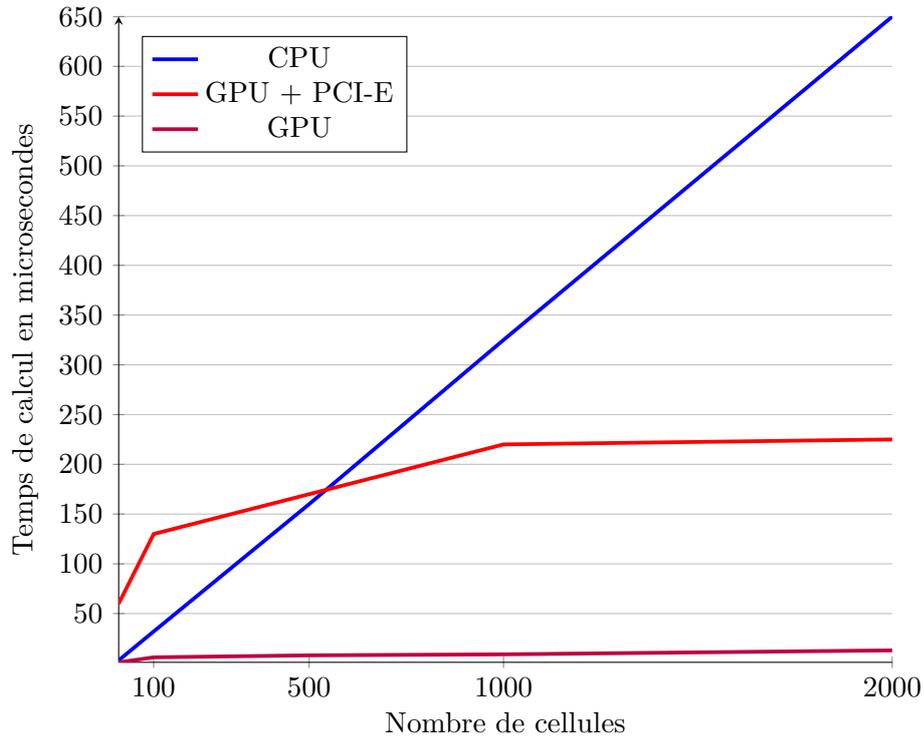


FIGURE C.1 : Temps de calcul moyen sur CPU et GPU en fonction du nombre de cellules.

sont assurés, le temps de calcul est linéaire. Sur la carte graphique en revanche, c'est le temps de transfert sur le bus PCI-Express qui importe, le calcul pur étant négligeable (13 microsecondes pour 2 000 cellules) comme l'indique la figure C.1². Alors qu'avec les fonctions originales de déformation de Bézier sur OpenGL, il n'est possible de n'en rendre qu'une trentaine en temps réel, il est ici possible d'en afficher plus de trois mille sans ralentissement, la limite étant due aux capacités d'affichage de la carte graphique (de l'ordre de 100 000 triangles texturés pour 3 000 cellules). Et en tout état de cause, le processeur peut être libéré pour d'autres tâches, le transfert des données par PCI-E pouvant être asynchrone.

Pour rappel, les déformations de Bézier se calculent par la formule suivante :

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} B_i^n(u) B_j^m(v), (u, v) \in [0; 1]^2$$

²La ligne rouge représentant le temps de calcul plus le temps de transfert montre en fait des variations de l'ordre de plus ou moins 10 % dépendant d'une latence liée au système d'exploitation.

Où les $B_i^n(t)$ sont les polynômes de Bernstein :

$$B_i^n(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i}, t \in [0; 1]$$

Détail du code CUDA des déformations de Bézier.

```
__global__ void bezierDirectBicubiqueCUDA(float * B, float * D)
{
    //Copie des données en mémoire partagée dans le même bloc
    __shared__ float _B[32];
    unsigned long idx = threadIdx.x;
    unsigned long idy = blockIdx.x;
    // idz : adresse mémoire de retour
    // idz = idy * 64
    unsigned long idz = idy << 6;
    // idy : adresse mémoire source
    // idy *= 96
    idy = (idy << 5) + idz;
    _B[idx] = B[idy + idx];
    // D'où une synchronisation nécessaire
    __syncthreads();
    if (idx < B[idy + 95])
    {
        // Calcul de u, v, 1 - u, 1 - v, de leur puissances et produits
        float u, v;
        idx = idx << 1;
        idz += idx;
        // idx : coordonnées des sommets
        idx += 32;
        idx += idy;
        u = B[idx++];
        v = B[idx];
        float unmoinsu, unmoinsv;
        float Bu0, Bu1, Bu2, Bu3, Bv0, Bv1, Bv2, Bv3;
        unmoinsu = 1.f - u;
        unmoinsv = 1.f - v;
        Bu0 = unmoinsu * unmoinsu;
        Bu1 = 3.f * u * Bu0;
        Bu0 *= unmoinsu;
        Bu3 = u * u;
        Bu2 = 3.f * Bu3 * unmoinsu;
        Bu3 *= u;
        Bv0 = unmoinsv * unmoinsv;
        Bv1 = 3.f * v * Bv0;
        Bv0 *= unmoinsv;
        Bv3 = v * v;
        Bv2 = 3.f * Bv3 * unmoinsv;
        Bv3 *= v;
    }
}
```

```

// Calcul de x et y
// Copie du résultat, utilisation de fused mult add float
D[idz++] = __fmaf_rn(__fmaf_rn(Bu3, _B[15],
    __fmaf_rn(Bu2, _B[14],
    __fmaf_rn(Bu1, _B[13], Bu0 * _B[12]))), Bv3,
    __fmaf_rn(__fmaf_rn(Bu3, _B[11],
    __fmaf_rn(Bu2, _B[10],
    __fmaf_rn(Bu1, _B[9], Bu0 * _B[8]))), Bv2,
    __fmaf_rn(__fmaf_rn(Bu3, _B[7],
    __fmaf_rn(Bu2, _B[6],
    __fmaf_rn(Bu1, _B[5], Bu0 * _B[4]))), Bv1,
    __fmaf_rn(Bu3, _B[3],
    __fmaf_rn(Bu2, _B[2],
    __fmaf_rn(Bu1, _B[1], Bu0 * _B[0])))) * Bv0)))));
D[idz] = __fmaf_rn(__fmaf_rn(Bu3, _B[31],
    __fmaf_rn(Bu2, _B[30],
    __fmaf_rn(Bu1, _B[29], Bu0 * _B[28]))), Bv3,
    __fmaf_rn(__fmaf_rn(Bu3, _B[27],
    __fmaf_rn(Bu2, _B[26],
    __fmaf_rn(Bu1, _B[25], Bu0 * _B[24]))), Bv2,
    __fmaf_rn(__fmaf_rn(Bu3, _B[23],
    __fmaf_rn(Bu2, _B[22],
    __fmaf_rn(Bu1, _B[21], Bu0 * _B[20]))), Bv1,
    __fmaf_rn(Bu3, _B[19],
    __fmaf_rn(Bu2, _B[18],
    __fmaf_rn(Bu1, _B[17], Bu0 * _B[16])))) * Bv0)))));
}
}

```


Bibliographie

- [1] Cmu sphinx. <http://cmusphinx.sourceforge.net/>.
- [2] Modèle acoustique du français pour cmu sphinx. <http://www-lium.univ-lemans.fr/fr/content/modeles-acoustic>.
- [3] Serge Abiteboul and Gilles Dowek. *Le temps des algorithmes*. Le Pommier, 2017.
- [4] Gary L. Achtemeier. "rabbit rules" - an application of stephen wolfram's "new kind of science" to fire spread modeling. In *Technical Program of the Joint 2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress and 5th Symposium on Fire and Forest Meteorology*, 2003. November 16–20, Orlando.
- [5] C. Alexandre. *Dictiscience Grec-Français*. Librairie de L. Hachette et C^{ie}, 1850.
- [6] Daniel Arasse. *Histoires de peintures*. Folio essais, Gallimard, 2004.
- [7] Archimède. *Œuvres d'Archimède*, chapter L'arénaire. François Buisson, 1807. Tr. F. Peyrard. <http://remacle.org/bloodwolf/erudits/archimede/arenaire.htm>.
- [8] Edwige Armand. *Écriture d'un monde : Métacorps, Infralangage et Singularité*. PhD thesis, Université Toulouse 2 Jean Jaurès, 2016.
- [9] Alain Aspect, Philippe Grangier, and Gérard Roger. Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *Gedankenexperiment* : A New Violation of Bell's Inequalities. *Physical Review Letters*, Vol. 49(Num. 2) :p. 91–94, 1982.
- [10] Gaston Bachelard. *Le nouvel esprit scientifique*. Quadrige / Presses Universitaires de France, 16^{ème} édition, 1984. (1^{ère} édition, 1934).
- [11] Gaston Bachelard. *Fragments d'une poétique du feu*. Presse Universitaire de France, 1988. Œuvre posthume.
- [12] Gaston Bachelard. *La dialectique de la durée*. Presses Universitaires de France. Bibliothèque de philosophie, Seconde édition, 1963 (1^{ère} édition, 1950).

- [13] Françoise Balibar. *Einstein, Newton et Poincaré, une affaire de principes*, chapter Einstein et Poincaré, une affaire de principes, pages 4–9. Dunod, 2008.
- [14] Aurélien Barrau. Qui a peur de la déconstruction ? : Pour une philosophie du don. *Diacritik*, 20 mars 2017. <https://diacritik.com/2017/03/20/qui-a-peur-de-la-deconstruction-pour-une-philosophie-du-don/#more-20773>.
- [15] Aurélien Barrau. *Quelques éléments de physique et de philosophie des multivers*. Université Joseph Fourier, 2007.
- [16] Aurélien Barrau. *De la vérité dans les sciences*. Dunod, 2016.
- [17] Aurélien Barrau. *Big Bang et au-delà. Balade en cosmologie*. Dunod, Nouvelle édition, 2015 (édition originale, 2013).
- [18] William Baxter, Pascal Barla, and Ken-ichi Anjyo. Rigid shape interpolation using normal equations. In *Proceedings of the 6th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, pages 59–64. ACM, 2008.
- [19] Henri Bergson. *Essai sur les données immédiates de la conscience*. Université du Québec à Chicoutimi. Les classiques des sciences sociales, 1888. http://classiques.uqac.ca/classiques/bergson_henri/essai_conscience_immediate/essai_conscience.pdf.
- [20] Henri Bergson. *L'énergie spirituelle. Essais et Conférences*. Université du Québec à Chicoutimi. Les classiques des sciences sociales, 1919. http://classiques.uqac.ca/classiques/bergson_henri/energie_spirituelle/energie_spirituelle.pdf.
- [21] Henri Bergson. *Durée et simultanéité*. Université du Québec à Chicoutimi. Les classiques des sciences sociales, 1922. http://classiques.uqac.ca/classiques/bergson_henri/duree_simultaneite/duree_et_simultaneite.pdf.
- [22] Henri Bergson. *Matière et mémoire. Essai sur la relation du corps à l'esprit*. Université du Québec à Chicoutimi. Les classiques des sciences sociales, 1939. http://classiques.uqac.ca/classiques/bergson_henri/matiere_et_memoire/matiere_et_memoire.pdf.
- [23] Henri Bergson. *L'évolution créatrice*. Quadrige, Presse Universitaire de France, 2013. 12^{ème} édition (Édition originale, 1907).
- [24] Stephen G. Berjak and John W. Hearne. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous savanna system. *Ecological modelling*, (Num. 148) :p. 133–151, 2001.
- [25] Gérard Berry. Les Shadoks sont ils décervelables? *Collège de 'Pataphysique*, 2008. <http://www-sop.inria.fr/members/Gerard.Berry/Pataphysique/BerryDecervelageShadoks.pdf>.

- [26] Gérard Berry. *L'Hyperpuissance de l'informatique. Algorithmes, données, machines, réseaux*. Odile Jacob, 2017.
- [27] Ambrose Bierce. *The devil's dictionary*. The world publishing company, 1911. <https://archive.org/details/cu31924014323772>.
- [28] Pierre Binétruy. *À la poursuite des ondes gravitationnelles*. Dunod, 2015.
- [29] Alain Bonnet. La réforme de l'École des beaux-arts de 1863. Peinture et sculpture. *Romantisme*, Vol. 26(Num. 93) :p. 27–38, 1996.
- [30] Mario Botsch and Leif Kobbelt. An intuitive framework for real-time freeform modeling. In *Proceeding of ACM SIGGRAPH 04*, 2004.
- [31] Mario Botsch and Leif Kobbelt. Real-time shape editing using radial basis functions. In *Proceedings of the EUROGRAPHICS 2005*, 2005.
- [32] Mario Botsch, Mark Pauly, Marcus Gross, and Leif Kobbelt. Primo : Coupled prisms for intuitive surface modeling. In Konrad Polthier and Alla Sheffer, editors, *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 2006.
- [33] Mario Botsch and Olga Sorkine. On linear variational surface deformation methods. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 14(Num. 1) :p. 213–230, 2008.
- [34] Pierre Bourdieu. *Science de la science et réflexivité*. Raisons d'agir, 2001.
- [35] Jacques Bouveresse. *La vérité dans les sciences*, chapter Le réalisme scientifique est-il mort ?, pages 15–47. Odile Jacob, 2003. Sous la direction de Jean-Pierre Changeux.
- [36] Michel Bret, Marie-Hélène Tramus, and Alain Berthoz. Interacting with an intelligent dancing figure : artistic experiments at the crossroads between art and cognitive science. *ISAST Leonardo*, Vol. 38(Num. 1) :p. 46–53, 2005.
- [37] André Breton. *Manifestes du surréalisme*. Gallimard, 1971 (Édition du premier manifeste, 1924. Du second, 1930).
- [38] Thomas Breton. Auto-organisation sous contraintes : application au déplacement d'entités virtuelles en espace restreint. Master's thesis, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2007.
- [39] Thomas Breton, Edwige Armand, and Yves Duthen. Phonemes to viruses : An aesthetic transformation. In *International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts, SGEM Social & Arts 2014, Albena, Bulgaria, 02/09/14-09/09/14*, pages 203–210. STEF92 Technology Ltd., september 2014.

- [40] Thomas Breton, Dana Bogheanu, and Yves Duthen. Cellular automata against fire threat on an urban area. Technical report, Projet FILONAS (FIremen LOcalization and NAvigation System), 2009.
- [41] Thomas Breton and Yves Duthen. Les simulations de propagation de feu en milieu urbain. *HAL*, 2008. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00287987/file/Les_simulations_de_propagation_de_feu_en_milieu_urbain.pdf.
- [42] Thomas Breton and Yves Duthen. A model for virtual reconfigurable modular robots. *HAL*, 2011. <https://hal-univ-tlse3.archives-ouvertes.fr/hal-01298411/document>.
- [43] Louis de Broglie. *Diverses questions de mécanique et de thermodynamique classiques et relativistes*. Springer, 1995.
- [44] Calliope. *La Parole et son Traitement Automatique*. Masson. Tubach, J.P., Paris, 1989.
- [45] Davide Castelvecchi and Alexandra Witze. Einstein’s gravitational waves found at last. *Nature*, (Special), 11 February 2016. <http://www.nature.com/news/einstein-s-gravitational-waves-found-at-last-1.19361>.
- [46] Jean-Pierre Changeux. *L’Homme de vérité*. Odile Jacob, 2002.
- [47] Jean-Pierre Changeux. *Raison et Plaisir*. Odile Jacob, 2002.
- [48] Jean-Pierre Changeux. *Du vrai, du beau, du bien. Une nouvelle approche neuronale*. Odile Jacob, 2008.
- [49] Jean-Pierre Changeux and Alain Connes. *Matière à pensée*. Éditions Odile Jacob, 1989.
- [50] Chu-Yin Chen. Un parcours de création : de l’automatisme psychique à l’évolutionnisme. In *Colloque International, Les Arts dans le cadre actuel de la théorie de l’évolution. Journée IMERA «Art, Culture, Théorie de l’Évolution»*, 22 octobre 2009.
- [51] Nicholas J. Conard. A female figurine from the basal Aurignacian of Hohle Fels Cave in southwestern Germany. *Nature*, (Num. 459) :p. 248–252, march 2009.
- [52] Alain Connes, André Lichnerowicz, and Marcel-Paul Schützenberger. *Triangle de pensée*. Éditions Odile Jacob, 2000.
- [53] John H. Conway. « *What is Life ?* », *Winning Ways for your Mathematical Plays*, volume 2, chapter 25. Berlekamp, E. and Conway, J.H. and Guy, R., 1982.
- [54] B. Jack Copeland, Alan Turing, Emil Post, Donald W. Davies, Patrick Mahon, Richard Braithwaite, Geoffrey Jefferson, and Max Newman. *The Essential Turing : Seminal Writings in Computing, Logic, Philosophy, Artificial Intelligence, and Artificial Life : Plus The Secrets of Enigma*. Oxford University Press, 2004.

- [55] Edmond Couchot. *La Nature de l'art*. Hermann Éditions, Paris, 2012.
- [56] Edmond Couchot and Norbert Hillaire. *L'art numérique. Comment la technologie vient au monde de l'art*. Flammarion. Champs arts, Paris, France, 2003.
- [57] Gustave Courbet. Lettre à monsieur Maurice Richard, Ministre des lettres, sciences et beaux-arts, 23 juin 1870. <http://www.deslettres.fr/lettre-de-gustave-courbet-a-maurice-richard-ministre-des-beaux-arts-mes-opinions-de-citoyen-sopposent-a-ce-que-jaccepte-une-distinction-qui-releve-essentiellement-de-l/>.
- [58] Louis Couturat. *Les principes des mathématiques*. Félix Alcan, éditeur, 1905.
- [59] Louis Couturat. *De l'infini mathématique*. Alber Blanchard, 1973. (Édition originale, 1896).
- [60] Boris Cyrulnik. *Un merveilleux malheur*. Odile Jacob, 1999.
- [61] Richard Dedekind. *La création des nombres*. Vrin, 2008. Traduction et introduction de Hourya Benis Sinaceur. Articles de 1854 à 1899.
- [62] Stanislas Dehaene. *Le code de la conscience*. Odile Jacob, 2014.
- [63] Gilles Deleuze. *Logique du sens*, chapitre Treizième série : du schizophrène et de la petite fille, pages 101–114. Les éditions de minuit. Collection « Critique », 1969.
- [64] Jacques Derrida. *De la grammatologie*. Les éditions de minuit. Collection « Critique », 1967.
- [65] Jacques Derrida. *L'écriture et la Différence*. Seuil, 1967.
- [66] Jacques Derrida. *La voix et le Phénomène. Introduction au problème du signe dans la phénoménologie de Husserl*. Quadrige. Presses Universitaires de France, 1993. 1^{ère} édition, 1967.
- [67] Jacques Derrida. *Dire l'évènement, est-ce possible ?* L'Harmattan. Collection Esthétiques, 2001. Séminaire de Montréal, pour Jacques Derrida, 1^{er} avril 1997.
- [68] Jacques Derrida. *L'Université sans condition*. Galilée, 2001. Discours tenu à l'université de Stanford, Californie, en avril 1998.
- [69] René Descartes. *Discours de la méthode. Précédé de Descartes inutile et incertain, par Jean-François Revel*. Le livre de poche, 1973.
- [70] Stéphane Doncieux, Nicolas Bredeche, Jean-Baptiste Mouret, and Agoston E. (Gusz) Eiben. Evolutionary robotics : what, why, and where to. *frontiers in Robotics and AI. Evolutionary Robotics*, 3 march 2015. <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/frobt.2015.00004/full>.

- [71] Stéphane Doncieux and Jean-Arcady Meyer. Evolving modular neural networks to solve challenging control problems. In *Proceedings of the fourth international ICSC symposium on engineering of intelligent systems*, 2004.
- [72] Jacques Donguy. Allan Kaprow 1927-2006 créateur du happening. *Inter : art actuel*, (Num. 95) :p. 84–85, hiver 2007. <http://www.erudit.org/culture/inter1068986/inter1112093/45741ac.pdf>.
- [73] Yves Duthen, Hervé Luga, Nicolas Lassabe, Sylvain Cussat-Blanc, Thomas Breton, and Jonathan Pascalie. An introduction to the Bio-Logic of Artificial Creatures. In Dimitri Plemenos and Georgios Miaoulis, editors, *Intelligent Computer Graphics*, chapter 1, pages 1–24. Springer, january 2011.
- [74] Albert Einstein. *La théorie de la relativité restreinte et générale*. Dunod, 2005.
- [75] Albert Einstein. *De l'électrodynamique des corps en mouvement (1905)*. Les classiques des sciences sociales. Université du Québec à Chicoutimi, 2012. http://classiques.uqac.ca/collection_sciences_nature/einstein_albert/Electrodynamique/Electrodynamique.pdf.
- [76] Elena Esposito and Erich Hörl. Réflexivité et Système. Le débat sur l'ordre et l'auto-organisation dans les années 1970. *Trivium*, (Num. 20), 2015. Tr. Didier Renault. <http://journals.openedition.org/trivium/pdf/5206>.
- [77] Euclide. *Les éléments de géométrie d'Euclide*. F. Louis, 1804. Tr. François Peyrard. https://www.irphe.fr/~clanet/otherpaperfile/articles/Euclide/N0110982_PDF_1_601.pdf.
- [78] Michel Faucheux. *La tentation de Faust ou la science dévoyée*. L'Archipel, 2012.
- [79] Paul Feyerabend. *Contre la méthode. Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*. Points. Sciences. Éditions du Seuil, 1979. Tr. Baudouin Jurdant et Agnès Schlumberger.
- [80] Paul Feyerabend. *Adieu la raison*. Éditions du Seuil, 1989. Tr. Baudouin Jurdant (Édition originale, 1987).
- [81] Paul Feyerabend. *La science en tant qu'art*. Albin Michel, 2003. Tr. Françoise Périgaut.
- [82] Paul Feyerabend. *La tyrannie de la science*. Éditions du Seuil, 2014. Tr. Baudouin Jurdant.
- [83] Paul Feyerabend. *Philosophie de la nature*. Éditions du Seuil, 2014. Tr. Matthieu Dumont et Arthur Lochmann (Œuvre posthume).
- [84] Heinz von Foerster. *Système, éthique, Perspectives en thérapie familiale*, chapter 5 Éthique et cybernétique du second ordre, pages 41–63. ESF, Paris, 1991.

- [85] Heinz von Foerster. *Understanding understanding. Essays on cybernetics and cognition*. Springer, New York, 2003.
- [86] Heinz von Foerster. *Seconde cybernétique et complexité. Rencontres avec Heinz von Foerster*, chapter Les responsabilités de la connaissance, pages 72–76. L’Harmattan, 2006. Tr. Evelyne Andreewsky.
- [87] Heinz von Foerster. *Seconde cybernétique et complexité. Rencontres avec Heinz von Foerster*, chapter Éthique et Cybernétique du Second Ordre, pages 77–85. L’Harmattan, 2006. Tr. Yveline Rey.
- [88] Don Foresta. *Mondes Multiples*. B&S, 1991.
- [89] Don Foresta. Empathy and the network. In *Empathie*, number 1, pages 26–29. La revue du Cube, Octobre 2011.
- [90] Évariste Galois. Œuvres mathématiques. In *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, volume 11. Gallica, 1846.
- [91] Jean-Gabriel Ganascia. *L’intelligence artificielle*. Le cavalier bleu, 2007.
- [92] Jason Gauci and Kenneth O. Stanley. Generating Large-Scale Neural Networks Through Discovering Geometric Regularities. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2007)*, 2007. http://eplex.cs.ucf.edu/papers/gauci_gecco07.pdf.
- [93] Nicolas Gisin. *L’impensable hasard. Non-localité, téléportation et autres merveilles quantiques*. Odile Jacob - Sciences, 2012.
- [94] Roger Guesnerie. *La vérité dans les Sciences*, chapter « Vérités » et « représentations » sociales, pages 171–186. Odile Jacob, 2003. Sous la direction de Jean-Pierre Changeux.
- [95] Chourouk Guettas, Foudil Cherif, Thomas Breton, and Yves Duthen. Cooperative co-evolution of configuration and control for modular robots. In *IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, pages 26–31, 2014.
- [96] Jürgen Habermas. *L’avenir de la nature humaine. Vers un eugénisme libéral?* Gallimard, 2015. Tr. Christian Bouchindhomme. Édition originale, 2001.
- [97] Claude Hagège. *Contre la pensée unique*. Odile Jacob, 2012.
- [98] Serge Haroche. *La vérité dans les sciences*, chapter Vérité et réalité du monde quantique microscopique, pages 93–107. Odile Jacob, 2003. Sous la direction de Jean-Pierre Changeux.
- [99] Stephen Hawking and Roger Penrose. *Nature of Space and Time*. Princeton University Press, 2010.

- [100] Olivier Houdé. *La vérité dans les sciences*, chapter La construction du vrai dans le développement cognitif de l'enfant, pages 109–128. Odile Jacob, 2003. Sous la direction de Jean-Pierre Changeux.
- [101] Victor Hugo. *Œuvres complètes. Actes et paroles I. Avant l'exil 1841-1851*. J. Hetzel & C^{ie}, A. Quantin, Paris, 1882. <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k374560/>.
- [102] David Hume. *Enquête sur l'entendement humain*. GF-Flammarion, 1983. Tr. Aubier-Montaigne, l'original datant de 1748 (et de 1758 pour l'intitulé actuel).
- [103] Takeo Igarashi and Yuki Igarashi. Implementing As-Rigid-As-Possible Shape Manipulation and Surface Flattening. *journal of graphics, gpu, and game tools*, vol. 14(Num. 1) :p. 17–30, 2008.
- [104] Pierre Julg. *Images des Mathématiques*, chapter Alain Connes : une autre vision de l'espace, pages 64–71. CNRS, 2006. <http://images.math.cnrs.fr/pdf2006/Julg.pdf>.
- [105] Emmanuel Kant. *Logique*. Librairie philosophique de Ladrance, 1862. 2^{de} édition française (Édition originale 1800).
- [106] Emmanuel Kant. *Critique de la raison pure*. GF-Flammarion, 1987. Tr. Jules Barni, revue par P. Archambault (Édition originale 1781).
- [107] Emmanuel Kant. *Critique de la faculté de juger*. GF-Flammarion, 2015. Tr. Alain Renaut (Édition originale 1790).
- [108] Mehdi Khamassi and Stéphane Doncieux. Nouvelles approches en robotique cognitive. *Intellectica*, Vol. 1(Num. 65) :7–25, 2016.
- [109] Sylvain Koos, Jean-Baptiste Mouret, and Stéphane Doncieux. The Transferability Approach : Crossing the Reality Gap in Evolutionary Robotics. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, pages 1–25, 2012. <http://hal.upmc.fr/file/index/docid/687617/filename/2012ACLI2214.pdf>.
- [110] Alexandre Koyré. *Études galiléennes*. Presse Universitaire de France, 1966.
- [111] Thomas Samuel Kuhn. *La structure des Révolutions scientifiques*. Champs Science, 1983. Tr. Laure Meyer.
- [112] Imre Lakatos. *Histoire et méthodologie des sciences*. Presses Universitaires de France, 1994. Tr. Catherine Malamoud et Jean-Fabien Spitz sous la direction de Luce Giard. Œuvre posthume, 1^{ère} édition 1986.
- [113] Xavier Lambert. *Le corps multiconnexe vers une poïétique de l'oscillation*. Presses Universitaires Nancy, 2010.

- [114] Christopher G. Langton. Studying artificial life with cellular automata. *Physica 22D*, pages 120–149, 1986. North-Holland, Amsterdam.
- [115] Nicolas Lassabe, Hervé Luga, and Yves Duthen. A new step for evolving creatures. In *Symposium of Artificial Life, IEEE/ALife '07*, pages 243–251, 2008.
- [116] Dominique Lecourt. *La philosophie des sciences*. Presse Universitaire de France, 2001.
- [117] Heidi Ledford. Where in the world could the first CRISPR baby be born? *Nature*, (num. 526) :310–311, 15 October 2015. <http://www.nature.com/news/where-in-the-world-could-the-first-crispr-baby-be-born-1.18542>.
- [118] Jean-Marc Lévy-Leblond. *La science expliquée à mes petits-enfants*. Éditions du Seuil, 2014.
- [119] Yaron Lipman, Olga Sorkine, David Levin, and Daniel Cohen-Or. Linear rotation-invariant coordinates for meshes. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 05*, 2005.
- [120] Ligang Liu, Lei Zhang, Yin Xu, Craig Gotsman, and Steven Gortler. A Local/Global Approach to Mesh Parameterization. In *Eurographics Symposium on Geometry Processing 2008*, volume Vol. 27, 2008.
- [121] Jean-Pierre Luminet and Marc Lachièze-Rey. *De l'infini...* Dunod, 2005.
- [122] Christian Magnan. *Le théorème du jardin*. amds Édition, 2014.
- [123] Emmanuel Malolo Dissakè. *Feyerabend. Épistémologie, anarchisme et Société libre*. Presses Universitaires de France, 2001.
- [124] Benoît Mandelbrot. *Les objets fractals. Forme, hasard et dimension*. Champs Flammarion, 1995. 4^{ème} édition (1^{ère} édition 1975).
- [125] Karl Marx and Friedrich Engels. *Manifeste du parti communiste*. Éditions sociales, 1976. (1^{ère} édition 1848) Tr. revue par Michèle Tailleux.
- [126] Marshall McLuhan and Quentin Fiore. *The Medium is the Massage*. Gingko Press Inc., 1967.
- [127] John Stuart Mill. *De la liberté*. Université du Québec à Chicoutimi. Les classiques des sciences sociales, 1859. http://classiques.uqac.ca/classiques/Mill_john_stuart/de_la_liberte/de_la_liberte.pdf.
- [128] Jacques Monod. *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*. Éditions du Seuil, 1970.
- [129] Michel Morange. *À quoi sert l'histoire des sciences?* Éditions Quæ, Versailles, France, 2008.

- [130] Florence Morat and Vanessa Morisset. Pablo Picasso. Dossiers pédagogiques du Centre Pompidou, 2007. <http://mediation.centrepompidou.fr/education/ressources/ENS-PICASSO/ENS-picasso.html>.
- [131] Edgar Morin. Le défi de la complexité. *Chimères*, (Num. 5-6), 1988.
- [132] Edgar Morin. *Science avec conscience. Suivi de : Pour la pensée complexe*. Points. Sciences. Fayard, 1990.
- [133] Edgar Morin. *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*. Seuil. UNESCO, 1999.
- [134] Edgar Morin. *La Voie. Pour l'avenir de l'humanité*. Fayard. Pluriel, 2011.
- [135] Edgar Morin and Jean-Louis Le Moigne. *L'intelligence de la complexité*. L'Harmattan, 1999.
- [136] Vanessa Morisset. Vassily Kandinsky. Dossiers pédagogiques du Centre Pompidou, 2010. <http://mediation.centrepompidou.fr/education/ressources/ENS-kandinsky-mono/ENS-kandinsky-monographie.html>.
- [137] Bruno Moysan. *Par-delà le beau et le laid. Enquête sur les valeurs de l'art*, chapter La virtuosité, pages 177–188. Presses universitaires de Rennes, 2014. Sous la direction de Nathalie Heinich, Jean-Marie Schaeffer et Carole Talon-Hugon.
- [138] John Von Neumann. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, 1966.
- [139] Friedrich Nietzsche. *Humain, trop humain, I*. Folio essais, Gallimard, 1968. Tr. Robert Rovini, édition originale, 1878.
- [140] Esben Hallundbæk Østergaard and Kristian Kassow. Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot. *Autonomous Robots*, Vol. 21(Num. 2) :165–183, 2006.
- [141] Erwin Panofsky. *Perspective as symbolic form*. Zone books, New York, 1991. Tr. Christopher S. Wood.
- [142] Blaise Pascal. *De l'autorité en matière de philosophie*, chapter De l'esprit géométrique, pages 46–82. Félix Alcan, éditeur, 1886. Écrit vers 1658. <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5496421v/f55.image>.
- [143] Frédéric Patras. Les traits du continu mathématique. *Espaces Temps, les Cahiers*, pages 87–96, 2003. https://www.persee.fr/doc/espac_0339-3267_2003_num_82_1_4223.
- [144] Platon. *Le banquet*. Garnier Flammarion, 1964. Tr. Émile Chambry.
- [145] Platon. *Phédon*. Garnier Flammarion, 1965. Tr. Émile Chambry.

- [146] Platon. *Hippias majeur*. Garnier Flammarion, 1967. Tr. Émile Chambry.
- [147] Platon. *Protagoras*. Garnier Flammarion, 1967. Tr. Émile Chambry.
- [148] Platon. *Timée*. Garnier Flammarion, 1969. Tr. Émile Chambry.
- [149] Henri Poincaré. *La science et l'hypothèse*. Édition du groupe «Ebooks libres et gratuits», 1902. http://cpge-carnot.fr/Carnot_CG_theme_files/Poincare%20science%20et%20hypothese%20pdf.pdf.
- [150] Karl Popper. *Les deux problèmes fondamentaux de la théorie des sciences*. Hermann Éditions, 1999. Première édition, 1979 (livre rédigé entre 1930 et 1933).
- [151] Ilya Prigorine. *Les lois du chaos*. Champs Flammarion, 1994. Conférences de 1992 à l'université de Milan.
- [152] Ilya Prigorine. *La fin des certitudes*. Éditions Odile Jacob, 1996.
- [153] Ilya Prigorine and Isabelle Stengers. *Entre le temps et l'éternité*. Flammarion, 1998. Première édition, 1988.
- [154] Serge Proulx. Heinz von Foerster (1911-2002). Le Père de la seconde cybernétique. *Hermès*, (Num. 37) :253–260, 2003.
- [155] Przemyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmeyer. *The algorithmic beauty of plants*. Springer - Verlag, 2004 (1^{ère} édition 1990). <http://algorithmicbotany.org/papers/abop/abop.pdf>.
- [156] Zayer Rhaleb, Rössl Christian, Zachi Karni, and Seidel Hans-Peter. Harmonic guidance for surface deformation. In M. Alexa and J. Marks, editors, *Proceedings of the EUROGRAPHICS 2005*, 2005.
- [157] Marie-José Rodriguez. Marcel Duchamp. La peinture, même. Dossiers pédagogiques du Centre Pompidou, 2014. http://mediation.centrepompidou.fr/education/ressources/ENS-Duchamp_peinture/.
- [158] David Rokeby. *Esthétique des arts médiatiques. Interfaces et sensorialité*, chapter Construire l'expérience : l'interface comme contenu, pages 91–114. Presses de l'Université du Québec, 2003.
- [159] Jean-Jacques Rousseau. *Essai sur l'origine des langues (œuvre posthume, 1781)*. A. Belin, Paris, 1817.
- [160] Jean-Jacques Rousseau. *Discours sur les Sciences et les Arts (1750)*. Les Échos du Maquis, 2011.
- [161] Jacques Rouxel. *Les Shadoks*. AAA. Saison un (Bu) 1968, saison deux (Zo) 1969, saison trois (Meu) 1973, saison quatre (BuGa) 2000.

- [162] Carlo Rovelli. *Images de la Physique*, chapter De la gravitation quantique à boucles, pages 35–43. CNRS, 2011. http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP2011/06_Rovelli.pdf.
- [163] Carlo Rovelli. *Et si le temps n'existait pas ? Un peu de science subversive*. Dunod. Quai des sciences, 2012.
- [164] Carlo Rovelli. *L'ordre du temps*. Flammarion, 2018. Tr. Sophie Lem.
- [165] Ferdinand de Saussure. *Cours de linguistique générale*. Payot, 1995. (Édition originale, 1916).
- [166] Jean-Marie Schaeffer. *Les célibataires de l'art*. Gallimard, 1996.
- [167] Jean-Marie Schaeffer. *Par-delà le beau et le laid. Enquête sur les valeurs de l'art*, chapter Le plaisir, pages 105–115. Presses universitaires de Rennes, 2014. Sous la direction de Nathalie Heinich, Jean-Marie Schaeffer et Carole Talon-Hugon.
- [168] Thomas Schlessler and Jacqueline Lalouette. La Vierge corrigeant l'enfant Jésus devant trois témoins (1926) de Max Ernst. *Sociétés & Représentations 1*, (Num. 27) :205–214, 2009. www.cairn.info/revue-societes-et-representations-2009-1-page-205.htm.
- [169] Karl Sims. Evolving virtual creatures. In *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics*, pages 15–22, 1994. New York, USA. ACM.
- [170] Yves Sirois. Les mystères de la matière. Particule de Dieu : 2 ans après sa découverte, le boson de Higgs livre quelques secrets mais en recèle encore de nombreux. *Atlantico*, 5 juillet 2014. (Propos recueillis par Gilles Boutin) <http://www.atlantico.fr/decryptage/particule-dieu-2-ans-apres-decouverte-boson-higgs-livre-quelques-secrets-mais-en-recele-encore-nombreux-yves-sirois-1652251.html>.
- [171] Lee Smolin. *Rien ne va plus en Physique ! L'échec de la théorie des cordes*. Dunod, 2007. (Édition originale, 2006).
- [172] Rebecca Solnit. *L'art de marcher*. Babel. Actes sud, 2002. Tr. Oristelle Bonis. Édition originale, *Wanderlust : A History of Walking*, 2000.
- [173] Olga Sorkine. Differential representations for mesh processing. *Computer Graphics Forum*, Vol. 25(Num. 4) :789–807, 2006.
- [174] Olga Sorkine and Marc Alexa. As-rigid-as-possible surface modeling. In *Proceedings of EUROGRAPHICS/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing*, pages 109–116, 2007.

- [175] Kenneth O. Stanley and Risto Miikkulainen. Evolving neural networks through augmenting topologies. *Evolutionary Computation*, Vol. 2(Num. 10) :99–127, 2002. Massachusetts Institute of Technology. <http://nn.cs.utexas.edu/downloads/papers/stanley.ec02.pdf>.
- [176] Carole Talon-Hugo. *Par-delà le beau et le laid. Enquête sur les valeurs de l'art*, chapter La moralité, pages 57–71. Presses universitaires de Rennes, 2014. Sous la direction de Nathalie Heinich, Jean-Marie Schaeffer et Carole Talon-Hugon.
- [177] René Taton. *Histoire du calcul*. Presse Universitaire de France, Paris, que-sais-je edition, 1961.
- [178] René Taton. *Histoire des sciences. Tome III. La science contemporaine. Volume 2. Le XX^{ème} siècle, années 1900 - 1960*. Quadrige, Presse Universitaire de France, 1995 (1^{ère} édition 1964).
- [179] Bérengère Thirioux, Gérard Jorland, Michel Bret, Marie-Hélène Tramus, and Alain Berthoz. Walking on a line : A motor paradigm using rotation and reflection symmetry to study mental body transformations. *Brain and Cognition*, (Num. 70) :191–200, 2009.
- [180] René Thom. *Esquisse d'une Sémiophysique*. InterEditions, Paris, 1988.
- [181] Marie-Hélène Tramus. Les artistes et la réalité virtuelle, des parcours croisés. *Intellectica*, Vol. 1(Num. 45) :129–142, 2007.
- [182] Robert Vallée. *Seconde cybernétique et complexité. Rencontres avec Heinz von Foerster*, chapter Rencontre avec Heinz von Foerster : des «Eigen-Values» à la remise d'une médaille d'or, pages 62–70. L'Harmattan, 2006.
- [183] Nathan Whitehead and Alex Fit-Florea. Precision & performance : Floating point and IEEE 754 compliance for NVIDIA GPUs. *NVIDIA corp., California*, 2011.
- [184] Benjamin Lee Whorf. *Language, thought, and reality*, chapter Language, mind, and reality (1941), pages 246–270. The M.I.T. Press, 1978.
- [185] Norbert Wiener. *Cybernétique et société. L'usage humain des êtres humains*. Paris, Points, 2014. Première édition 1950, seconde édition 1954.
- [186] Norbert Wiener. *La cybernétique*. Éditions du Seuil, 2014. Tr. Ronan Le Roux, Robert Vallée et Nicole Vallée-Lévi (Édition originale, 1948).
- [187] Hervé Zwirn. *Les limites de la connaissance*. Éditions Odile Jacob, 2000.
- [188] Victor Zykov, Andrew Chan, and Hod Lipson. Molecubes : An Open-Source Modular Robotics Kit. In *IROS-2007 Self-Reconfigurable Robotics Workshop*, 2007.