



**HAL**  
open science

# Matière en acte : les rapports entre conception et matérialité dans la production matérielle numérique

Ianis Lallemand

► **To cite this version:**

Ianis Lallemand. Matière en acte: les rapports entre conception et matérialité dans la production matérielle numérique. Art et histoire de l'art. Université Paris sciences et lettres, 2017. Français. NNT : 2017PSLET004 . tel-03885700

**HAL Id: tel-03885700**

**<https://theses.hal.science/tel-03885700>**

Submitted on 6 Dec 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres  
PSL Research University

Préparée à l'École nationale supérieure des Arts  
Décoratifs

Matière en acte : les rapports entre conception et matérialité  
dans la production matérielle numérique

**École doctorale n°540**

ÉCOLE DOCTORALE TRANSDISCIPLINAIRE LETTRES/SCIENCES

**Spécialité** SACRe, DESIGN

**Soutenue par Ianis LALLEMAND**  
**le 5 décembre 2017**

Dirigée par **Antoine PICON**  
et **Samuel BIANCHINI**

## COMPOSITION DU JURY :

M. BIANCHINI Samuel  
École nationale supérieure des Arts  
Décoratifs, CoDirecteur de thèse

Mme FRANCESCHELLI Sara  
École Normale Supérieure de Lyon,  
Membre du jury

M. PICON Antoine  
École des Ponts ParisTech,  
Directeur de thèse

M. SACK Warren  
Université de Californie à Santa Cruz,  
Président du jury

M. SCHÄFFNER Wolfgang  
Université Humboldt de Berlin,  
Rapporteur

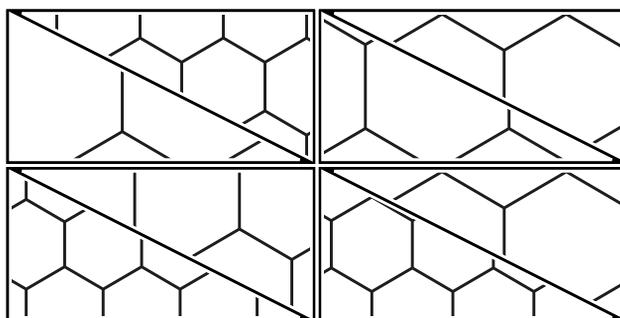
Mme URLBERGER Andrea  
École Nationale Supérieure d'Architecture  
de Toulouse, Rapporteuse

# Matière en acte

## Les rapports entre conception et matérialité dans la production matérielle numérique

Thèse présentée par Ianis Lallemand

Dirigée par M. Antoine Picon et M. Samuel Bianchini



### Thèse de doctorat

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres

Préparée à l'École nationale supérieure des Arts Décoratifs

ED 540 : École doctorale transdisciplinaire Lettres/Sciences

EA 7410 : SACRe — Sciences, Arts, Création, Recherche

Spécialité Design

### Thèse soutenue le 5 décembre 2017 en présence des membres du jury :

M. Samuel Bianchini, Maître de Conférences, École nationale supérieure des Arts Décoratifs

Mme Sara Franceschelli, Maître de Conférences, École Normale Supérieure de Lyon

M. Antoine Picon, Directeur de Recherche, École des Ponts ParisTech

M. Warren Sack, Professeur, Université de Californie à Santa Cruz

M. Wolfgang Schäffner, Professeur, Université Humboldt de Berlin

Mme Andrea Urlberger, Maître-Assistant des ENSA, École Nationale Supérieure  
d'Architecture de Toulouse



# **Matière en acte**

Les rapports entre conception et matérialité  
dans la production matérielle numérique



# Matière en acte

Les rapports entre conception et matérialité  
dans la production matérielle numérique

## Résumé

Alors que l'évolution des pratiques de fabrication numérique dans les champs de l'art, de l'architecture et du design semble pointer vers l'émergence d'une « nouvelle matérialité », marquée par les développements contemporains de la robotique, de la computation et des sciences des matériaux, les discours entourant l'usage des machines à commande numérique restent trop souvent dominés par une compréhension passive de l'idée de matière. Cette thèse se propose d'actualiser la vision des rapports entre conception numérique et matérialité, en développant des schémas productifs ouverts à l'expression de formes d'agentivité matérielle. Cherchant à dépasser l'articulation prescriptive traditionnelle entre conception et fabrication, elle défend l'idée d'une redistribution de l'autorité vers un réseau d'acteurs productifs autonomes. L'argument développé vise avant tout à mettre à jour des méthodologies pratiques ainsi qu'un cadre conceptuel partageables, susceptibles d'être réinvestis par d'autres praticiens. Cinq expérimentations pratiques, reliées par leurs usages prospectifs de la programmation et de la fabrication numérique, en constituent l'ossature empirique. Mobilisant des auteurs comme Gilbert Simondon et Andrew Pickering, le travail de conceptualisation réalisé permet d'opérer un retour réflexif sur ces expériences, et d'en situer les enjeux au regard d'un certain nombre de précédents historiques, tels ceux de la production numérique non standard et de la cybernétique.

## Mots-clés

Conception, fabrication numérique, matérialité, agentivité, code.



# Matter in actuality

The relationship between design and materiality  
within digital material production

## Abstract

Recent developments in digital fabrication practices across the fields of art, architecture and design have inspired the notion of a “new materiality” — a rethinking of our relationship to the physical world in light of the ever-increasing convergence between robotics, computation and materials science. Yet, the very use of computer-controlled machinery remains, more often than not, envisioned in terms of a passive understanding of matter. This thesis aims at offering an updated vision of the relationship between materiality and design, by developing new production schemes allowing for an expression of material agency. Criticizing the traditional idea of a prescriptive, deterministic link between design and fabrication, the proposed argument reframes authority as a shared resource, spread through a network of productive and autonomous agents. The thesis’ main outcomes consist in a set of practical methodologies as well as an encompassing conceptual framework, which may both be reinvested by other practitioners. Informed by and grounded in practice, the research builds on five experiments, adopting a prospective approach towards programming and digital fabrication. Drawing on authors like Gilbert Simondon and Andrew Pickering, the accompanying conceptualization allows for a reflexive discussion of the thesis’ practical developments, while situating them in respect to such historical precedents as non standard production and cybernetics.

## Keywords

Design, digital fabrication, materiality, agency, code.



## Remerciements

Je voudrais adresser avant tout mes plus sincères remerciements à mes directeurs de thèse, Antoine Picon et Samuel Bianchini, pour leur encadrement. Merci pour votre rigueur intellectuelle, vos patientes relectures et conseils, vos remarques — merci pour votre soutien et votre confiance dans les moments de doute qui ont parfois pu marquer ce travail.

Un grand merci aux membres du jury, Sara Franceschelli, Warren Sack, Wolfgang Schäffner et Andrea Urlberger, pour avoir accepté de juger mon travail, ainsi qu'à Sophie Fétro, pour avoir accepté de siéger en tant que membre invité lors de la soutenance.

Je voudrais ensuite remercier chaleureusement les institutions qui ont rendu possible cette recherche. Merci avant tout à EnsadLab, et en particulier à Emmanuel Mahé, pour sa conception ambitieuse et stimulante de la place de la recherche dans les écoles d'art et de design. Merci à Christophe Pornay et Catherine Renoux, pour leur aide précieuse et leur soutien. Merci à Dominique Peysson, pour son engagement dans les rapprochements entre arts et sciences. Merci enfin à Francesca Cozzolino, Lucile Haute et Emanuele Quinz, pour les rencontres et discussions nées des séminaires qu'ils ont organisés ou animés. Merci, Emanuele, pour ta confiance et ton intérêt pour mon travail.

Cette thèse doit bien entendu son existence à celle du programme SACRe. Merci infiniment à Nadeije Laneyrie-Dagen et Emmanuel Mahé d'avoir porté cette formation durant mes années de recherche.

Merci enfin à Nicolas Combes, pour avoir accepté d'accueillir la soutenance de cette thèse à la Gaîté lyrique, ainsi qu'à Anne Sarosy et Clémence Seurat, pour l'avoir organisée.

À l'École nationale supérieure des Arts Décoratifs et à EnsadLab, je souhaite encore remercier Stéphane Degoutin, pour sa gentillesse et ses conseils; Antoine Desjardins, pour sa confiance et les échanges stimulants que nous avons commencés à mettre en place; Henri Foucault, pour son attention portée à mon travail; ainsi que Thierry Fournier, pour sa bienveillance et son soutien.

Merci enfin à mes collègues et amis, étudiants-chercheurs et doctorants d'EnsadLab et du programme SACRe, que je ne peux malheureusement tous citer ici; merci pour toutes les conversations et les moments que nous avons partagés ensemble.

Cette recherche n'aurait pas été la même sans les collaborations développées, à Paris et Turin, avec Olivier Dauchot et l'équipe de digifabTURING.

Merci, Olivier, pour ton accueil amical, ton enthousiasme, et ce que nous sommes parvenus à faire ensemble avec *Manœuvres*.

Un immense merci à toute l'équipe de digifabTURING : Bruno Demasi, pour ta bonne humeur et ton expertise ; Stefano Paradiso, pour tes compétences et ta gentillesse ; Marco Palma et Marco Caprani, pour votre hospitalité, votre humour, et pour m'avoir permis de découvrir Turin en votre compagnie. Merci infiniment, Andrea Graziano et Alessio Erioli, pour votre générosité, votre confiance et votre passion.

Le projet *Unspecified Clay* doit également son succès à la bienveillance de tous ceux qui travaillent (et parfois habitent) au FabLab Torino : je voudrais ainsi remercier en particulier Davide Gomba et Alessandro Squatrito, pour leur intérêt et leur disponibilité. Bruce Sterling, Jasmina Tešanović, notre courte rencontre a été un réel plaisir — je vous suis redevable de l'existence de ce lieu unique qu'est la Casa Jasmina.

Un grand merci à tous ceux que je n'aurais pas encore cités et qui, par leurs conseils, leur confiance ou leur écoute, ont contribué à porter ce travail : Jean-Christophe Beaux, Nina Berezner, Jade Bouchemit, Camille Boulouis, Alice Braggion, Stéphane Buelllet, Alessandro Carabini, Michela Carla Falcone, Alberto Casarotto, Vincent Desclaux, Élie During, Louis Eveillard, Igor Fouletier-Baloste, Klaus Fruchtnis, Akshay Goyal, Pietro Leoni, Alban Leveau-Vallier, Guillaume Logé, Jean-Marc Lévy-Leblond, Michaela Maier, Andrei Minzetanu, Filipe Pais, Gary Oger, Raphaël Raynaud, Chloé Rivière, Nathan Roche, Lucas Ruiz, Lucrezia Russo, Matthieu Saladin, Clara Schlaifer, Pierre Suarez, Chloé Thomas, Pasquale Totaro, Mark Webster.

À Colin, Jean-Marc, Martine, pour votre patience, votre soutien sans faille, et votre affection.

À Marianna, pour m'avoir accompagné, soutenu et supporté pendant ces années — merci, pour cela et tant d'autres choses.





# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>13</b>
1.1	Matérialité et production numérique . . . . .	13
1.2	Problématique . . . . .	21
1.3	Méthodologie . . . . .	27
	a. Recherche par la pratique . . . . .	27
	b. Ancrage disciplinaire . . . . .	31
1.4	Organisation de la thèse . . . . .	33
<b>I</b>	<b>Généralisation de la prescription</b>	<b>41</b>
<b>2</b>	<b>L'invention d'une pensée prescriptive de la conception</b>	<b>43</b>
2.1	Le paradigme notationnel albertien . . . . .	43
2.2	Conception et virtualité du projet architectural . . . . .	46
2.3	Régimes allographique et autographique . . . . .	51
2.4	Conception industrielle et reproductibilité technique . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Le tournant numérique</b>	<b>59</b>
3.1	Les difficultés notationnelles de l'industrie . . . . .	59
3.2	Aux origines de la conception assistée par ordinateur . . . . .	65
3.3	L'intégration CAO/FAO . . . . .	71
3.4	Le pouvoir prescriptif de la conception numérique . . . . .	80
<b>II</b>	<b>Révolutions? De l'identique au variable</b>	<b>85</b>
<b>4</b>	<b>Objectile et variabilité paramétrique</b>	<b>87</b>
4.1	Vers une production non standard : 1993–2003 . . . . .	87
4.2	Objectile . . . . .	92
4.3	Variabilité paramétrique . . . . .	95
4.4	Conception paramétrique . . . . .	105
4.5	Un rendez-vous théorique manqué? . . . . .	107

10 Table des matières

<b>5</b>	<b>Persistence du schéma hylémorphique</b>	<b>113</b>
5.1	Le rôle de la modulation dans la pensée de Gilbert Simondon . . . . .	113
5.2	La critique simondonienne de l'hylémorphisme . . . . .	114
5.3	Forme, matière, potentiel, information . . . . .	116
5.4	La modulation comme opération transductive . . . . .	122
5.5	L'hylémorphisme latent de la production non standard . . . . .	124

**III Vers une sortie du schéma hylémorphique** **129**

<b>6</b>	<b>Partage d'autorité : agentivité matérielle</b>	<b>131</b>
6.1	L'hylémorphisme comme concentration de l'agentivité . . . . .	131
6.2	Agentivité non-humaine et émergence . . . . .	136
6.3	Méthodologie pour une pratique . . . . .	144
<b>7</b>	<b>Expérimentations : notations ouvertes</b>	<b>153</b>
7.1	<i>Gradient</i> . . . . .	153
7.2	<i>Two</i> . . . . .	162
7.3	<i>Computational Ruins</i> . . . . .	172

**IV Production numérique maintenue** **189**

<b>8</b>	<b>La production numérique comme maintenance</b>	<b>191</b>
8.1	De la stabilisation à la maintenance . . . . .	191
8.2	Enjeux pratiques de la maintenance . . . . .	194
8.3	Autopoïese et auto-maintenance . . . . .	205
8.4	Vers une conception de processus de maintenance . . . . .	211
8.5	Machines et organismes . . . . .	216
<b>9</b>	<b><i>Unspecified Clay</i> : production rétroactive</b>	<b>225</b>
9.1	Objectif et contexte de la recherche . . . . .	225
9.2	Dispositif expérimental (hardware) . . . . .	243
9.3	Dispositif expérimental (software) . . . . .	246
a.	Construction et calibration du nuage de points . . . . .	250
b.	Génération des zones de déposition initiales . . . . .	257
c.	Génération des trajectoires de déposition . . . . .	258
d.	Calcul rétroactif des zones de déposition . . . . .	265
e.	Distribution sélective du volume total d'argile déposé . . . . .	269
f.	Itération . . . . .	273
9.4	Résultats expérimentaux et discussion . . . . .	273

<b>V</b>	<b>Production participative</b>	<b>287</b>
10	<b>De la conception à la participation</b>	<b>289</b>
10.1	Vers une production participative . . . . .	289
10.2	Notion de dispositif . . . . .	299
10.3	Auto-maintenance et œuvres praticables . . . . .	303
10.4	Gordon Pask : environnements réactifs . . . . .	310
10.5	Contrôle et conversation . . . . .	321
11	<b>Concevoir des dispositifs conversationnels</b>	<b>327</b>
11.1	Méthodes numériques . . . . .	327
11.2	Méthodes analogiques . . . . .	338
11.3	Deux objectifs pratiques . . . . .	364
11.4	Vers des dispositifs numériques « intelligents » ? . . . . .	365
11.5	Maintenance et auto-organisation matérielle . . . . .	374
12	<b><i>Manœuvres</i> : programmation matérielle</b>	<b>385</b>
12.1	Contexte du projet et intention artistique . . . . .	385
12.2	Expérimentations . . . . .	395
a.	Choix des directions expérimentales . . . . .	399
b.	Prototypage des marcheurs : impression bi-matériaux . . . . .	402
c.	Prototypage des marcheurs : impression mono-matériau . . . . .	409
d.	Révision des prototypes de marcheurs . . . . .	415
e.	Développement du dispositif de vibration . . . . .	416
12.3	Production du dispositif final . . . . .	419
12.4	Expérimentation publique et discussion . . . . .	429
13	<b>Conclusion</b>	<b>441</b>
13.1	Programmations . . . . .	441
13.2	Pour une conception réflexive . . . . .	444
	<b>Bibliographie</b>	<b>453</b>
	<b>Index des notions</b>	<b>479</b>
	<b>Index des noms propres</b>	<b>485</b>



## Chapitre 1

# Introduction

### 1.1 Matérialité et production numérique

*Just press print* : ce titre d'un article consacré aux technologies de fabrication additive<sup>1</sup>, publié en décembre 2014 dans le magazine *National Geographic*<sup>2</sup>, résonne comme une invitation. Réduit à l'immédiateté d'un unique geste déclencheur, le procédé d'impression 3D paraît s'offrir à tous, porteur d'infinis pouvoirs de mise en forme de la matière. Tout obstacle matériel à la production d'un objet a, semble-t-il, disparu : la distance entre le vœu d'une forme et sa réalisation s'est effacée, cédant la place à la promesse d'une technologie capable d'« imprimer le monde<sup>3</sup> ».

Si l'article ne manque pas de souligner, par la suite, la rugosité technique persistante des procédés d'impression 3D, contrastant avec les attentes parfois démesurées du public<sup>4</sup>, cette image d'une technologie investie de capacités productives sans limites se retrouve fréquemment — au moins à l'état d'horizon — dans les écrits des avocats les plus enthousiastes de la fabrication additive. Décrivant la fabrication d'un objet par stéréolithographie<sup>5</sup>, Chris Anderson note ainsi :

« A bath of liquid resin lies inert, a primordial soup. A laser begins tracing patterns in it, like lightning. Shapes form and emerge from the nutrient bath, conjured as if by magic from nothing<sup>6</sup>. »

---

1. Couramment désignées par le terme d'« impression 3D ».

2. Roff Smith, « Just Press Print », *National Geographic*, vol. 226, n° 6, 2014, p. 112-127.

3. Nous évoquons ici le titre de la récente exposition consacrée par le Centre Pompidou aux procédés de fabrication additive (Marie-Ange Brayer (dir.), *Imprimer le monde*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 15 mars 2017 – 19 juin 2017), Paris / Orléans, Centre Pompidou / HXX, 2017).

4. Roff Smith, « Just Press Print », *op. cit.*, p. 126.

5. Premier procédé de fabrication additive, la stéréolithographie, brevetée en 1984 par Charles W. Hull (Charles W. Hull, « Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography », brevet US4575330 A, en ligne : <https://www.google.com/patents/US4575330>, consulté le 12 juillet 2017), se base sur le principe de la photopolymérisation. La lumière émise par un rayon laser est utilisée pour polymériser un bain de résine liquide, à l'interface d'une plate-forme plongeant légèrement sous la surface du bain. Une fine épaisseur de résine solide est alors fixée sur la plate-forme, correspondant à une « tranche » de l'objet à produire. Le processus est ensuite répété jusqu'à finalisation de l'objet.

6. Chris Anderson, *Makers: The New Industrial Revolution*, New York, Crown Business, 2012, p. 81.

La source du pouvoir de fascination de l'impression 3D se cristallise dans ces quelques lignes, dont le vocabulaire emprunte davantage au registre des forces naturelles — et des récits de création du monde — qu'à celui de la description technique. Investie d'un pouvoir illimité de mise en forme de la matière, la fabrication additive semble placer l'homme dans une position de démiurge<sup>7</sup>, lui conférant la capacité de créer toute forme. La possibilité d'une démocratisation et d'un réinvestissement local des moyens de production, sujet central du livre d'Anderson, s'avère finalement secondaire par rapport à la promesse de donner immédiatement corps à toute idée, quelle qu'elle soit — de vaincre, une fois pour toute, « la résistance [et] l'opiniâtreté de la matière<sup>8</sup> », dans l'imédiateté d'un fonctionnement technique confinant à la magie.

Écrit sous couvert de « licence poétique<sup>9</sup> », le récit d'Anderson énonce pourtant avec précision l'ambition fondatrice de la fabrication additive — et, comme nous le verrons, des technologies de fabrication numérique en général. Derrière la « magie » du processus d'impression 3D se cache en effet une longue chaîne de développements techniques, répondant au projet de pouvoir matérialiser tout « dessin » numérique, quel qu'il soit, en réalité concrète. Ce point de fonctionnement idéal, où toute distance entre idée et matière se trouverait abolie, transparait déjà, selon Anderson, dans le fonctionnement des machines aujourd'hui disponibles :

« We can imagine something, draw it on a computer, and a machine can make it real. We can push a button and an object will appear (eventually). As Arthur C. Clarke put it, “any sufficiently advanced technology is indistinguishable from magic.” This is getting close<sup>10</sup>. »

Dans le texte de Chris Anderson comme dans d'autres, la mise en avant de cet horizon idéal au détriment de la réalité concrète, imparfaite, des processus techniques actuels, signale l'existence d'un rapport ambigu à la matérialité des artefacts produits, ici et maintenant, par l'impression 3D. Cette présentation idéalisée de la fabrication additive identifie en effet, d'un côté, la possibilité d'une production d'objets *matériels* comme source fondamentale du caractère

---

7. Rappelons à ce titre que le terme « démiurge » provient du grec *demiourgos*, signifiant, entre autres, « artisan » ([Anon.], « Démiurge », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/demiurge>, consulté le 11 octobre 2017).

8. Selon la formule utilisée par l'ingénieur et architecte François Blondel dans son *Art de jeter les bombes* (François Blondel, *L'art de jeter les bombes*, Paris, l'auteur et Nicolas Langlois, 1683, p. 434, cité dans Antoine Picon, « Imaginaires de l'efficacité, pensée technique et rationalisation », *Réseaux*, vol. 109, n° 5, 2001, p. 29).

9. Chris Anderson, *Makers: The New Industrial Revolution*, *op. cit.*, p. 81. Notre traduction.

10. *Ibid.*, p. 82.

« magique » de la technologie, expliquant son pouvoir de fascination : directement appréciables par les sens, les objets créés par impression 3D permettent de saisir l'impact des profondes transformations de la matérialité à l'œuvre dans nos sociétés contemporaines, là où d'autres manifestations de ces transformations, comme celles induites par les réseaux de communication électroniques, échappent à toute possibilité d'appréhension directe<sup>11</sup>. Mais d'un autre côté, la matérialité de l'objet imprimé en 3D semble ne rien ajouter au « dessin » (c'est-à-dire au fichier numérique) transmis à la machine : les qualités proprement matérielles de l'objet, sa texture ou ses imperfections, restent absentes d'une description idéalisée de la production comme réalisation d'une *forme*. Dans une vision comme celle proposée par Anderson, la matière, si elle vient effectivement donner sa substance à l'objet, n'est pas considérée comme « génératrice » : l'objet est exclusivement défini par sa géométrie, fixée par le dessin, en totale indépendance du matériau qui sera choisi pour le réaliser. La conception technique des machines de fabrication additive semble, de fait, conforter cette compréhension purement formelle de la production numérique : conditionnés sous forme de bobines de fils plastiques, ou de cartouches de résines ou de poudres, les matériaux y sont pensés comme des ressources interchangeables. Le choix du matériau conditionne « en » quoi sera fait l'objet, mais non *comment* il sera fait : pour chaque matériau sélectionné, c'est littéralement le « même » objet, c'est-à-dire la même forme (dans l'acception géométrique, « dessinée » du terme), qui sera produite par la machine<sup>12</sup>.

Présente en creux dans la plupart des discours et pratiques contemporains liés à la fabrication numérique, cette vision formelle de la production, trahissant une compréhension à la fois *abstraite* et *passive* de la notion de matière<sup>13</sup>, se trouve néanmoins remise en cause par un nombre croissant d'expérimentations en art, design et architecture. Depuis approximativement une dizaine d'années, divers projets développent en effet une approche de la fabrication numérique où la matière, loin de se comporter comme une « soupe primitive » inerte, exprime des comportements émergents au cours de l'étape de fabri-

---

11. Comme le note Anderson : « la révolution numérique s'est aujourd'hui étendue à l'atelier, le repaire des Vrais Trucs, et c'est là, finalement, que son impact pourrait être le plus profond » (*Ibid.*, p. 13, notre traduction).

12. Le concept des « librairies d'objets à télécharger », exemplifié notamment par la célèbre plate-forme Thingiverse (<https://www.thingiverse.com>, consulté le 12 juillet 2017), s'avère caractéristique d'une telle vision. La mise à disposition en ligne d'une vaste collection de modèles 3D, de fonction décorative ou utilitaire, suggère qu'il serait un jour possible, plutôt que d'acheter un produit fini, d'en télécharger la spécification pour l'imprimer à domicile sur une machine adéquate. Il serait alors envisageable, suivant ce scénario, de séparer totalement la définition d'un objet du matériau choisi pour le réaliser.

13. Au sens où la matière se trouve réduite aux *catégories* des « recharges » acceptées par la machine, et se contente de « recevoir » passivement une forme géométrique déjà établie.

cation, contribuant ainsi *activement* à définir la forme des artefact produits. Non entièrement contrainte par un « dessin » numérique, la matérialité de ces artefacts suggère la présence d'une forme d'indétermination, impliquant une réévaluation de la position et des attentes de l'opérateur de la machine par rapport au résultat obtenu.

Induits par les propriétés mécaniques, physiques ou chimiques des matériaux mobilisés, les comportements émergents mis à jour dans ces expériences sont parfois volontairement accentués à des fins esthétiques et génératives (comme dans les expérimentations d'impression 3D de céramique du designer Olivier van Herpt<sup>14</sup> (figure 1.1) et de la société Emerging Objects, émanant de l'agence d'architecture Rael San Fratello<sup>15</sup>), mais découlent le plus souvent de l'adoption de processus de fabrication relevant, par nature, d'une forme d'imprévisibilité : on peut citer, à ce titre, le projet Remote Material Deposition (figure 1.2), développé en 2014 par Fabio Gramazio et Matthias Kohler à l'ETH de Zurich, dans lequel un bras robotisé, couplé à un système de vision par ordinateur, cherche à réaliser à « à distance » des structures architecturales, en catapultant des briques d'argiles de sorte à former des agrégats de grande dimension<sup>16</sup>. Loin de se conformer à un donné géométrique défini *a priori* de toute matérialisation, la forme de l'artefact émerge ici dans le cours même de l'opération de fabrication, et l'impossibilité de normaliser totalement cette dernière n'est en aucun cas perçue comme limitante : le comportement dynamique, imprévisible de la matière se trouve au contraire mobilisé comme source d'un nouveau langage esthétique et structurel, révélé — plutôt que contraint — par les capacités de l'outil numérique.

Cette idée de dispositifs de fabrication numérique s'écartant du principe d'une mise en forme « géométrique » de la matière, et cherchant à révéler les tendances morphogénétiques « internes » des matériaux utilisés, se rencontre dès le début des années 2000 dans les machines construites par l'artiste Roxy Paine : dans l'œuvre *Painting Manufacture Unit* (2001, figure 1.3), une machine à commande numérique (*computer numerical control*, ou CNC) à deux axes projette ainsi de la peinture acrylique sur une toile, formant progressivement une série de « stalactites » dans un processus confrontant la tra-

---

14. Voir notamment : <http://oliviervanherpt.com/3d-printing-ceramics> (consulté le 8 juillet 2017).

15. Voir notamment le projet GCODE.Clay (2016) : <http://www.emergingobjects.com/project/gcode-clay> (consulté le 8 juillet 2017).

16. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/276.html> (consulté le 8 juillet 2017). Voir également : Kathrin Dörfler, Sebastian Ernst, Luka Piskorec, Jan Willmann, Volker Helm, Fabio Gramazio et Matthias Kohler, « Remote Material Deposition: Exploration of Reciprocal Digital and Material Computational Capacities », dans Maria Voyatzaki (dir.), *What's the Matter: Materiality and Materialism at the Age of Computation*, Barcelona, ETSAB – UPC, 2014, p. 361–377.



Fig. 1.1 — Olivier van Herpt, 3D Printing Ceramics, 2012–2013 : la modification en cours d'impression de la distance entre la buse d'extrusion et les couches précédemment déposées de pâte de céramique permet d'induire des variations radicales dans la structure de la pièce obtenue (source : <http://oliviervanherpt.com/3d-printing-ceramics>).

jectoire programmée de la machine à la fluidité du matériau ainsi qu'à son temps de séchage. Dans le champ de l'architecture, le développement d'expérimentations matérielles inscrites dans une telle orientation « morphogénétique » semble s'être accru depuis 2010, comme en témoignent le développement de nombreux processus expérimentaux de production robotique — choisissant parfois « consciemment » de faire abstraction « [des] aspects pratiques et [des] contraintes de l'industrie de la construction<sup>17</sup> » — en parallèle d'approches plus productivistes des technologies d'automatisation : le projet Robotic FOAMing<sup>18</sup> (figure 1.4), développé par Marjan Coletti dans le cadre d'un atelier organisé lors de la conférence SmartGeometry 2013, visait par exemple à expérimen-

17. Martin Bechthold et Nathan King, « Design Robotics: Towards Strategic Design Experiments », dans Sigríd Brell-Çokcan et Johannes Braumann (dir.), *Rob|Arch: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*, Vienne, Springer, 2012, p. 118. Notre traduction.

18. <https://vimeo.com/64708234> (consulté le 8 juillet 2017). Voir également : Marjan Coletti, « An Example of [En]coding Neo Materialism: ProtoRobotic FOAMing », dans Liss C. Werner (dir.), *[En]Coding Architecture*, Pittsburgh, Carnegie Mellon University, School of Architecture, 2013, p. 57–65.



Fig. 1.2 — Gramazio & Kohler, Remote Material Deposition, 2014 (source : <https://magaceen.com/en/innovation/digital-building>).

ter un procédé d'étirement robotique de mousse polyuréthane (un matériau d'habitude employé à des fins d'isolation), dans une démarche générative et exploratoire laissant une large place à la dimension esthétique des formes produites par la structuration spontanée du matériau.

La démocratisation récente des technologies de robotique industrielle à six axes (bras robotisés), plus versatiles et personnalisables que les solutions d'usinage « sur table » (fraiseuses à commande numérique, découpeuses laser), et ouvrant ainsi la possibilité d'explorer une plus large gamme de procédés, de matériaux et d'outils, semble avoir favorisé le développement de telles expérimentations dans le champ de l'architecture. Par certains aspects, cependant, les expérimentations actuelles se rapportent directement à des idées introduites dès le début des années 2000 par des théoriciens comme Sanford Kwinter ou Manuel DeLanda, au sortir d'une première décennie de projets numériques souvent ressentis comme « formalistes ». Suivant une direction conceptuelle d'inspiration deleuzienne, Manuel DeLanda appelait ainsi en 2002 à développer une « philosophie du design » allant à l'encontre de « l'idée selon laquelle la forme serait imposée de l'extérieur à un matériau inerte », et impliquant « un certain respect pour les capacités de génération de forme inhérentes à la

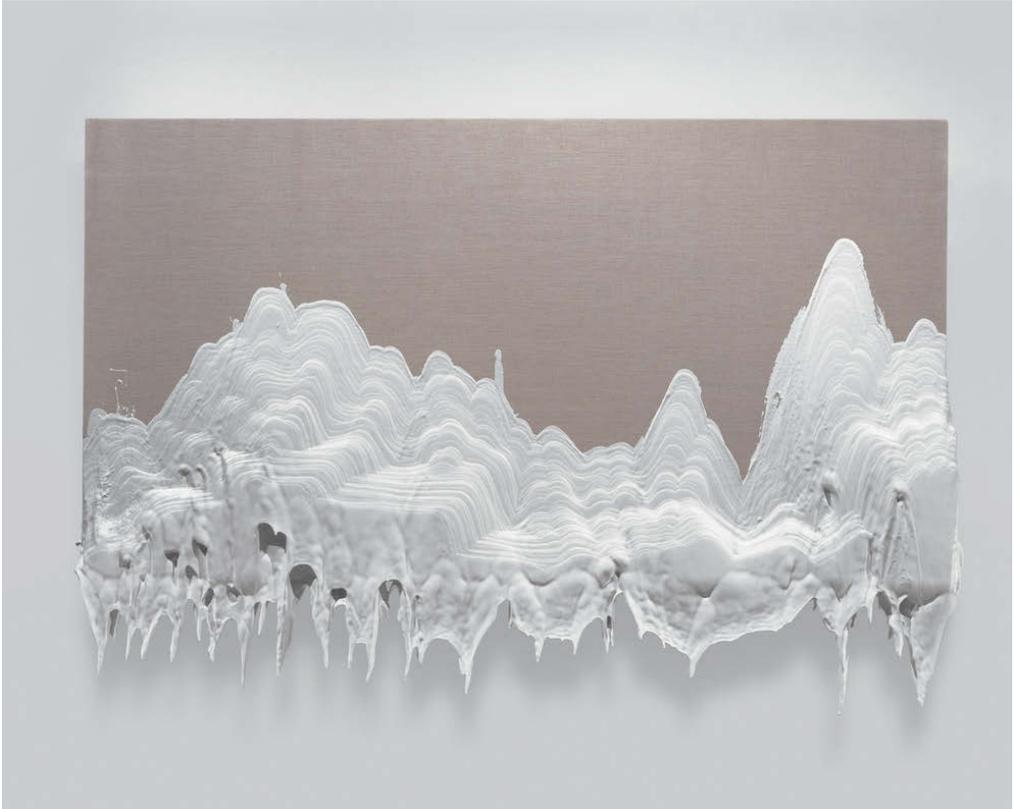


Fig. 1.3 — Roxy Payne, *Painting Manufacture Unit*, 2001 (source : <http://roxypayne.com/machines>).

matière<sup>19</sup> », tandis que Sanford Kwinter soulignait l'urgence de mobiliser la puissance computationnelle des systèmes et réseaux informatiques pour « réinvestir la magie et l'indétermination de la matière », afin d'échapper à l'« aridité » et la « cruauté » d'un monde « réductionniste-mécanique et disciplinaire-électronique<sup>20</sup> ». Ces injonctions théoriques, conceptuellement proches des discours contemporains relatifs au « nouveau matérialisme<sup>21</sup> », apparaissent avec

19. Manuel DeLanda, « Philosophies of Design: The Case of Modeling Software », dans Jaime Salazar (dir.), *Verb Processing*, Barcelona, Actar, 2002, p. 137. Notre traduction.

20. Sanford Kwinter, « The Computational Fallacy », *Thresholds*, n° 26, 2003, p. 91. Notre traduction.

21. Cette expression est couramment employée dans les domaines de la philosophie et des sciences humaines pour indiquer l'émergence d'un intérêt renouvelé pour des pensées et approches d'orientation matérialiste, sensible depuis la fin des années 1990. Sur ces questions, on pourra notamment consulter Diana Coole et Samantha Frost (dir.), *New Materialisms*, Durham, Duke University Press, 2010, ainsi que Iris van der Tuin et Rick Dolphijn (dir.), *New Materialism: Interviews and Cartographies*, London, Open Humanities Press, 2012. Acteur majeur de ce « courant » de pensée, Manuel DeLanda se réfère pour sa part, dès 1996, à l'idée



Fig. 1.4 — Marjan Colletti, *Robotic FOAMing*, 2013 : détail des structures obtenues par étirement de mousse polyuréthane (source : <https://fr.pinterest.com/pin/359302876491545789>).

le recul comme annonciatrices de l'orientation récemment adoptée par les versants les plus expérimentaux de la recherche et de l'éducation architecturales, dont nous avons ici livré un premier aperçu.

Ces nouvelles préoccupations matérielles aujourd'hui exprimées dans les champs de l'art, du design et de l'architecture, s'accompagnent d'importants développements dans le domaine des sciences des matériaux, impulsés en partie par l'augmentation des capacités de fabrication et de simulation offertes par les outils numériques contemporains : un article récemment publié dans *The Economist* révélait ainsi que pour le seul mois de novembre 2015, plus de 100 publications relatives à la conception de nouveaux matériaux ont été présentées dans des revues scientifiques telles qu'*Advanced Materials*, *Nature*, *Nature Physics*, *ACS Nano*, *ACS Applied Materials and Interfaces* et *Journal of Applied Physics*.<sup>22</sup> Loin d'être menées en isolation des champs de l'art, du design et de l'architecture, ces recherches scientifiques relatives à la question des maté-

---

d'un « néo-matérialisme » (Manuel DeLanda, « The Geology of Morals: A Neo-Materialist Interpretation », *Virtual Futures*, vol. 95, 1995).

22. Paul Markillie, « New Materials for Manufacturing », *The Economist*, 5 décembre 2015, en ligne : <http://www.economist.com/technology-quarterly/2015-12-05/new-materials-for-manufacturing> (consulté le 27 juillet 2016).

riaux s'inscrivent souvent aujourd'hui dans une perspective interdisciplinaire, comme en témoignent les approches « hybrides », entre science et design, de laboratoires comme le Self-Assembly Lab<sup>23</sup> et le groupe de recherche Mediated Matter<sup>24</sup>, tous deux basés au MIT. Pour Neri Oxman, directrice du groupe Mediated Matter, la question des matériaux constitue ainsi un point de convergence privilégié entre les problématiques de la science, de la technologie, du design et de l'industrie<sup>25</sup>.

Dans ce contexte où de multiples acteurs et champs de pratiques semblent indiquer l'émergence d'une « nouvelle matérialité<sup>26</sup> », façonnée par les processus techniques de la robotisation, de la computation, et du développement des sciences des matériaux, cette thèse ambitionne de mettre à jour notre vision du rapport à la matière dans le champ des pratiques contemporaines de la fabrication numérique, encore trop dominées par des récits idéalisés de leur propres modalités opératoires. Dans cette perspective, nous chercherons ainsi à développer l'idée d'une compréhension *active* de la notion de matière — dont nous venons ici de jeter les bases à travers l'examen d'un premier ensemble de références conceptuelles et expérimentales — dans le cadre d'une démarche de recherche par la pratique en art et en design.

## 1.2 Problématique

Les technologies de fabrication numérique jouent aujourd'hui un rôle de premier plan dans l'idée d'un retour du « faire » au sein de nos sociétés dites « post-industrielles<sup>27</sup> », retour dont le « mouvement maker », sujet du livre de Chris Anderson cité précédemment, constitue sans doute l'expression la plus audible. Institué par la fondation du magazine *Make*<sup>28</sup> en 2005, et l'organisation, en 2006, de la première « foire des makers » (*Maker Faire*) à San Mateo en Californie, le mouvement maker peut se définir, selon Chris Anderson, par la présence de trois éléments :

« 1. People using digital desktop tools to create designs for new products and prototype them (“digital DIY”).

23. <http://www.selfassemblylab.net> (consulté le 10 juillet 2017).

24. <http://matter.media.mit.edu> (consulté le 10 juillet 2017).

25. Neri Oxman et Jesse Louis Rosenberg, « Material-Based Design Computation: An Inquiry into Digital Simulation of Physical Material Properties as Design Generators », *International Journal of Architectural Computing*, vol. 5, n° 1, 2007, p. 28.

26. Antoine Picon, « Architecture and the Virtual: Towards a New Materiality », *Praxis*, n° 6, 2004, p. 114–121. Notre traduction.

27. Pour une critique de cette notion, voir notamment : Pierre Veltz, *La société hyper-industrielle : Le nouveau capitalisme productif*, Paris, Seuil, 2017.

28. <http://makezine.com> (consulté le 10 juillet 2017).

« 2. A cultural norm to share those designs and collaborate with others in online communities.

« 3. The use of common design file standards that allow anyone, if they desire, to send their designs to commercial manufacturing services to be produced in any number, just as easily as they can fabricate them on their desktop. This radically foreshortens the path from idea to entrepreneurship, just as the Web did in software, information, and content<sup>29</sup>. »

Le mouvement maker est généralement lié à l'idée d'une remise en cause du mode de production industriel, critiqué pour son organisation centralisée, son principe de standardisation, ainsi que sa vision fermée de la propriété intellectuelle. Basé sur des modèles comme ceux de l'*open source*, de l'*open hardware*<sup>30</sup>, des *makerspaces* et des *fablabs*<sup>31</sup>, le making revendique au contraire la possibi-

---

29. Chris Anderson, *Makers: The New Industrial Revolution*, *op. cit.*, p. 21.

30. Le label « open source », créé en 1998, s'applique à tout logiciel dont la licence respecte les critères de la *Open Source Definition*, un document publié par la Open Source Initiative (<https://opensource.org/osd>, consulté le 13 juillet 2017). Parmi les conditions imposées par ce document, on peut notamment mentionner les principes d'accès au code source (le logiciel doit être distribué avec le code informatique, non compilé, régissant son fonctionnement), de libre redistribution (la licence d'un logiciel ne peut exiger des droits d'auteurs en cas d'inclusion du logiciel, sous forme de « composant » dans un logiciel tiers, y compris si celui-ci est vendu), ainsi que la possibilité de produire et de distribuer des versions dérivées (modifiées) du logiciel sous les mêmes conditions que sa licence originale. La qualification d'« open hardware » étend les principes de l'open source à des objets physiques, comme par exemple la carte programmable Arduino (<https://www.arduino.cc>, consulté le 13 juillet 2017), ce qui implique, notamment, que les plans de conception de ces objets, où les schémas de leurs circuits imprimés, soient librement accessibles. L'usage du terme est aujourd'hui soumis à la validation de la *Open Source Hardware Definition* (<https://www.oshwa.org/definition>, consulté le 13 juillet). Le concept d'open source s'inspire de la notion plus ancienne de « logiciel libre » (*free software*), créée en 1984 par Richard Stallman, avec lequel il partage certains critères fondamentaux (comme la condition d'accès au code source). Mais il devrait être noté que les philosophies sous-tendant open source et logiciel libre sont différentes; sur ce point, voir notamment : <https://www.gnu.org/philosophy/categories.html> (consulté le 13 juillet 2017).

31. Les makerspaces sont des ateliers communautaires de fabrication numérique, fonctionnant le plus souvent sur un mode associatif : en échange d'une cotisation annuelle, leurs adhérents accèdent à un ensemble de machines de fabrication numérique, ainsi qu'à l'expertise mise en commun par l'ensemble des membres du lieu. Le concept de FabLab (contraction de l'anglais *fabrication laboratory*, ou « laboratoire de fabrication »), inventé par Neil Gershenfeld au MIT au début des années 2000, renvoie concrètement à un type particulier de makerspaces, ayant souscrits à une charte définie par le MIT (<http://fab.cba.mit.edu/about/charter>, consulté le 10 mai 2017). Pour diverses raisons (commerciales ou éthiques), un certain nombre de makerspaces choisissent de ne pas valider cette charte; dans les faits, cependant, la popularité du terme « FabLab » fait que ces lieux sont souvent qualifiés de FabLabs par les médias. Sur les FabLabs, voir notamment : Neil Gershenfeld, *Fab: The Coming Revolution on Your Desktop—From Personal Computers to Personal Fabrication*, New York, Basic Books, 2005.

lité d'une production locale, décentralisée, flexible, personnalisable et ouverte. Aujourd'hui en pleine expansion, le mouvement *maker* s'avère tributaire de deux principaux précédents historiques : l'essor d'une culture du « *do it yourself* » (DIY), élevée au rang de véritable esthétique depuis le phénomène des « *fanzines* » (publications indépendantes et auto-éditées), apparu dans le mouvement *punk* à partir de la fin des années 70<sup>32</sup>, ainsi qu'une première vague de démocratisation des outils de fabrication numérique, survenue au cours des années 90. Cette seconde influence mérite ici d'être discutée plus en détails.

Le *making* renvoie en effet directement à la notion d'« artisanat numérique », introduite à partir du milieu des années 90 pour qualifier l'idée d'un retour à une forme d'engagement direct avec la matière dans l'usage de technologies de production numérique, rompant avec la distance introduite par le mode de production industriel : à mesure que les machines à commande numérique se généralisent, leur intégration toujours plus fluide aux flux de travail informatisés fait naître l'idée d'une abolition de l'écart entre le travail « sur écran » et sa réalisation matérielle, suggérant la possibilité d'une nouvelle alliance entre esprit et main, évocatrice des formes de production artisanales. D'abord portée, dans les années 90, par l'usage de procédés de fabrication soustractive (découpe laser, fraisage numérique), cette idée reste présente dans les visions idéalisées de la fabrication additive rencontrées aujourd'hui chez certains « *makers* » : en offrant la possibilité de matérialiser directement tout type de formes, quelle que soit leur complexité — là où des procédés comme la découpe laser restent limités à des formes planes —, l'impression 3D semble annoncer une équivalence totale entre les domaines numérique et matériel. Les solutions de numérisation 3D, de plus en plus accessibles, contribuent à renforcer cette idée : passage de l'ordinateur à l'objet par impression, et de l'objet à l'ordinateur par numérisation, c'est aujourd'hui un processus de traduction totalement réversible du numérique à la matière qui semble se mettre en place, comme si les formes manifestées dans chacun de ces domaines ne constituaient que deux facettes d'un même jeu de données. Cette perspective d'une unification des domaines numérique et matériel sous l'angle de la donnée, porteuse des tendances centrales du mouvement *maker* (décentralisation, partage...), se rencontrait déjà dans les discours consacrés à l'artisanat numérique : avant le *making*, certains auteurs qualifiaient ainsi les artisans numériques d'« artisans de l'information<sup>33</sup> ».

En se référant à la qualité primitive du « faire », *making* et artisanat numérique récusent tous deux une forme d'articulation moderne du régime produc-

---

32. Teal Triggs, « Scissors and Glue: Punk Fanzine and the Creation of a DIY Aesthetic », *Journal of Design History*, vol. 19, n° 1, 2006, p. 69.

33. Branko Koralevic, « Information Master Builders », dans *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Abingdon, Taylor & Francis, 2004, p. 88-96. Notre traduction.

tif, liée à l'invention de la notion de *conception*. Introduite pour la première fois, dans son sens moderne, dans le *De re aedificatoria* d'Alberti<sup>34</sup>, la conception rend d'abord compte d'un processus de *division* de la production en deux étapes de travail successives : une phase de travail intellectuel, visant à spécifier les propriétés de l'objet à produire (par exemple à l'aide de plans ou de tracés architecturaux), et une phase de travail matériel, visant à transformer fidèlement ces spécifications en une réalité physique. Active sur les plans conceptuel, social et méthodologique, cette division du processus productif distingue ainsi les disciplines du *projet* (architecture, ingénierie, design industriel...), c'est-à-dire les disciplines de conception (*design disciplines*), du champ de la *fabrication* : là où l'artisan prend en charge lui-même la réalisation matérielle des artefacts qu'il imagine, le concepteur la délègue à d'autres acteurs, humains mais aussi mécaniques (machines de fabrication).

Comme le rappelle Antoine Picon, la notion même de conception, par sa nature, présuppose l'existence d'une distance insuppressible entre le monde intellectuel du projet et le monde de la matière<sup>35</sup>. Dans ce contexte, la conception se définit précisément comme le vecteur garantissant le passage du travail intellectuel au domaine matériel de la fabrication, tout en revendiquant l'exclusivité absolue de cette fonction médiatrice : la conception se pose en effet comme la seule opération de valeur réelle assurant le passage de l'idée à l'artefact construit, reléguant l'opération de fabrication, quoi qu'indispensable à la production d'une réalité matérielle, à la simple *exécution* d'une idée déjà intégralement formalisée. C'est ainsi pour s'assurer de l'exclusivité de son pouvoir médiateur que la conception trouve à s'inscrire, chez Alberti et plus encore dans le développement ultérieur de la production industrielle, dans un rapport prescriptif à la fabrication, visant à circonscrire le comportement de la matière (et des « fabricants ») à l'idée originale du concepteur.

En associant les technologies de fabrication numérique à l'idéal d'un passage direct de l'idée à la matière, les récits du making et de l'artisanat numérique semblent annoncer la fin des médiations caractéristiques des régimes productifs modernes. Mais à bien y regarder, l'immédiateté perçue de l'usinage à commande numérique, ou de l'impression 3D, s'avère davantage liée à une fluidification et une « compression » des schémas productifs existants qu'à leur nette remise en cause. Comme le notait déjà Antoine Picon en 2004 : « [l]a production matérielle assistée par ordinateur semble abolir la distance entre la représentation et la matérialité (...). Mais cette suppression est en fait une illusion provoquée par l'élimination de la séquence complexe d'interfaces qui,

34. Alain Findeli et Rabah Bousbaci, « L'éclipse de l'objet dans les théories du projet en design », *The Design Journal*, vol. 8, n° 3, 2005, p. 41.

35. Antoine Picon, « Architecture and the Virtual: Towards a New Materiality », *op. cit.*, p. 120.

jusqu'ici, s'avérait nécessaire pour que la conception puisse combler cette distance<sup>36</sup> ». De fait, l'examen concret du processus de production d'un objet imprimé en 3D révèle un flux de travail adéquatement compréhensible en termes d'une organisation productive moderne, posant une séparation et une articulation prescriptives strictes entre conception et fabrication : à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D, l'utilisateur de la machine produit un fichier contenant une spécification géométrique complète de l'objet à produire (phase de conception), que des processus automatisés prennent ensuite en charge afin de réaliser un artefact matériel en parfaite conformité avec l'intention du concepteur (phase de fabrication). Analysé sous cet angle, le « rapprochement » avec la matière vanté par le making ou l'artisanat numérique se pose finalement comme la conséquence d'un pouvoir prescriptif *accru* accordé à l'étape de conception, implémenté par le développement de solutions techniques permettant le passage continu, intégré, des spécifications du concepteur aux instructions de pilotage de la machine : loin d'annoncer le retour vers une forme d'artisanat, la fabrication numérique semble ainsi proposer, à cet égard, une réalisation technique aboutie de l'idéal prescriptif de la production moderne.

La fabrication numérique s'inscrit de fait dans une longue histoire de développement de technologies industrielles visant à réaliser le projet d'une articulation prescriptive entre conception et fabrication, et d'un passage continu, prévisible, entre ces deux moments de la production d'un objet. À partir de la fin des années 40, les secteurs industriels aéronautique et automobile s'engagent ainsi, d'une part, dans un processus d'augmentation des capacités représentationnelles des techniques de conception, conduisant au développement des outils de conception assistée par ordinateur (CAO) ; d'autre part, les nouvelles technologies de représentation ainsi développées sont rapidement mises à profit pour piloter les machines à commande numérique déjà disponibles dans les usines, et acquièrent alors des capacités opératoires. Ce processus conduit dans les années 80 au développement d'un mode de production rendant théoriquement possible le passage continu « du fichier à l'usine » (*file to factory*), dont l'impression 3D (inventée en 1984), constitue à bien des égards l'incarnation la plus pure. Là où les solutions de fabrication soustractive ont historiquement été développées pour prendre en charge la production de prototypes industriels, l'impression 3D — en dépit de la notion de « prototypage rapide » à laquelle elle se trouve parfois associée<sup>37</sup> — promet en effet, tendanciellement, la disparition du prototype : contrairement aux procédés soustractifs, nécessitant encore d'évaluer empiriquement le comportement physique des matériaux en

---

36. *Ibid.*, p. 120. Notre traduction.

37. Xue Yan et P Gu, « A Review of Rapid Prototyping Technologies and Systems », *Computer-Aided Design*, vol. 28, n° 4, 1996, p. 307-318.

regard de la forme à produire<sup>38</sup>, la fabrication additive se présente comme un procédé éminemment prévisible, apte à prendre en charge la production de tout objet, pourvu que sa forme respecte certaines contraintes géométriques<sup>39</sup>. Tout travail de conception suffisamment rigoureux se trouve, dès lors, susceptible d'être directement mobilisé pour engager la production de pièces *finales*, sans passer par l'étape intermédiaire de la réalisation de prototypes — *just press print*.

Ces remarques, rappelant l'héritage d'une pensée de la *conception* dans le développement des technologies de fabrication numérique, soulignent la nature idéalisée des récits qui, à l'instar du *making*, inscrivent ces technologies dans la perspective d'un retour du « faire » : par la nature même de son processus historique de consolidation, la chaîne de production numérique atteste de fait, toute entière, d'une rupture irrévocable avec les formes de production artisanales. Il apparaît dès lors incontournable, à notre sens, d'adresser explicitement les problématiques liées à la conception dans toute analyse des modes de production numériques ; et des idiomes comme le *making*, négligeant ces problématiques, s'avèrent à cet égard insuffisants pour comprendre les rapports de production dans lesquels trouvent à s'inscrire les technologies de fabrication numérique contemporaines.

S'il s'avère donc indispensable de mener nos recherches en conservant à l'esprit les notions de conception et de fabrication, le développement récent d'expérimentations cherchant à dépasser une vision passive de la matière suggère, néanmoins, qu'il serait tout à fait envisageable de rejeter le rapport *hiérarchique* traditionnellement établi entre ces étapes productives. En d'autres termes, si toute forme de production numérique trouve à s'inscrire, par nature, dans le cadre d'une distance instituée entre idée et matière, la possibilité semble ouverte de considérer d'autres manières de « combler cette distance » que d'adopter une compréhension classique, prescriptive, de la notion de conception. Sans recourir à la notion ambiguë d'artisanat, d'autres possibilités de « sortie » des schémas productifs modernes paraissent ainsi envisageables ; et l'idée d'accorder une autonomie accrue aux *agents* impliqués dans la fabrication, d'imaginer une forme de « redistribution de l'autorité » au sein du processus productif, apparaît à cet égard comme une perspective urgente

---

38. Dans le cas du procédé de découpe laser par exemple, le réglage de la puissance du faisceau s'effectue le plus souvent sur la base d'une série de tests réalisés à partir du matériau « réel » à découper, en dépit de la présence d'une série de pré-réglages fournis par le fabricant de la machine.

39. La société d'impression 3D en ligne Shapeways (<https://www.shapeways.com>, consulté le 13 juillet 2017) réalise par exemple une série d'analyses automatiques des pièces mises en ligne par ses clients, destinées à évaluer leur adéquation au procédé de fabrication sélectionné par ces derniers.

à explorer. Au regard de ces réflexions, notre projet initial de développer une compréhension active de la notion de matière peut désormais être précisé par la problématique suivante :

Peut-on développer un cadre conceptuel et une méthodologie permettant d’appréhender les étapes productives de conception et de fabrication dans une articulation non prescriptive, afin de développer une pratique numérique intégrant une compréhension active de la notion de matière ?

### 1.3 Méthodologie

La présente thèse, réalisée dans le cadre du programme SACRe (Sciences, Arts, Création, Recherche) au sein d’EnsadLab<sup>40</sup>, le laboratoire de l’École nationale supérieure des Arts Décoratifs, dans le cadre du groupe de recherche Reflective Interaction<sup>41</sup>, constitue l’aboutissement de quatre années d’un travail de recherche par la pratique (*practice-based research*). Cette section présente les principaux enjeux méthodologiques liés au développement de notre problématique de recherche dans ce cadre.

#### a. Recherche par la pratique

Émergent dans un ensemble de disciplines telles que l’art, le design et l’architecture, ainsi que la médecine et l’ingénierie, la notion de recherche par la pratique peut se définir, de manière générale, comme une activité de recherche « fondée sur, informée par, et visant à améliorer la pratique<sup>42</sup> ». Ces trois critères permettent de préciser certaines des spécificités propres à la démarche de recherche entreprise dans cette thèse.

En réponse au second critère de cette définition, il nous faut tout d’abord souligner que si cette thèse s’est bien trouvée « informée » par notre propre pratique, inscrite dans les disciplines de l’art et du design, il n’a pas ici été question de mener une recherche *sur* cette pratique : il s’agissait ici bien d’explorer une nouvelle question de recherche *par* la pratique, c’est-à-dire *en pratiquant*. C’est dans ce sens qu’il nous faut également comprendre le premier critère d’une recherche « fondée » sur la pratique : non pas comme un retour sur un ensemble de travaux déjà finalisés, mais comme le développement de nouvelles *expérimentations* destinées à explorer la problématique de recherche par la mise à l’épreuve d’hypothèses, pratiques et conceptuelles — et fournissant ainsi la « matière » d’un travail d’écriture doté d’une portée réflexive et partageable.

40. <http://www.ensadlab.fr> (consulté le 11 juillet 2017).

41. <http://diip.ensadlab.fr> (consulté le 11 juillet 2017).

42. John M. Westfall, James Mold et Lyle Fagnan, « Practice-Based Research—“Blue Highways” on the NIH Roadmap », *Jama*, vol. 297, n° 4, 2007, p. 404. Notre traduction.

Considérons à présent le troisième critère proposé par la définition : l'idée d'une recherche visant à « améliorer » la pratique. Si cette thèse a indéniablement impulsé de nouveaux développements au sein de notre pratique « personnelle », cette notion d'amélioration ne doit pas simplement être considérée en regard du développement d'un travail artistique singulier : il s'agit plutôt ici de souligner l'idée, fondamentale, selon laquelle toute recherche académique doit « améliorer » l'état des connaissances disponibles au sein d'une discipline<sup>43</sup>, en les enrichissant d'une contribution originale et dotée d'une certaine valeur de généralité. Dès lors, l'objectif d'une recherche par la pratique ne se conçoit pas tant comme l'amélioration d'une pratique (celle du chercheur réalisant la recherche) que comme l'amélioration de *la* pratique, autrement dit, des connaissances partagées au sein d'une discipline donnée. Les expérimentations et projets réalisés durant cette thèse entendent ainsi contribuer à l'avancement des connaissances pratiques dans les domaines de l'art et du design, selon des modalités que nous préciserons dans le corps du texte, mais dont nous pouvons à présent souligner deux composantes.

Le premier axe de cette contribution est celui des *moyens*. Si le développement esthétique singulier de nos productions a bien entendu constitué une part essentielle du travail réalisé dans cette thèse, nous avons constamment cherché à opérer une « remontée en généralité » à partir de nos projets, afin de les inscrire dans le cadre de problématiques suffisamment génériques pour être partageables — une condition nécessaire pour pouvoir, véritablement, les envisager en tant que « contributions » de recherche. La documentation et le partage des moyens mobilisés dans nos expérimentations, autrement dit des instruments, flux de travail et méthodes développés et mis en œuvre durant la réalisation de nos expériences, ont ici été investis comme un premier axe à travers lequel

---

43. Cette idée d'« amélioration des connaissances » ne saurait, bien entendu, se résumer à un processus simplement additif : il nous faut également reconnaître, à la lueur de travaux d'épistémologues tels que Karl R. Popper, Thomas S. Kuhn et Imre Lakatos, la possibilité d'instantanés de « remise en cause », de portée plus ou moins large (des « hypothèses auxiliaires » de Lakatos aux « paradigmes » de Kuhn), des savoirs et méthodes établis dans une discipline de recherche donnée (voir notamment Karl R. Popper, *The Logic of Scientific Discovery*, traduction de l'auteur, Londres, Hutchinson, 1959 ; Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, The University of Chicago Press, 1962 ; Imre Lakatos, « Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes », dans Imre Lakatos et Alan Musgrave (dir.), *Criticism and the Growth of Knowledge, Volume 4: Proceedings of the International Colloquium in the Philosophy of Science, London, 1965*, Cambridge, Cambridge University Press, 1970). De telles considérations épistémologiques mériteraient une étude plus approfondie, que nous ne pouvons mener dans le cadre de cette thèse. Pour de premiers éléments d'analyse des spécificités épistémologiques de la recherche par la pratique dans le champ du design, on pourra par exemple consulter : William Gaver, « What Should We Expect from Research Through Design? », *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, ACM, 2012, p. 937-946.

opérer cette remontée en généralité — dans l'optique que d'autres praticiens, confrontés à des problématiques pratiques proches des nôtres, puissent mobiliser nos contributions dans leurs propres recherches. La restitution écrite des enjeux esthétiques explorés par nos projets devait donc, nécessairement, cohabiter avec une documentation concrète des moyens pratiques mobilisés lors des phases de leur production, ainsi que des enjeux et développements techniques accompagnant la mise en œuvre de ces moyens. Cet impératif de transmissibilité et de généralisation de nos résultats a ainsi imposé, dans l'écriture des chapitres dédiés à nos expériences, l'adoption de plusieurs niveaux complémentaires et mêlés de discussion, dans une démarche relevant d'une forme de circulation permanente entre différents points de vue, esthétique, méthodologique et technique, sur les travaux présentés.

Le second type de contribution apporté par cette thèse est d'ordre conceptuel : en lien étroit avec nos expérimentations pratiques, cette thèse visait ainsi à développer un cadre général permettant d'argumenter, d'une part, en faveur du dépassement d'une vision prescriptive de l'articulation entre conception et fabrication, et produisant, d'autre part, des concepts utiles à la mise en œuvre concrète de situations productives inscrites dans une vision active de la notion de matière. Cette composante conceptuelle de notre recherche a été développée, tout au long de ce texte, par la mobilisation de ressources historiques, théoriques et, bien entendu, des connaissances empiriques acquises au cours de nos propres expérimentations. Sans anticiper sur l'exposé des notions et approches développées dans ce cadre, il nous semble utile de livrer ici quelques remarques relatives à la dimension « généralisable » de ces aspects conceptuels de notre travail, ainsi qu'aux modalités de leur articulation avec notre pratique à proprement parler.

Le premier point à souligner réside dans la dimension *génératrice* du travail d'écriture et de conceptualisation entrepris dans cette thèse. Ce point renvoie non seulement au constat d'une évolution de notre propre pratique, opérée « en contact » avec l'écriture, mais également à l'idée selon laquelle ce travail de conceptualisation nous a permis de produire des méthodes formalisées, c'est-à-dire partageables, que pourront potentiellement investir d'autres praticiens pour générer des transformations et développements au sein de leur propre pratique. Cette fonction génératrice des produits « conceptuels » de la recherche par la pratique en art et en design, que William Gaiver identifie comme l'une des spécificités de cette approche<sup>44</sup>, permet de mieux situer le « degré de généralité » visé par les aspects conceptuels de cette thèse : sans se vouloir apodictique, le cadre que nous cherchions à construire devait cependant pouvoir prétendre à une valeur de généralité suffisante en regard des pra-

---

44. *Ibid.*, p. 941.

tiques numériques existantes en art et en design, afin d'être en mesure de jouer un rôle « générateur » pour certaines d'entre elles. Ceci impliquait d'une part — comme nous l'avons déjà souligné — que ces réflexions opèrent une « remontée en généralité » à partir des enjeux pratiques particuliers mis à jours dans nos expériences; d'autre part, notre propos conceptuel devait également chercher à tenir compte d'un certain *état de l'existant*, non seulement en regard de la réalité concrète des technologies contemporaines de conception et de fabrication numériques, mais aussi des discours théoriques portant sur ces technologies. La dernière section de cette introduction, présentant un résumé des différents chapitres constituant notre thèse, permettra de situer les références conceptuelles et historiques à partir desquelles nous avons choisi de développer notre réflexion.

Construit sur l'ensemble de la durée de nos recherches, le cadre conceptuel proposé dans cette thèse a trouvé à se développer dans un processus non linéaire d'interactions entre écriture et pratique; et de même que notre rapport à l'écriture a pu jouer un rôle générateur pour nos expériences, notre pratique a donc assumé, de manière centrale, un rôle générateur pour nos réflexions écrites. Afin d'exposer les arguments auxquels nous sommes parvenus, au cours de ces quatre années de travail, sous la forme la plus claire possible, l'organisation de ce texte n'a toutefois pas cherché à se faire l'image de cette dynamique de la recherche « en train de se faire » : en conséquence, nos expérimentations pratiques ne sont volontairement introduites qu'à partir du chapitre 7, une fois clarifié le cadre conceptuel, historique et méthodologique dans lequel elles trouvent à s'inscrire.

À compter du chapitre 7, les chapitres consacrés à nos projets sont présentés en alternance avec ceux marquant l'avancement du propos conceptuel, et de nombreux renvois et rappels permettent de situer et d'articuler entre eux ces deux composantes de notre recherche. Le format adopté envisage ainsi la notion de discussion « conceptuelle » dans un sens intimement lié au registre de la pratique : comme il apparaîtra à la lecture de ce texte, nous avons en effet mené nos réflexions relatives aux moyens de production numérique dans une attention permanente à la manière dont ces moyens opèrent *concrètement*, au sein d'un cadre pleinement informé par notre rapport à la pratique. Il ne s'agissait pas ici d'« exemplifier » notre propos à l'aide de nos projets, mais bien de construire une réflexion sous un angle d'approche enrichi par nos préoccupations et nos connaissances concrètes de praticien — en d'autres termes, de notre expérience directe des techniques, procédures et modalités de mise en œuvre propres au champ de la production numérique. Cette idée d'une mobilisation de nos connaissances pratiques dans le cadre de nos réflexions conceptuelles, rapidement adoptée comme principe de travail durant cette thèse, nous a permis de poser les bases d'une véritable *pratique* de l'écriture : sans diminuer

l'exigence apportée à la construction de notre propos, nous avons ainsi cherché, dans nos recherches et jusque dans la rédaction de ce texte, à « écrire en praticien ».

### *b. Ancrage disciplinaire*

L'importance de la notion de *conception* dans la construction de notre argument nous incite à préciser les usages faits du terme « design » dans cette thèse. Si, par la nature même de notre pratique — inscrite à la fois dans les champs de l'art et du design —, cette thèse entretient un lien fort avec le design compris en tant que discipline, nous avons cherché à éviter d'utiliser l'anglais « design » lorsqu'il était possible de lui substituer le terme français de « conception ». Plus qu'une simple volonté de « traduction » de notre vocabulaire, ce choix visait avant tout à inscrire les aspects conceptuels développés dans ce texte dans une relation avec la notion de conception, comprise dans un sens générique, plutôt qu'avec le cas particulier de la discipline du design.

En français, le terme « conception » renvoie en effet à une activité dépassant largement le cadre de la seule discipline du design : en se restreignant aux sens pertinents pour cette thèse, ce terme fait ainsi référence, dans son acception générale, à l'action de « [f]ormer ou créer dans son esprit une idée, un projet, une œuvre<sup>45</sup> ». La notion de « disciplines de conception », déjà évoquée plus haut, renvoie donc à un ensemble hétérogène de disciplines incluant certes le design, mais aussi l'architecture, l'ingénierie, ou encore l'art sous certaines formes — autrement dit, toute discipline fondée, dans sa pratique, sur l'exercice d'une *activité de conception*<sup>46</sup> (par opposition, comme nous l'avons vu, à des disciplines comme l'artisanat, relevant d'un engagement « direct » avec la matière).

La première définition ici proposée de la conception en tant qu'activité, relativement large, peut être précisée en considérant ce que la conception *produit* : Paul Ralph et Yair Wand considèrent ainsi que le résultat d'un processus de conception se comprend comme la « spécification d'un objet, émise par un agent afin d'accomplir certains objectifs, dans un environnement donné et à

---

45. [Anon.], « Concevoir », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/concevoir> (consulté le 27 juin 2017).

46. En anglais, « design » peut renvoyer alternativement à la notion de conception, au résultat d'un processus de conception, ou à la discipline du design : pour lever les ambiguïtés liées à ces significations multiples, certains théoriciens contemporains du design, comme Alain Findeli, font parfois usage en anglais du terme de « conception », réintroduisant ainsi une distinction entre activité générique et discipline particulière, semblable à celle existant en français (voir notamment : Alain Findeli, « Searching for Design Research Questions », dans Rosan Chow, Wolfgang Jonas et Gesche Joost (dir.), *Questions, Hypotheses and Conjectures: Discussions on Projects by Early Stage and Senior Design Researchers*, Berlin, iUniverses, 2010, p. 286–303).

partir d'un ensemble de composants élémentaires, en satisfaisant un ensemble de conditions et de contraintes<sup>47</sup> ». La conception renvoie ainsi fondamentalement, comme nous l'avons déjà noté ci-dessus, à une action de *spécification* et de planification des étapes ultérieures de la production — étapes que nous considérerons, dans cette thèse, en nous référant à la notion de *fabrication*, second moment productif articulé au processus de conception.

Notre choix d'aborder la notion de conception sous un angle générique, justifiant l'usage du français « conception » au détriment de l'anglais « design », constitue l'une des spécificités de l'approche suivie dans cette thèse. Tout en développant des expérimentations pratiques visant à s'inscrire dans les champs de l'art et du design, nous serons ainsi amenés à considérer, lors de nos réflexions, des problématiques de conception rattachées aussi bien aux champs de l'art et du design, qu'à ceux de l'architecture et de l'ingénierie. Cet énoncé soulève, immédiatement, la question suivante : peut-on légitimement espérer proposer une conceptualisation générique de processus de conception aussi variés que ceux de chacune de ces disciplines ? Dans la réponse, positive, que nous souhaitons apporter à cette question, réside déjà l'un des premiers arguments clés de cette thèse, que nous résumons ici avant d'en proposer une justification plus détaillée dans le corps du texte.

Sans constituer une discipline en soi, la conception numérique nous paraît en effet renvoyer à une culture partagée d'usages, de méthodologies, d'instruments, voire d'idéologies, actives dans les champs de l'art, du design, de l'architecture et de l'ingénierie, ou plus précisément dans les segments de ces domaines relevant d'une activité de production numérique d'artefacts matériels<sup>48</sup>. Au-delà du processus de conception, cette « culture commune » s'étend en fait à l'ensemble de la chaîne technique de production numérique : ce sont ainsi non seulement les rapports à la conception, mais aussi à la fabrication, et à la manière d'envisager l'articulation entre ces étapes, qui tendent aujourd'hui à s'homogénéiser au sein de la plupart des « disciplines de conception ». C'est en vertu de ce processus de diffusion d'une culture numérique commune que nous pourrions mobiliser, pour les aspects « conceptuels » de cette thèse, des références issues d'autres champs de production matérielle que l'art et le design : nous serons ainsi conduits, notamment, à nous référer fréquemment dans notre discussion au champ de l'architecture. Dans ce cadre, et pour des raisons

---

47. Paul Ralph et Yair Wand, « A Proposal for a Formal Definition of the Design Concept », dans Kalle Lyytinen, Pericles Loucopoulos, John Mylopoulos et Bill Robinson (dir.), *Design Requirements Engineering: A Ten-year Perspective*, Berlin – Heidelberg, Springer, 2009, p. 107. Notre traduction.

48. Nous ne nous référerons donc pas, par exemple, au design en tant que discipline, mais à un ensemble de pratiques de design mobilisant, pour la production d'objets, des processus et moyens de conception et de fabrication numériques.

de commodité d'écriture, nous ferons parfois usage de l'expression « champ de la production numérique » afin de désigner, de manière globale, l'ensemble des disciplines auquel sera susceptible de s'appliquer notre propos.

#### 1.4 Organisation de la thèse

Afin de préciser notre idée de l'existence d'une culture numérique commune au sein du champ contemporain de la production numérique, notre réflexion prendra pour point de départ l'examen de deux moments historiques fondateurs : le développement de la théorie albertienne de la conception architecturale à la Renaissance, et le perfectionnement des technologies de représentation géométrique au sein du secteur industriel lors de la seconde moitié du xx<sup>e</sup> siècle. Ces deux moments, que nous étudierons dans la première partie (chapitres 1 et 2), nous permettront de remonter à l'origine du projet d'une articulation prescriptive entre conception et fabrication, dont nous avons vu, à travers la description faite par Anderson du procédé d'impression 3D, qu'elle continue de guider la perception courante du rapport à la matérialité dans la production numérique contemporaine.

L'architecture jouera un rôle important dans cet exposé : nous montrerons ainsi, dans le chapitre 2, que l'idée d'un rapport prescriptif à la fabrication s'institue historiquement au sein des pratiques de conception architecturale, telles qu'elles se définissent à partir des travaux fondateurs d'Alberti à la Renaissance. Le chapitre 3 nous permettra, par la suite, de souligner l'influence de cet héritage albertien sur les développements ultérieurs de la culture industrielle : nous verrons ainsi qu'en dépit de nombreuses divergences entre leurs rapports à la matérialité, architecture et industrie partagent une approche *notationnelle* de la conception, fondée sur la production de spécifications sous forme de représentations géométriques formalisées (plans), instituées comme les vecteurs de mise en œuvre d'un rapport prescriptif à la fabrication. Cette discussion du mode de production industriel nous permettra alors de situer les conditions d'émergence, historiques et conceptuelles, des chaînes techniques contemporaines de la production numérique.

La seconde partie de notre exposé (chapitres 3 et 4) nous conduira à nouveau à nous tourner vers la discipline architecturale, pour examiner l'une des premières conceptualisations de l'impact des technologies numériques sur le lien entre conception et fabrication : nous nous pencherons ainsi sur la notion de production « non standard », introduite dans les années 90 au cours d'une première vague d'assimilation des technologies de production numérique dans le champ de l'architecture. Constatant les capacités des technologies de fabrication non matricielles (fraisage numérique, découpe laser) à prendre en charge, sans coût supplémentaire, la production de séries d'objets tous différenciés, les concepteurs non standard postulent la possibilité d'une concep-

tion affranchie des limitations liées à l'impératif économique de standardisation. Cet investissement d'un régime de production *variable*, évocateur pour certains d'un mode de production artisanal, s'accompagne du développement d'une nouvelle sensibilité pour la courbure, traduite dans le développement d'architectures et d'objets aux formes lisses et fluides (figure 1.5) : cette recherche formelle, parfois critiquée pour son apparente indifférence aux enjeux tectoniques, est sous-tendue par un discours théorique identifiant le mode de production *file to factory* comme la garantie d'une « faisabilité immédiate » du projet non standard « à toutes les étapes de sa réalisation sur la chaîne numérique<sup>49</sup> ». Dans ses multiples composantes, conceptuelle et pratique, le non standard entend ainsi se positionner comme une remise en cause profonde de la séparation stricte entre conception et fabrication qui, d'Alberti à la production industrielle en série, a dominé l'histoire productive moderne.

Une abondante littérature a été écrite sur le schéma de production non standard<sup>50</sup>, ainsi que sur les capacités de variation ouvertes dans le champ de l'architecture par l'investissement des technologies de production numériques : on pourrait donc s'interroger sur la pertinence de consacrer ici une partie importante de notre discussion à ces éléments. La nécessité d'opérer un retour critique sur le concept de production non standard s'est cependant rapidement imposée dans notre recherche, au regard d'un constat simple : nous nous sommes en effet aperçus qu'il n'existait pas, à notre connaissance, de travaux théoriques récents se proposant de réévaluer les idées introduites au cours des années 90 sous l'angle des nouveaux rapports à la matérialité mis à l'épreuve, depuis quelques années, par les projets expérimentaux d'une nouvelle génération de praticiens numériques. Si des théoriciens comme Mario Carpo n'ont pas manqué de relever la rupture introduite, sur le plan esthétique, entre les formes fracturées et complexes développées dans certaines expérimentations

---

49. Frédéric Migayrou, « Les ordres du non standard », dans *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), Paris, Centre Pompidou, 2003, p. 33.

50. Pour un panorama complet des problématiques, tant pratiques que conceptuelles, associées à la notion de production non standard, on pourra notamment consulter : Branko Koralevic (dir.), *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Abingdon, Taylor & Francis, 2004. Plus récemment, l'ouvrage *The Alphabet and the Algorithm*, publié en 2011 par Mario Carpo, propose une discussion étendue des enjeux conceptuels liés à l'investissement de la notion de variabilité par les concepteurs non standard (Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge, The MIT Press, 2011). Il convient enfin de mentionner le catalogue de l'exposition *Architectures non standard*, organisée au Centre Pompidou en 2003 (Frédéric Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), Paris, Centre Pompidou, 2003). On pourra notamment y consulter, outre divers essais critiques, une série de notices consacrées à l'agence Objectile, dont nous examinerons plus en détails les réalisations dans la section 4.5.

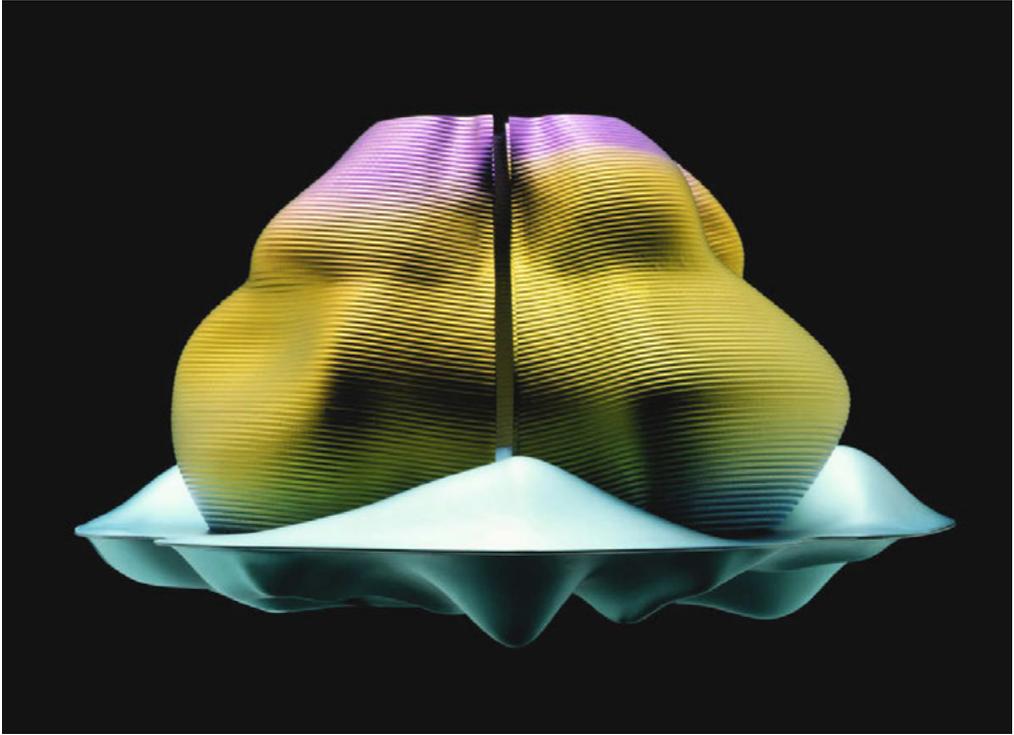


Fig. 1.5 — Greg Lynn FORM, Tea and Coffee Towers, 2003 : série variable de 99 services à thé et café en titane, éditée par Alessi (source : <http://worldbuilding.institute/people/greg-lynn>).

contemporaines, et le vocabulaire lisse et fluide des objets non standard<sup>51</sup>, ces analyses présentent l'inconvénient de se focaliser sur des propriétés stylistiques (au demeurant difficiles à relier à la réalité concrète des procédures de conception mobilisées) au détriment de la question, plus centrale à notre sens, de l'évolution du rapport entre conception et matérialité suggérée par les nouvelles typologies formelles contemporaines.

En mobilisant cette question du rapport à la matérialité comme critère principal d'appréciation des nouvelles expérimentations contemporaines, certains des projets présentés par Mario Carpo comme radicalement en rupture avec les principes du non standard se révèlent, de fait, bien plus compatibles avec ces principes que ce que leur esthétique et leur complexité technique ne semblent suggérer de prime abord. Un projet comme Digital Grottesque (2013, figure 1.6), des architectes Michael Hansmeyer et Benjamin Dillenburger<sup>52</sup>,

51. Mario Carpo, « Breaking the Curve: Big Data and Design », *Artforum*, vol. 52, n° 6, 2014, p. 168–173.

52. [http://www.michael-hansmeyer.com/projects/digital\\_grottesque.html](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/digital_grottesque.html) (consulté le 12 juillet 2017).



Fig. 1.6 — Michael Hansmeyer et Benjamin Dillenburger, Digital Grotesque, 2013 (source : [http://www.michael-hansmeyer.com/projects/digital\\_grotesque.html](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/digital_grotesque.html)).

se rapporte ainsi à un processus *file to factory* classique, tel qu'il était déjà envisagé par les concepteurs non standard : la forme complexe, fragmentée de l'objet est intégralement définie lors de sa conception sur l'ordinateur, et l'étape de fabrication, mobilisant un procédé de fabrication additive à base de sable de silice, se présente comme la simple « réalisation » de cette forme pré-établie. Le seul critère stylistique ne saurait donc, à notre sens, être mobilisé pour fonder l'idée d'une « rupture » contemporaine par rapport au paradigme non standard, et la discussion d'une possible évolution de l'attitude des concepteurs par rapport à la matérialité, telle qu'elle semble s'annoncer dans d'autres exemples d'expérimentations, comme *Robotic FOAMing* ou les machines de Roxy Paine, constitue à notre sens une direction de recherche plus pertinente à cet égard.

Pour nourrir cette idée d'une rupture opérée sur le plan du rapport entre conception et matérialité, et en permettre le déploiement dans nos propres expérimentations, il nous est donc apparu urgent de revisiter, sous un angle critique, le concept de production non standard, d'où il nous semblait qu'émanait

une vision *conservatrice* du rôle de la matière dans les processus de production numérique, latente dans des projets tels que Digital Grotesque.

Cette analyse critique, menée dans le chapitre 4, nous permettra de développer une position contrastant avec la plupart des lectures « canoniques » du mode de production non standard : réfutant l'idée selon laquelle ce régime productif constituerait une remise en cause complète de l'héritage notationnel albertien, nous défendrons à la place une vision de continuité entre les logiques du non standard et l'orientation prescriptive de la production industrielle standardisée. Nous montrerons ainsi qu'en dépit de l'abandon du type industriel unique au profit d'une multiplicité permise par la mise en œuvre d'une forme de variabilité « paramétrique », le schéma non standard reste tributaire d'une vision *passive* de la matière, réservant toute capacité informante au seul donné géométrique d'une forme intégralement spécifiée lors de la conception.

Cette critique nous permettra de proposer une nouvelle lecture de l'un des principaux concepts de la production non standard : la notion d'objectile, développée par Gilles Deleuze en 1988 dans son ouvrage *Le Pli*<sup>53</sup>. En remontant, dans le chapitre 5, aux travaux de Gilbert Simondon auquel Deleuze rattache ce concept, nous montrerons en effet l'existence d'une contradiction, jamais relevée à notre connaissance, entre la vision passive de la matière portée par le mode de production non standard et la notion simondonienne de *modulation*, associée au concept d'objectile. La modulation se développe en effet précisément, chez Simondon, au sein d'un projet visant à dépasser une compréhension hylémorphique de la prise de forme, et se trouve dès lors fondamentalement associée à une vision *active* de l'idée de matière : complétant notre critique du mode de production non standard, la discussion de ce projet théorique nous fournira alors les premiers éléments nécessaires à la conceptualisation et la mise à l'épreuve de formes d'organisation productives échappant à la logique d'une articulation prescriptive entre conception et fabrication.

Première étape de ce travail conceptuel et pratique, la troisième partie (chapitres 5 et 6) nous conduira tout d'abord à introduire la notion d'agentivité matérielle, venant préciser notre compréhension d'une forme d'activité de la matière. Introduite dans le chapitre 6, cette notion nous permettra de remettre en cause la vision classique d'une autorité créative concentrée dans la personne seule du concepteur, pour envisager des situations productives où l'ensemble des agents matériels impliqués dans les processus de conception et de fabrication (machines, matériaux, simulations informatiques...) peuvent contribuer, par l'intermédiaire d'interactions réciproques et émergentes, à la « prise de forme » des artefacts produits. Cette idée d'une interaction entre un ensemble d'acteurs autonomes, aux comportements non entièrement contraints *a priori*

---

53. Gilles Deleuze, *Le pli : Leibniz et le baroque*, Paris, Minuit, 1988.

par l'acte de conception, nous permettra de présenter un premier ensemble d'expérimentations remettant en cause l'orientation prescriptive des schémas traditionnels de production numérique. Nous examinerons à ce titre, dans le chapitre 7, trois projets — *Gradient*, *Two* et *Computational Ruins* —, déclinant une méthodologie pratique fondée sur l'idée de « notations ouvertes ».

Ces premiers résultats conceptuels et pratiques seront étendus dans la quatrième partie de notre exposé (chapitres 7 et 8), où nous nous donnerons pour objectif de rompre avec la *linéarité* de l'articulation traditionnelle entre conception et fabrication. Il s'agira alors, en place de la logique de « stabilisation » caractérisant traditionnellement cette articulation dans les schémas productifs numériques, d'imaginer des situations productives *maintenues*, résolvant et régénérant en permanence des états de tension énergétique dans un processus donnant lieu à une production continue de structures matérielles.

Cette idée sera rapprochée, dans le chapitre 8, de la théorie de l'autopoïèse, introduite par Humberto Maturana et Francisco Varela, et conceptualisée par l'introduction d'une notion d'*auto-maintenance* — forme d'organisation productive dans laquelle la conception ne s'apparente plus à une action de planification exhaustive, mais à la spécification de processus capables d'évoluer et de s'adapter dans le « temps-réel » de l'étape de fabrication, au cours d'une négociation émergente avec les comportements matériels laissés libres de s'y exprimer. Nous verrons alors comment de tels processus évolutifs, ou « processus de maintenance », ouvrent la possibilité d'une rupture avec la directionnalité temporelle caractéristique des schémas numériques traditionnels, tout en préservant la possibilité de produire — comme autant de « coupes » dans l'activité productive — des structures matérielles « individuées ». Ce cadre conceptuel sera mis à l'épreuve au sein de notre projet *Unspecified Clay*, présenté dans le chapitre 9, dans lequel nous proposerons une « implémentation » de l'idée d'auto-maintenance basée sur la programmation numérique de procédures rétroactives.

La cinquième et dernière partie de notre exposé (chapitres 9, 10 et 11) sera consacrée à l'approfondissement de la notion d'auto-maintenance, à travers l'élargissement du champ des acteurs susceptibles d'être impliqués dans cette forme d'organisation productive. Après avoir considéré des situations de production où les processus de maintenance implémentés par le concepteur visaient à négocier exclusivement avec des agents « non-humains » (machines, matériaux, systèmes informatiques), cette dernière partie nous permettra d'envisager le cas d'un scénario de *production participative*, fondé sur la possibilité de l'interaction d'un *public* avec un dispositif de production, préalablement conçu dans cette optique.

Développé en particulier à travers le cas d'œuvres artistiques relevant d'une production « en exposition », ce scénario nous conduira à préciser la fonction et la portée de l'activité même de conception, telle qu'elle se trouve redéfinie

par la notion d'auto-maintenance. Nous introduirons ainsi, dans le chapitre 10, l'idée d'une activité de conception orientée vers le développement de dispositifs « conversationnels » : de même que nous avons cherché à développer, dans les chapitres précédents, l'idée d'une autonomie des agents matériels impliqués dans la production, il s'agira ici d'inscrire les relations entre public et dispositif de production dans une logique de réciprocité, conduisant le dispositif n'être plus seulement contrôleur, mais aussi *contrôlé* par le public. Nous chercherons ainsi à ne pas réintroduire, au sein d'une activité de conception destinée à disposer les conditions d'une interaction émergente avec le public, une composante prescriptive dont il s'est agi, sous d'autres formes, de se défaire dans les étapes antérieures de notre argumentaire.

Pour développer cette forme de conception « non prescriptive » de dispositifs de production, nous ferons l'hypothèse, dans le chapitre 11, d'une mise en œuvre *analogique* de la notion de « conversation ». Cette hypothèse sera adoptée au terme d'une discussion opposant deux modalités, représentationnelle et performative, de « prise en compte » du public dans les dispositifs que chercherons à concevoir : l'une, inscrite dans la lignée des recherches en intelligence artificielle et des travaux du Architecture Machine Group de Nicholas Negroponte, et l'autre, prolongeant l'héritage expérimental et conceptuel de la cybernétique, et notamment des travaux réalisés par Gordon Pask au cours de la première partie de sa carrière. Réinvestissant ce second héritage, nous présenterons enfin, dans le chapitre 12, notre projet *Manœuvres* : il s'agira alors d'inviter le public à interagir directement, sans interfaçage ni représentation informatisée, avec quelques avatars de la nouvelle matérialité émergente dans nos sociétés contemporaines.



Première partie

# **Généralisation de la prescription**



## Chapitre 2

# L'invention d'une pensée prescriptive de la conception

### 2.1 Le paradigme notationnel albertien

Le pouvoir de fascination des technologies de fabrication additive réside sans doute dans leur capacité à réactiver cette question fondamentale : peut-on imaginer la fabrication comme la pure « matérialisation » d'une spécification pré-établie ?

L'expérience pratique des différents procédés d'impression 3D accessibles au grand public (stéréolithographie, frittage sélectif par laser, dépôt de matière fondue...) semble inciter à répondre négativement à cette question : les objets produits ne sont jamais aussi « parfaits » que les modèles numériques, et sont soumis à divers défauts de déformation ou d'état de surface. Mais en réalité, ces limitations sont aujourd'hui presque exclusives aux machines « grand public ». Les technologies industrielles sont en effet parvenues à un niveau de fiabilité suffisant pour que des industries de précision, comme l'aérospatiale, commencent à les utiliser en remplacement de procédés « traditionnels<sup>1</sup> ». À terme, il semble donc inévitable que les objets produits par les procédés de fabrication additive correspondent à une réalisation exacte des spécifications établies par les concepteurs.

Cette idée d'un passage sans erreur de la conception à l'artefact physique ne doit pourtant pas être vue comme une simple possibilité technique, offerte par l'évolution tendancielle des technologies de manufacture. En réalité, elle se donne sur le plan théorique comme la condition même de ces technologies. La fabrication additive n'est en effet que le dernier avatar d'une histoire de technologies pensées pour articuler conception et fabrication, spécifications et artefact construit, dans un rapport causal et linéaire.

Le cadre conceptuel d'une pensée de la prise de forme matérielle comme simple translation d'un donné pré-établi est donc celui d'une séparation de principe de tout processus de production en deux étapes consécutives, la *conception* et la *fabrication*, dont la première s'asservit la seconde en vertu d'un pouvoir prescriptif acté par la production de spécifications (plans, notations...). Cette séparation, caractérisant d'abord les domaines de l'architecture et de l'ingénierie, fait aujourd'hui figure de condition globale dans le champ des

---

1. Paul Markillie, « New Materials for Manufacturing », *op. cit.*

pratiques matérielles usant d'outils numériques. Dans des disciplines comme les arts plastiques ou le design objet, traditionnellement définies par l'absence de polarisation entre l'acte intellectuel de la conception et les questions matérielles de la fabrication, il n'est pas rare aujourd'hui de rencontrer des processus de travail essentiellement basés sur une activité de conception à l'aide d'outils numériques, qui rappellent ceux des pratiques architecturales contemporaines.

La division entre conception et fabrication constitue donc la caractéristique principale des modalités courantes d'exercice de la production numérique, modalités qui se donnent dès lors à comprendre, en ce sens, comme « calquées » sur les schémas traditionnels de l'architecture et de l'ingénierie<sup>2</sup>. Ce phénomène peut s'expliquer par l'importance historique jouée par ces schémas, ainsi que par les technologies de conception qui leur sont associées, dans le développement des techniques contemporaines de production numérique. Le modèle architectural, premier historiquement, constitue ainsi un point de départ privilégié pour notre réflexion.

Dans son acception moderne, l'architecture constitue la première discipline de conception : elle invente la notion même de conception telle qu'elle est entendue dans cette thèse, au sens d'une activité prescriptive séparée de la fabrication. Cette définition de l'architecture est formulée par Alberti dans son ouvrage *L'art d'édifier*<sup>3</sup> (*De re aedificatoria*), publié en 1485. Alberti a été le premier à affirmer une séparation de principe entre conception et fabrication, indiquant que les architectes ne devaient pas se préoccuper de problématiques liées à la construction. Le rôle de l'architecte, pour Alberti, est de produire une spécification de l'édifice, qui sera ensuite réalisé par d'autres. Cette séparation de principe entre conception et construction est portée dans la théorie albertienne par l'introduction d'une innovation fondamentale : un système notationnel fondé sur la réalisation de dessins à l'échelle, en projection orthogonale, montrant les vues en plan, section et élévation de l'édifice (figure 2.1).

Par l'utilisation exclusive de tracés en projection orthogonale, ce formalisme permet un relevé aisé des distances dans le plan, et le calcul des mesures de l'édifice bâti par simple rapport homothétique. Ce formalisme peut être qualifié de système *notationnel* : le plan sert à noter, préciser des données géométriques qui prennent la forme de spécifications constructives. L'adoption du tracé en projection orthogonale répond donc à un besoin fonctionnel différent de celui assuré par les vues en perspectives : aux usages représentationnels du

---

2. Il s'agit bien entendu d'une formulation rapide et simplificatrice, qui sera clarifiée dans la suite de notre exposé. En particulier, ce rapprochement entre architecture et ingénierie ne doit pas laisser entendre que les régimes de conception de ces disciplines sont ici considérés comme équivalents.

3. Leon Battista Alberti, *L'art d'édifier*, traduction de Pierre Caye et Françoise Choay, Paris, Seuil, 2004.

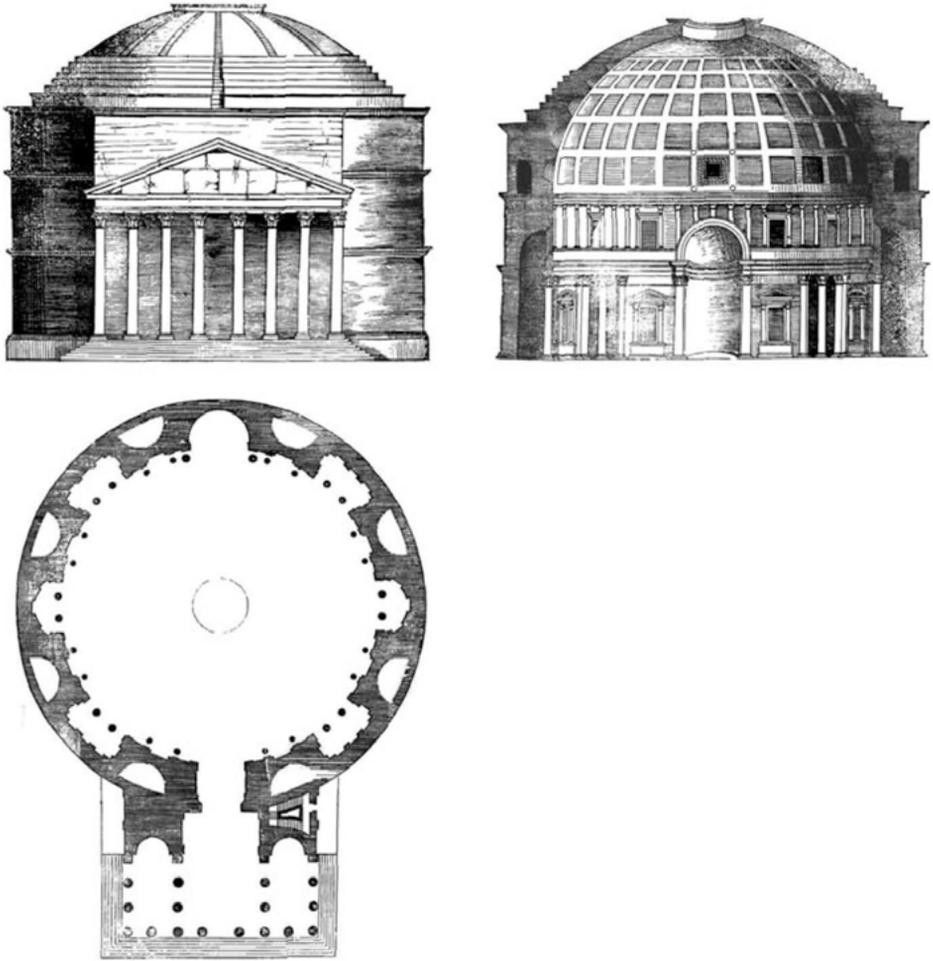


Fig. 2.1 — Sebastiano Serlio, vues standard du Panthéon, 1540 (source : Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge, The MIT Press, 2011, p. 52).

dessin succède une pratique prescriptive, correspondant à une redéfinition du rôle de l'architecte centrée sur l'activité intellectuelle de la conception.

Cette évolution doit être replacée dans le contexte humaniste de la Renaissance, et reliée au renforcement de la position auctoriale qui s'opère alors dans le champ des arts. On assiste en effet à une préoccupation nouvelle pour la notion de paternité, conférant une importance centrale à la question de la préservation de l'originalité des œuvres. De manière contemporaine aux travaux d'Alberti, des innovations technologiques sont donc développées pour répondre à la problématique d'une transmission et d'une diffusion des œuvres fidèles aux intentions de l'auteur. La plus célèbre de ces inventions est bien sûr l'imprimerie à caractères mobiles en métal, introduite par Gutenberg autour de 1450. L'imprimerie ambitionne de remplacer la reproduction manuelle, qui

présente l'inconvénient majeur — outre son coût prohibitif — de livrer la parole de l'auteur à la merci des erreurs du copiste. En réalité, l'imprimerie ne met pas à l'abri des erreurs de reproduction, dont la possibilité subsiste au moment de l'établissement des matrices de caractères par l'imprimeur. Mais elle permet de s'assurer que toutes les copies du texte seront *identiques*, limitant la variabilité qui caractérisait jusque-là l'opération de matérialisation du texte à travers la copie. L'imprimerie annonce donc un nouveau type de rapport à l'œuvre d'art provoqué par la possibilité technique d'une fabrication de copies identiques, rapport qui sera plus tard fameusement analysé par Walter Benjamin<sup>4</sup>.

Selon l'historien Mario Carpo, le formalisme albertien se rattache directement à l'histoire des technologies de production de copies identiques<sup>5</sup>. Le système notationnel d'Alberti participe ainsi d'une affirmation du rôle auctorial de l'architecte, conduisant ce dernier à assumer seul la paternité d'un édifice construit collectivement. Cette revendication ne peut tenir qu'en vertu de l'autorité d'une « preuve formelle » permettant d'affirmer que l'édifice, tel qu'il a été réalisé, est « identique » au plan qu'en a proposé l'architecte. Comme le montre Mario Carpo, telle est précisément la fonction du formalisme albertien : les vues en plan et en élévation établissent un rapport d'*équivalence notationnelle* entre le dessin et l'édifice, sur la base duquel l'édifice peut « théoriquement » être considéré comme une *copie* du dessin.

## 2.2 Conception et virtualité du projet architectural

Le système développé par Alberti s'est imposé comme le paradigme dominant dans l'architecture occidentale à compter de son invention. En dehors de quelques cas isolés (Antoni Gaudí, Frei Otto...), les architectes ont depuis Alberti exploité le dessin afin de se soumettre, par voie d'autorité, les aspects matériels de la construction.

Cependant, le programme albertien ne s'est jamais traduit en pratique par une disparition complète des problématiques liées à l'erreur constructive. Le terme d'« erreur » ne doit pas ici être compris dans le sens d'une défaillance humaine, ou matérielle — sauf catastrophe de grande envergure, les accidents de construction sont en général repérés, et corrigés —, mais plutôt au sens où l'on parle « d'erreur de mesure » en sciences naturelles. En physique ou en chimie, les erreurs de mesure quantifient l'écart entre la valeur mesurée d'une propriété et sa valeur idéale. Ces erreurs ne relèvent pas de la responsabilité de l'opérateur réalisant la mesure, mais d'une impossibilité pratique à se donner des ins-

4. Walter Benjamin, « L'œuvre d'art à l'époque de sa reproductibilité technique », dans *Œuvres III*, Paris, Gallimard (collection Folio essais), 2000, p. 67–113.

5. Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, *op. cit.*, p. x.

truments de mesure infiniment précis. Autrement dit, toute mesure physique « réelle » est vouée à être bornée par une marge d'erreur. De manière similaire, en architecture, les erreurs de construction peuvent être comprises comme des déviations entre l'édifice réellement obtenu et les spécifications produites par l'architecte, déviations non contingentes mais constitutives de la nature même de l'articulation entre spécifications architecturales et réalité constructive. Ces erreurs peuvent être introduites à deux niveaux, non nécessairement exclusifs.

De manière analogue aux erreurs de mesure en sciences, un premier type d'erreur constructive réside dans la précision nécessairement finie des *instruments* — autrement dit, des techniques mises en œuvre pour mener à bien la construction à partir des plans qui en figurent la valeur « exacte ». Ce type d'erreur a naturellement eu tendance à être limité avec les progrès réalisés en matière technique, notamment après la révolution industrielle. Comme le note Antoine Picon, la maîtrise des techniques constructives devient un enjeu central pour les architectes du Mouvement Moderne : leur obsession pour la préfabrication témoigne ainsi du désir d'industrialiser la construction architecturale, encore largement tributaire de méthodes artisanales au début du xx<sup>e</sup> siècle<sup>6</sup>. Les architectes modernes « rêvaient d'une préfabrication totale, d'un assemblage "sec"<sup>7</sup> », et cherchaient ainsi à faire entrer l'architecture dans un régime de « reproductibilité technique », présent à l'état latent dans le projet même du formalisme albertien.

Cependant, en dépit des progrès techniques qu'elle a contribué à mettre en place, l'architecture moderne n'est jamais parvenue à éliminer totalement les écarts entre dessin et construction. Un exemple célèbre est celui de l'Unité d'habitation de Marseille (figure 2.2), conçue par Le Corbusier et achevée en 1952. Confronté à des limitations matérielles, Le Corbusier a fait le choix de ne pas chercher à uniformiser les finitions du béton. Les surfaces de l'édifice sont marquées par les procédés de constructions suivis, montrant notamment les traces des coffrages en bois. Mais ces « erreurs », si elles correspondent à une imprécision réelle des techniques constructives (en l'absence de traitement ultérieur, un coffrage ne fournit que l'approximation d'une surface lisse), constituent la base d'un parti pris esthétique fort : la rugosité et les textures du matériau non traité donnent naissance à un langage plastique singulier, porteur de nouvelles possibilités expressives.

« La réalisation de l'Unité de Marseille aura apporté à l'architecture contemporaine la certitude d'une splendeur possible du béton armé mis en œuvre comme matériau brut au même titre que la pierre, le

6. Antoine Picon, « Free the Robots! », *Log*, n° 36, 2016, p. 147.

7. *Ibid.*, p. 147. Notre traduction.

bois ou la terre cuite. L'expérience est d'importance. Il semble vraiment possible de considérer le béton comme une pierre reconstituée, digne d'être montrée dans son état brut<sup>8</sup>. »

Cette transformation d'une limitation des moyens constructifs en l'une des caractéristiques iconiques du projet met en évidence l'existence d'une seconde porte d'entrée par laquelle « l'erreur », c'est-à-dire la déviation du bâti par rapport à sa spécification, peut entrer en architecture.

Ce second type d'erreur correspond à la possibilité pour le projet d'être modifié, voire renégocié en cours de fabrication. Cette possibilité traduit l'influence essentielle du contexte de construction (dans ses aspects économique, matériel, social et politique) sur le devenir du projet architectural, influence qui ne saurait être circonscrite par la précision d'un système de notation. En d'autres termes, le projet n'est pas réductible aux aspects géométriques capturés par le formalisme albertien. Il comporte intrinsèquement une certaine « marge d'erreur », une indétermination constitutive qui ne peut être mise à l'épreuve et levée que dans l'acte matériel de la construction.

Comme le remarque Antoine Picon, cette ambiguïté est constitutive du processus de conception architectural. Au sens strict, le projet est un objet *virtuel* par nature, puisqu'il vise à définir non pas une, mais un ensemble de possibilités constructives<sup>9</sup>, ce qui le distingue d'une « simple notation technique<sup>10</sup> ». Dotés d'un système notationnel puissant, mais largement dépendants d'un contexte de construction par nature incertain, les architectes sont donc structurellement conduits à entretenir un rapport ambigu avec l'activité de conception, et, par conséquent, aux techniques de dessin qu'elle mobilise.

Dans son essai « Translations from Drawing to Building<sup>11</sup> », publié en 1986, Robin Evans s'interroge sur la « mise à distance de l'objet » et le recours quasi exclusif à la médiation du dessin qui caractérise l'architecture depuis l'introduction du paradigme albertien :

« (...) I was soon struck by what seemed at the time the peculiar disadvantage under which architects labour, never working directly with the object of their thought, always working at it through some intervening medium, almost always the drawing, while painters and sculptors, who

8. Willy Boesinger (dir.), *Le Corbusier : Œuvre complète, volume 5, 1946-1952*, Zurich, Les éditions d'architecture, p. 190.

9. Antoine Picon, « Architecture and the Virtual: Towards a New Materiality », *op. cit.*, p. 115.

10. *Ibid.*, p. 115. Notre traduction.

11. Robin Evans, « Translations from Drawing to Building », dans *Translations From Drawing to Building and Other Essays*, Cambridge, MIT Press, 1997, p. 153-193.



Fig. 2.2 — Le Corbusier, Unité d’Habitation de Marseille, 1952 : détail des piliers et de la façade (source : <https://www.flickr.com/photos/frenzy/16538032089>, modifiée).

might spend some time on preliminary sketches and maquettes, all ended up working on the thing itself which, naturally, absorbed most of their attention and effort<sup>12</sup>. »

Pour Evans, cette séparation est cohérente avec la fonction théorique du dessin architectural : « fournir une détermination complète à l’avance<sup>13</sup> » de l’artefact final. Cependant, Evans reconnaît en pratique que le passage du dessin à l’édifice constitue une opération de *traduction*, ce qui implique la possibilité d’une altération, d’une distorsion du sens.

« To translate is to convey. It is to move something without altering it (...). Yet the substratum across which the sense of words is translated from language to language does not appear to have the requisite evenness and continuity; things can get bent, broken or lost on the way<sup>14</sup>. »

12. *Ibid.*, p. 156.

13. *Ibid.*, p. 156. Notre traduction.

14. *Ibid.*, p. 154.

Le terme de « traduction », renvoyant à la nécessité de faire transiter le sens d'un univers sémantique à un autre, marque l'adoption d'une position réaliste qui refuse de voir dans la construction la copie identique d'une définition « idéale » de l'édifice, représentée par le plan. La construction matérielle donne nécessairement lieu à un glissement de sens, à l'apparition d'« erreurs » qui confèrent son identité définitive à l'édifice. Ces glissements de sens sont présents dès le départ dans le projet, comme pures virtualités : certains traits saillants préfigurent des points d'achoppements possibles de l'opération de traduction.

Cependant, Evans suggère que le travail de l'architecte ne saurait se concevoir sans une forme de « suspension de l'esprit critique ». Pour Evans, on ne peut concevoir que si l'on continue de penser le projet comme la chose en soi, et non comme une virtualité. Autrement dit, on ne peut concevoir sans doubler son réalisme d'une souscription implicite à une interprétation idéaliste du schéma albertien :

« The assumption that there is a uniform space through which meaning may glide without modulation is more than just a naïve delusion, however. Only by assuming this pure and unconditional existence in the first place can any precise knowledge of the pattern of deviations from this imaginary condition be gained. I would like to suggest that something similar occurs in architecture between the drawing and the building, and that a similar suspension of critical disbelief is necessary in order to enable architects to perform their task at all<sup>15</sup>. »

Le « désavantage » apparent de l'architecture, discipline tributaire de la médiation du dessin, cache bien entendu une « énorme puissance générative<sup>16</sup> ». Comme le montre le texte d'Evans, cette puissance réside en définitive dans l'ambiguïté interne au projet architectural : le dessin, sensé représenter et spécifier l'édifice bâti, y figure en fait un objet virtuel.

« Recognition of the drawing's power as a medium turns out, unexpectedly, to be recognition of the drawing's distinctness from and unlikeness to the thing that is represented, rather than its likeness to it, which is neither as paradoxical nor as dissociative as it may seem<sup>17</sup>. »

---

15. *Ibid.*, p. 154.

16. *Ibid.*, p. 156. Notre traduction.

17. *Ibid.*, p. 154.

### 2.3 Régimes allographique et autographique

La situation décrite par Evans — « mise à distance » de l'objet final chez les architectes, engagement physique direct avec celui-ci chez les peintres et les sculpteurs — renvoie directement à la distinction entre les formes d'art dites *allographiques* et *autographiques*, théorisée par Nelson Goodman dans son ouvrage *Languages of Art*<sup>18</sup>.

Goodman consacre un chapitre de *Language of Art* à confronter sa théorie à la réalité de la pratique architecturale<sup>19</sup>. Ce développement débute par une discussion de la nature des outils utilisés par les architectes — rendus, plans et spécification —. Il s'agit dans un premier temps de les qualifier à l'aide des catégories générales de la théorie (esquisse, partition, script), dans l'optique d'identifier un possible système notationnel, ce qui conduirait alors à qualifier l'architecture d'art allographique.

Le statut des rendus est clair : ils se rattachent directement à la catégorie des esquisses. La question des plans est plus ambiguë mais, en définitive, Goodman finit par leur attribuer le statut de partition, c'est-à-dire de système véritablement notationnel, au sens où cette notion a été définie plus tôt dans l'ouvrage<sup>20</sup>. Enfin, Goodman examine la question des indications laissées par l'architecte en complément du plan. Désignées par Goodman par le terme de « spécifications », ces indications peuvent porter sur le choix des matériaux ou tout autre aspect de la construction. La combinaison du plan et des spécifications est bien plus restrictive que le plan seul : seules les spécifications, et non le plan, précisent les matériaux à utiliser pour construire les différentes parties d'un édifice<sup>21</sup>. Dans l'usage, plans et spécifications sont donc utilisés de concert, les spécifications apportant un complément essentiel à l'information géométrique notée dans le plan. Cependant, l'ensemble ainsi constitué ne forme plus une partition, mais un script : aussi utile et précises que soient les compléments apportés par les spécifications, ceux-ci sont énoncées sous une forme verbale et discursive qui ne peut satisfaire aux exigences d'un réel système notationnel<sup>22</sup>.

Le seul système véritablement notationnel à l'œuvre en architecture, selon Nelson Goodman, est donc celui des plans en vue orthogonale, munis d'indications numériques. L'analyse de Goodman le conduit donc à écarter les rendus en perspective et les « spécifications », mais l'amène donc en définitive à

---

18. Nelson Goodman, *Languages of Art: An Approach to a Theory of Symbols*, Indianapolis, Bobbs-Merrill, 1968.

19. *Ibid.*, p. 218–221.

20. *Ibid.*, p. 219.

21. *Ibid.*, p. 219.

22. *Ibid.*, p. 218.

conclure que l'architecture possède un système notationnel « raisonnablement adéquat<sup>23</sup> ». En vertu du cadre théorique défini dans son livre, l'existence de ce système permet de définir une notion d'identité pour les œuvres architecturales — et en l'occurrence, d'une notion d'identité qui ne serait définie qu'à partir du plan seul.

En vertu de cette notion, deux édifices spatialement et géométriquement équivalents à un même plan doivent logiquement être considérés comme deux *instances* d'une même œuvre, et ce même s'ils diffèrent fortement dans leurs propriétés matérielles : dans la mesure où ces propriétés ne sont pas définies dans le plan mais dans les spécifications qui l'accompagnent, elles n'interviennent pas dans la discussion visant à déterminer l'identité des édifices. Dans le cadre d'une application stricte de la théorie de Nelson Goodman, l'architecture constitue donc théoriquement un art allographique<sup>24</sup>. Mais, comme le note immédiatement l'auteur, la notion d'œuvre qui en découle se heurte aux usages établis dans la pratique architecturale.

« The class of buildings picked out by the plans-plus-specifications is narrower than that defined by the plans alone; but the plans-plus-specifications make up a script, not a score. Thus the question whether two buildings are instances of the same work, relative to the architect's total language, is an indeterminate one. Relative to the notational language of plans, it is determinate; but the work is then identified with a more comprehensive class than is customary<sup>25</sup>. »

Reconnaissant ce décalage, Nelson Goodman conclut donc au caractère « mixte et transitoire<sup>26</sup> » de la discipline architecturale. En dépit d'un certain nombre de réalisations « indiscutablement allographiques<sup>27</sup> », le langage notationnel de l'architecture n'a en effet « pas encore acquis une autorité complète pour distinguer universellement l'identité de l'œuvre de sa production concrète<sup>28</sup> ». En d'autres termes, « l'œuvre architecturale n'est pas toujours aussi sûrement indépendante d'un édifice donné qu'une œuvre musicale ne l'est d'une performance particulière<sup>29</sup> ». Cette dépendance se traduit, dans l'usage, par le fait qu'« identifier une œuvre architecturale à un “design”, plutôt qu'un

---

23. *Ibid.*, p. 221. Notre traduction.

24. *Ibid.*, p. 221.

25. *Ibid.*, p. 219–220.

26. *Ibid.*, p. 221. Notre traduction.

27. *Ibid.*, p. 221. Notre traduction.

28. *Ibid.*, p. 221. Notre traduction.

29. *Ibid.*, p. 220. Notre traduction.

édifice, est pour nous plus inconfortable qu'assimiler une œuvre musicale à une composition, plutôt qu'une performance<sup>30</sup> ».

L'analyse de *Langages of Art* permet de revenir sur une idée selon laquelle le paradigme albertien relèverait d'un régime de reproductibilité technique de l'œuvre d'art. Pour Mario Carpo, cette proposition constitue une réalité théorique, indépendante des usages observés en pratique : si les plans donnent usuellement lieu à une seule construction, il serait théoriquement possible de considérer plusieurs édifices construits à partir d'un même plan comme autant d'*instances* d'une même œuvre architecturale<sup>31</sup>. Cette position théorique correspond de fait strictement aux conclusions auxquelles parvient Nelson Goodman. Mais comme le note celui-ci, elle implique de définir l'identité de l'œuvre architecturale à partir du plan seul et indépendamment des propriétés matérielles de la construction, ce qui est contraire à l'usage.

Tout en reconnaissant et acceptant l'existence d'un décalage entre la théorie et la réalité pratique (« l'adéquation exacte entre la définition et la pratique ordinaire n'est pas un critère obligatoire, ou une chose à laquelle nous devrions nous attendre<sup>32</sup> »), Nelson Goodman laisse entendre plus loin que ce décalage pourrait, à terme, être résorbé : en notant que le plan n'a « pas encore » atteint l'autorité nécessaire pour s'établir comme seul critère effectif d'identité de l'œuvre architecturale, l'auteur semble laisser ouverte la possibilité que l'architecture puisse un jour relever d'un régime pleinement allographique. Discutable dans son application originale à la discipline architecturale — laquelle s'avère inséparable, comme nous l'avons vu, d'une poétique de la virtualité du projet —, cette idée d'un « devenir allographique » mérite cependant d'être retenue : elle décrit en effet adéquatement la trajectoire historique suivie par une discipline voisine, l'ingénierie.

## 2.4 Conception industrielle et reproductibilité technique

Une des premières formulations rigoureuses des techniques de représentation utilisées par l'ingénierie moderne est sans nul doute celle proposée par Gaspard Monge dans ses leçons de géométrie descriptive, publiées en 1798<sup>33</sup>.

De manière générale, la géométrie descriptive se définit comme un ensemble de procédures permettant la représentation rigoureuse en deux dimen-

30. *Ibid.*, p. 221. Notre traduction.

31. Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, *op. cit.*, p. 26.

32. Nelson Goodman, *Langages of Art: An Approach to a Theory of Symbols*, *op. cit.*, p. 220. Notre traduction.

33. Gaspard Monge, *Géométrie descriptive : Leçon données aux écoles normales, l'an III de la République*, Paris, Baudouin, 1798.

sions d'objets tridimensionnels<sup>34</sup>. Un de ses principes fondamentaux est l'utilisation de vues en projection orthogonale : deux premières vues en deux dimensions sont d'abord produites en choisissant deux directions de l'espace perpendiculaires entre elles, puis en projetant l'objet dans deux plans orthogonaux à celles-ci. À partir de chacune de ces vues, qualifiées d'*orthographiques*, une infinité de représentations supplémentaires peuvent être générées en projetant selon de nouvelles directions, nécessairement perpendiculaires à la direction de la vue sélectionnée. Il est ainsi possible de produire suffisamment de tracés pour lever toute ambiguïté géométrique et permettre la description précise de l'objet. Dans la pratique, les deux premières directions de projection sont bien entendu choisies en fonction de la géométrie de l'objet à représenter, et adaptées à ses caractéristiques (symétries, zones planes...). Un premier ensemble de vues orthogonales sera donc construit de manière spécifique au projet, l'objectif étant de parvenir à une description rigoureuse avec le minimum de projections. Ce premier ensemble de vues se double usuellement de six vues orthographiques supplémentaires, appelées vues principales, représentant l'objet selon les points de vue suivants : avant, arrière, dessus, dessous, côtés gauche et droit.

Ces vues principales sont mathématiquement équivalentes aux tracés en plan, section et élévation formalisées par Alberti. La géométrie descriptive de Gaspard Monge s'inscrit donc dans la continuité de techniques notationnelles introduites à la Renaissance, dont elles proposent une généralisation ainsi qu'une formulation rigoureuse<sup>35</sup>. La géométrie descriptive répond de fait aux contraintes fonctionnelles adressés par Alberti : permettre la communication précise des longueurs, des proportions ainsi que de la configuration spatiale des objets à fabriquer. À l'instar du formalisme albertien, la géométrie descriptive constitue donc un système notationnel à visée prescriptive : le dessin d'ingénierie se pose comme un document de référence permettant de diriger et d'encadrer les étapes de fabrication matérielle d'un artefact.

L'ingénierie constitue donc, aux côtés de l'architecture, un autre grand « pôle notationnel » de l'histoire de la production moderne. Mais la proxi-

---

34. Gaspard Monge définit la géométrie descriptive de la manière suivante : « [c]et art a deux objets principaux. Le premier est de représenter avec exactitude, sur des dessins qui n'ont que deux dimensions, les objets qui en ont trois, et qui sont susceptibles de définition rigoureuse (...). Le second objet de la géométrie descriptive est de déduire de la description exacte des corps tout ce qui suit nécessairement de leurs formes et de leurs positions respectives » (*Ibid.*, p. 2).

35. Bien qu'elle soit à la base des vues en plan, section et élévation, la notion de projection orthogonale ne pouvait être formalisée mathématiquement à la Renaissance en raison du concept d'infini qu'elle mobilise : pour être compatible avec les théories de la perspective, la projection orthogonale suppose en effet de placer l'observateur à l'infini (Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, *op. cit.*, p. 18–19).

mité mathématique des techniques de notation utilisées dans ces deux disciplines masque en réalité une différence conceptuelle essentielle. Si la poétique du projet architectural est tributaire de la « marge d'erreur » intrinsèque à tout procédé de représentation, le dessin d'ingénierie s'inscrit dès le départ dans une logique de résolution et d'élimination de l'ambiguïté. En d'autres termes, contrairement à l'indétermination entourant le processus de fabrication en architecture, discipline dans laquelle le projet définit non pas une mais plusieurs réalisations possibles, la fabrication industrielle est perçue comme une opération *linéaire*, dont la prévisibilité tient d'une part à la conception première de spécifications formalisées des objets à produire, d'autre part à l'utilisation de moyens de fabrication mécaniques capables de suivre précisément ces spécifications. Ces deux volets, conception et fabrication, sont tous deux cités dans l'introduction du cours de Gaspard Monge. Cependant, la fonction de conception, à laquelle répond la géométrie descriptive, occupe dans cette introduction une position centrale, et se voit qualifiée de prérequis à toute tentative de mise en place d'un processus de fabrication « exact ». En effet, si Monge écrit qu'il est nécessaire de « répandre parmi nos artistes la conn[a]issance des procédés des arts, et celle des machines qui ont pour objet, ou de diminuer la main d'œuvre, ou de donner aux résultats des travaux plus d'uniformité et plus de précision<sup>36</sup> », il souligne avant tout la nécessité d'une éducation aux approches rigoureuses de la conception, qu'il s'agit de dispenser tant aux praticiens qu'au public au sens large :

« Pour tirer la nation française de la dépendance où elle a été jusqu'à présent de l'industrie étrangère, il faut, premièrement, diriger l'éducation nationale vers la conn[a]issance des objets qui exigent de l'exactitude, ce qui a été totalement négligé jusqu'à ce jour, et accoutumer les mains de nos artistes au maniement des instruments de tous les genres, qui servent à porter la précision dans les travaux et à mesurer ses différen[t]s degrés. Alors les consommateurs, devenus sensibles à l'exactitude, pourront l'exiger dans les divers ouvrages, y mettre le prix nécessaire ; et nos artistes, familiarisés avec elle dès l'âge le plus tendre, seront en état de l'atteindre<sup>37</sup>. »

Pour Monge, la géométrie descriptive représente donc un véritable vecteur de dissémination d'une « culture de l'exactitude » dans tout le champ de la production, voire dans l'ensemble du champ social. Les valeurs positives prêtées ici à l'idée d'une production « exacte », c'est-à-dire conforme au plan,

---

36. Gaspard Monge, *Géométrie descriptive : Leçon données aux écoles normales, l'an III de la République*, op. cit., p. 1.

37. *Ibid.*, p. 1.

rattachent le projet de Monge à une entreprise fondamentale de la modernité : le développement d'un régime technique de reproductibilité à l'identique. Si, comme l'a montré Mario Carpo, le paradigme albertien peut être rattaché à ce projet historique, les travaux de Monge marquent un tournant décisif : pour la première fois, la possibilité d'une autorité complète du système de notation sur l'ensemble de la fabrication se trouve formulée explicitement. Ce tournant conceptuel s'accompagne rapidement, aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, d'une mise en application généralisée : à travers un important développement des moyens de production mécaniques, l'industrie s'oriente vers la production en série, dont l'objectif premier est la reproduction « exacte », en très grand nombre, d'artefacts tous identiques.

Il convient ici de définir plus précisément l'idée d'identité qui sous-tend la remarque précédente. Dans la recherche d'exactitude supportée par Monge, le plan fonctionne non seulement comme aide technique à la réalisation, mais comme référence permettant d'opérer des comparaisons quantitatives. Muni de ce document, chacun peut évaluer la « validité » d'un artefact produit en série : tout objet notationnellement conforme au plan peut donc être identifié comme une instance d'un même *modèle* industriel, défini de manière unique. Le terme d'« instance » est bien entendu employé en référence à la théorie esthétique de Nelson Goodman : bien que nous considérons ici le cas de la production industrielle et non celui du champ artistique, il est clair que la notion de conformité au modèle établie par le dessin d'ingénierie se rapproche fortement de la notion d'identité des œuvres définies par des *partitions*. À l'instar des systèmes notationnels à l'œuvre dans les formes d'art allographiques, le dessin d'ingénieur a en effet acquis l'« autorité nécessaire » pour établir une notion d'identité indépendante de la « production concrète » d'un objet. Ainsi, s'il convient au sens strict de réserver le qualificatif d'« allographique » à des formes artistiques, la production industrielle en série obéit à une logique présentant de nombreuses similarités avec certains des schémas de production artistiques analysés par Nelson Goodman.

Comme le système albertien l'avait opéré en architecture, le formalisme introduit par Gaspard Monge marque ainsi le début d'un « tournant notationnel » dans la production industrielle. Ce tournant se trouve à l'origine d'une transformation plus profonde des modes de production pré-existants que dans le cas architectural. Si l'architecture, comme le note Goodman, est restée tributaire de ses « origines autographiques », la production en série, pratiquée sous des formes simples au cours du XIX<sup>e</sup> siècle mais largement développée à partir

de la fin des années 1910 (en particulier au sein de la Ford Motor Company<sup>38</sup>), annonce pour la première fois la possibilité de voir advenir un régime de pleine autorité de la notation. Équipées des moyens d'une spécification géométrique « exacte » et de chaînes productives de plus en plus mécanisées, les industries modernes peuvent en effet se prémunir non seulement des défauts d'exécution, mais aussi des tensions sociales qui, en architecture, jouent un rôle non négligeable dans l'apparition des « erreurs de traduction » du plan à l'édifice.

---

38. David Hounshell, *From the American System to Mass Production, 1800–1932: The Development of Manufacturing Technology in the United States*, Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1984.



## Chapitre 3

# Le tournant numérique

### 3.1 Les difficultés notationnelles de l'industrie

Si l'acheminement vers un régime de reproductibilité technique décrit bien la trajectoire historique d'ensemble de l'industrie aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, l'utilisation de notations formalisées comme celle de la géométrie descriptive ne s'est pas imposée uniformément dans tous les secteurs de la production. En effet, les industries automobile et aéronautique ont fait usage, pendant une part importante du XX<sup>e</sup> siècle, de techniques de conception analogiques héritées de la conception navale.

Traditionnellement, les coques des navires sont construites à l'aide d'une technique de « construction de surface par sections » (*lofting*). La construction commence par l'assemblage préliminaire d'un squelette de bois doté de sections transversales (membrures), articulé le long d'une « épine dorsale » (quille). La surface de la coque vient ensuite s'appuyer « tangentiellement » à ce squelette. Cette technique artisanale permet de donner aux coques des géométries complexes, adaptées empiriquement pour optimiser le comportement dynamique des navires. De manière notable, cette approche ne repose pas sur le dessin : ni la forme d'ensemble de la coque, ni le tracé des sections transversales du squelette ne sont définies à l'aide de plans<sup>1</sup>. Au Moyen-âge, les pièces de la membrure commencent à être construites directement à partir d'un « maître gabarit » variable<sup>2</sup>. Placé en des positions successives le long de la quille, ce gabarit permet de définir, à l'échelle 1, la configuration géométrique des sections. Cette approche offre un avantage majeur : la coque d'un navire peut désormais être dupliquée avec précision à partir d'un seul instrument.

Autour de 1600, ce procédé sera progressivement remplacé par une étape de *conception*, basée sur la réalisation de tracés à échelle réduite<sup>3</sup>. Présentant des vues en plan et en section de la coque (figure 3.1), ces dessins sont pensés pour spécifier les étapes du processus de *lofting* : on y trouve l'ensemble des in-

---

1. Gerald Farin, « A History of Curves and Surfaces in CAGD », dans Gerald Farin, Josef Hirschek et Myung-Soo Kim (dir.), *Handbook of Computer Aided Geometric Design*, Amsterdam, North Holland, 2002, p. 2.

2. Éric Rieth, « La méthode moderne de conception des carènes du whole-moulding, une mémoire des chantiers navals méditerranéens du Moyen Âge », dans Horst Nowacki et Matteo Valleriani (dir.), *Shipbuilding Practice and Ship Design Methods From the Renaissance to the 18th Century: A Workshop Report*, Berlin, Max Planck Institute for the History of Science, 2003, p. 17-32.

3. Gerald Farin, « A History of Curves and Surfaces in CAGD », *op. cit.*, p. 2.

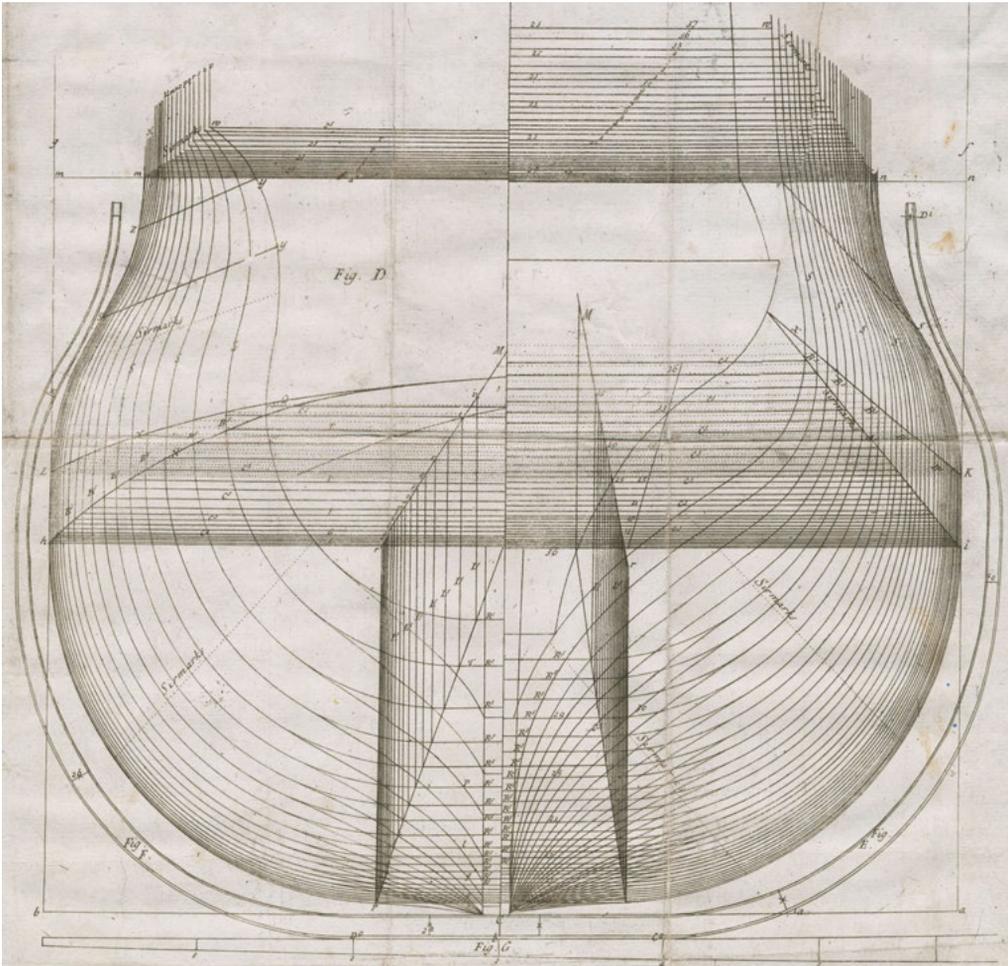


Fig. 3.1 — William Sutherland, vue en section de la structure d'une coque détaillant les géométries des membrures, 1711 (source : Alastair Townsend, « On the Spline: A Brief History of the Computational Curve », *International Journal of Interior Architecture + Spatial Design*, vol. 3, 2014).

formations nécessaires à la construction et au positionnement des membrures formant la structure de la coque. Par l'adoption d'un mode de représentation normé, doté d'une fonction prescriptive, ces plans se rapprochent à plusieurs égards des dessins techniques formalisés par la géométrie descriptive deux siècles plus tard environ. Mais une différence majeure les distingue des constructions de Monge : ils ne rendent pas compte d'objets définis mathématiquement, mais sont usuellement produits de manière analogique à l'aide d'une « spline » (figure 3.2), un instrument de dessin composé d'un faisceau de bois flexible mis



Fig. 3.2 — Spline mécanique maintenue sous tension à l'aide d'un jeu de poids (source : [http://www.edsonmarine.com/hi-res/index.php?pathextend=boating\\_accessories](http://www.edsonmarine.com/hi-res/index.php?pathextend=boating_accessories)).

en tension à l'aide de poids<sup>4</sup> ou de vis<sup>5</sup>. Placée sur le papier, la spline est mise en forme pour atteindre la courbe souhaitée, puis utilisée comme guide pour le tracé du plan.

Cette technique possède un avantage immédiat : basée sur un procédé de déformation physique donnant naturellement naissance à des solutions régulières, elle permet de générer des courbes harmonieuses, *a priori* susceptibles d'une prise en compte efficace des contraintes aérodynamiques. Elle offre ainsi au concepteur une grande liberté formelle, tout en garantissant une certaine élégance « naturelle » des résultats obtenus. Cependant, les courbes tracées à l'aide de splines présentent l'inconvénient majeur de résister à toute tentative de description mathématique simple. Dans ce contexte, la traduction des spécifications de conception en directives techniques constitue un processus nécessairement artisanal et imprécis.

Ces imprécisions sont héritées du principe même de la construction par section. Traditionnellement, la fabrication d'une surface par *lofting* dépend en effet de l'expérience et de l'appréciation subjective du constructeur : il ne s'agit pas simplement de faire passer la surface par l'ensemble des sections dessinées,

4. Alastair Townsend, « On the Spline: A Brief History of the Computational Curve », *International Journal of Interior Architecture + Spatial Design*, vol. 3, 2014.

5. Gerald Farin, « A History of Curves and Surfaces in CAGD », *op. cit.*, p. 2.

mais de s'assurer que la forme d'ensemble sera suffisamment « lisse » (*smooth*<sup>6</sup>). Trompant l'ambition prescriptive du plan, cette nécessité de recourir à l'interprétation subjective d'un opérateur humain pour arrêter la géométrie finale du navire reste longtemps une nécessité, au vu des techniques limitées de description géométrique des courbes disponibles jusqu'au milieu du xx<sup>e</sup> siècle. Prépondérantes en conception navale pour des raisons de performance dynamique, les surfaces « libres » et complexes (*freeform surfaces*) sont en effet notablement difficiles à représenter en géométrie descriptive, et les techniques de représentation traditionnelles de l'ingénierie ne s'appliquent en réalité qu'à des formes mathématiques simples : dès l'introduction de son cours, Monge avait ainsi rappelé que la géométrie descriptive ne pourrait jamais concerner que les formes « susceptibles de définition rigoureuse<sup>7</sup> ». Privés d'une manière de décrire rigoureusement les surfaces complexes des coques, les concepteurs sont donc contraints à adopter une représentation par sections, *implicite* et ambiguë : si rapprochées soient-elles, les tracés des sections ne peuvent fournir qu'un « échantillonnage » local de la géométrie. Le plan seul n'est alors pas en mesure de fixer la géométrie de manière définitive, et peut potentiellement donner lieu à plusieurs formes de coque différentes. Afin de disposer malgré tout d'un modèle géométrique de référence pour la fabrication, un « maître modèle » physique est donc construit à échelle 1 par une équipe d'artisans experts, précédé par la fabrication préliminaire et l'ajustement de nombreuses maquettes de travail.

Les industries automobiles et aéronautique, en place à partir du début du xx<sup>e</sup> siècle, sont à leur tour rapidement amenées à travailler avec des surfaces complexes. Utilisées pour répondre à des enjeux aérodynamiques ou stylistiques, ces géométries sont notamment impliquées dans la définition des fuselages ou des carrosseries. Les concepteurs industriels sont donc contraints à adopter un procédé de définition des surfaces « par section » similaire à celui développé dans la conception navale, et héritent des limitations intrinsèques

---

6. Au delà de son sens courant, le terme « smooth » renvoie en anglais à la propriété mathématique permettant de quantifier le degré de régularité d'une surface. De manière générale, une fonction « smooth » est une fonction dont une ou plusieurs dérivées successives sont continues. En pratique, la notion n'est pas aussi précise que la notation  $C^n$  (indiquant qu'une fonction est dérivable  $n$  fois et que sa dérivée d'ordre  $n$  est continue) et il n'existe pas à notre connaissance de consensus sur le degré de régularité attendu d'une telle fonction. Néanmoins, cette notion possède l'avantage de révéler un lien profond entre les qualités visuelles prêtées à une courbe et la notion mathématique de régularité : une fonction mathématiquement « smooth » produira ainsi, le plus souvent, une courbe « smooth » dans le sens courant du terme. Pour cette raison, l'adjectif « lisse », utilisé dans certains textes mathématiques de langue française pour qualifier des surfaces régulières, sera ici préféré à « fluide » dans nos traductions de l'anglais « smooth ».

7. Gaspard Monge, *Géométrie descriptive : Leçon données aux écoles normales, l'an III de la République*, op. cit., p. 2.

de cette méthode. Le passage des plans de conception aux spécifications techniques réellement utilisées dans la fabrication demeure donc un processus artisanal, basé sur la construction de modèles physiques à l'échelle 1. Cette situation perdure jusqu'aux années 1960, et parfois ultérieurement. Ainsi, l'ingénieur Pierre Bézier rapporte que dans l'industrie automobile des années 60, le processus de travail standard débutait par la conception de modèles en argile à échelle réduite, typiquement de  $1/5^e$  à  $1/8^e$ , à partir des esquisses produites par les « stylistes ». Après une première sélection, les modèles retenus étaient divisés imaginairement en sections transversales, afin de mesurer les positions d'un ensemble de points de repères. Ces points étaient ensuite tracés à l'échelle 1 sur une large planche à dessin, où ils servaient de guides au tracé de courbes, réalisé à l'aide d'outils analogiques, comme des splines ou des pistolets<sup>8</sup>. Ces tracés permettaient de fabriquer un squelette en bois, similaire à la membrure d'un navire. Une équipe experte de modeleurs intervenait alors pour « habiller » ce squelette, souvent à l'aide d'argile, produisant une première maquette en taille réelle de l'automobile. Après plusieurs révisions, ce modèle était finalement « gelé » de manière définitive. Il servait alors au tracé des différents dessins techniques des pièces, incluant le détail de l'ensemble des éléments mécaniques. Sur la base de ces dessins techniques, un dernier assemblage était finalement fabriqué (figure 3.3) : composé de modèles indépendants des différentes pièces, ce « maître modèle » fonctionnait comme référence unique pendant tout le cycle de production de l'automobile<sup>9</sup>. Cette méthode ne pouvait cependant offrir la garantie d'un stockage absolument « statique » de la géométrie de l'automobile à produire : il était ainsi fréquent que les assemblages maîtres subissent des déformations, induites par leur manipulation répétée ou l'usure naturelle de leurs matériaux<sup>10</sup>.

En parallèle de l'utilisation de méthodes artisanales pour la conception de certaines pièces clés, les industries automobile et aéronautique intègrent les derniers développements techniques à leurs chaînes de production. Le perfectionnement des moyens mécaniques de fabrication permet ainsi, dans les années 50, de produire de manière « exacte » des formes géométriques simples (cylindres, sphères, cônes), avec des précisions parfois inférieures à une dizaine de microns<sup>11</sup>. Premiers à bénéficier de cette précision, les concepteurs chargés de l'élaboration des pièces mécaniques adoptent un processus de travail de plus

---

8. Connus en anglais sous le nom de *french curves*, les pistolets sont des gabarits de courbes permettant d'obtenir des tracés visuellement « lisses ».

9. Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 20, n° 2, 1998, p. 38.

10. Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 321, n° 1545, 1971, p. 14.

11. Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *op. cit.*, p. 38.

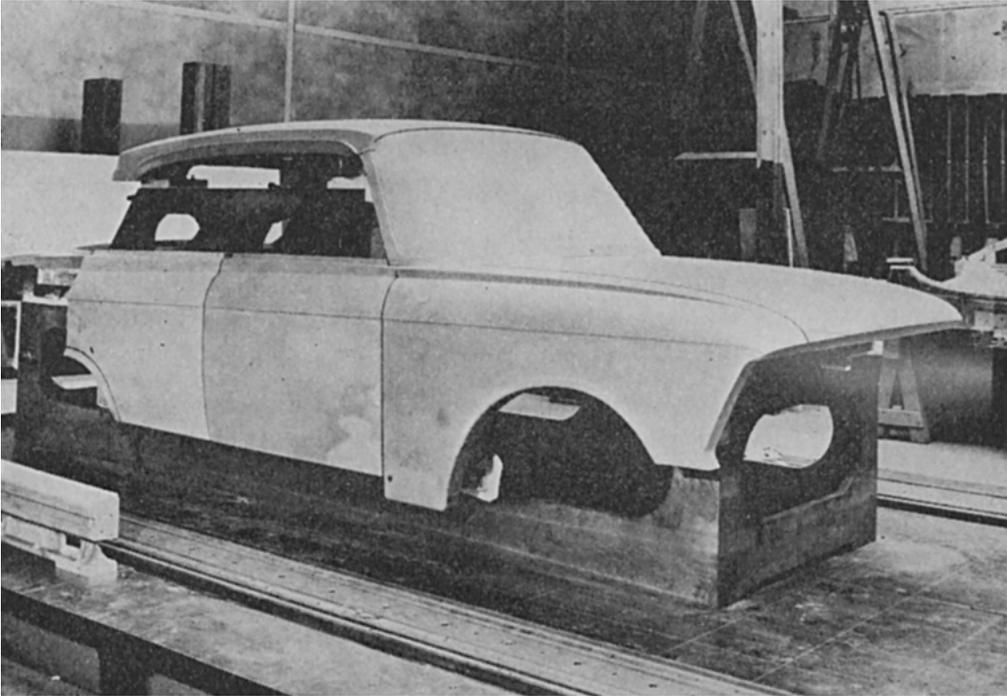


Fig. 3.3 — Assemblage d'un maître modèle dans l'industrie automobile (source : Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 321, n° 1545, 1971, p. 208).

en plus contrôlé, ne laissant « aucune place à la discussion<sup>12</sup> ». Au milieu du xx<sup>e</sup> siècle, les pratiques de conception industrielle se polarisent donc autour de l'adoption de deux méthodologies contradictoires : l'une, formalisée et exacte, appliquée à la production de géométries simples comme celles utilisées dans les pièces mécaniques ; l'autre, artisanale et ambiguë, présidant à l'élaboration de géométries complexes, comme celles de fuselages et des carrosseries. Acceptée en raison de limitations fondamentales des techniques de conception géométrique, cette situation était néanmoins perçue par certains acteurs industriels comme un véritable « goulot d'étranglement », limitant la précision et le rendement de la production, et la rendant dépendante de l'appréciation subjective et de la coopération des artisans-modéleurs.

---

12. Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *op. cit.*, p. 40. Notre traduction.

### 3.2 Aux origines de la conception assistée par ordinateur

Au cours des décennies 1940–1970, plusieurs tentatives de dépassement du « goulot d'étranglement notationnel » de l'industrie vont poser les bases conceptuelles et techniques des outils de conception numériques contemporains.

Dès les années 1940, le secteur aéronautique s'intéresse à la possibilité d'une traduction *linéaire*, entièrement déterminée et prévisible, des spécifications des concepteurs en opérations de fabrication. La première méthode répondant à ce programme est publiée en 1944 par l'ingénieur Roy Liming<sup>13</sup>, employé de la North American Aviation. Cette approche constitue une tentative de rationalisation des méthodes utilisées dans la conception de pièces de forme complexes comme celles des fuselages. Se basant sur un principe de conception par sections mais reconnaissant l'imprécision des techniques traditionnelles, la méthode de Liming offre pour la première fois l'opportunité de décrire explicitement les surfaces des pièces. Il ne s'agit pas simplement de proposer une formalisation rigoureuse sur le plan mathématique, mais de mettre au point une méthode utilisable en pratique par les concepteurs : les propriétés mathématiques des surfaces complexes étaient en effet déjà bien comprises depuis plusieurs décennies, à la suite notamment des recherches réalisées par Euler<sup>14</sup> et Gauss<sup>15</sup> aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, mais ces travaux n'avaient jusque-là pas fourni de solution applicable directement à la conception de formes complexes par l'industrie. Une des limitations rencontrées était d'ordre pratique : impliquant un grand nombre de calculs, la manipulation et l'évaluation de surfaces complexes « à la main » ne pouvait s'intégrer de manière fluide à un processus de conception. Dans les années 40, les besoins de l'ingénierie et de la balistique entraînent le développement et la diffusion de calculateurs analogiques<sup>16</sup>, permettant d'automatiser certaines opérations mathématiques. Ce contexte est directement lié au développement de l'approche de Roy Liming, basée, dans sa mise en application, sur l'utilisation de tels calculateurs<sup>17</sup>.

Appliqué notamment à la production du chasseur P-51<sup>18</sup>, la méthode de Liming remplace les tracés analogiques « manuels » par des courbes coniques (figure 3.4). Les coniques étaient déjà utilisées depuis un certain temps dans les

---

13. Roy Liming, *Practical Analytical Geometry with Applications to Aircraft*, New York, Macmillan, 1944.

14. Leonhard Euler, « Recherches sur la courbure des surfaces », *Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin*, vol. 16, 1760, p. 119–143.

15. Carl Friedrich Gauss, *Recherches générales sur les surfaces courbes*, Paris, Bachelier, 1852.

16. Andrew Witt, « Design Hacking: The Machinery of Visual Combinatorics », *Log*, n° 23, 2011, p. 20.

17. Roy Liming, *Practical Analytical Geometry with Applications to Aircraft*, *op. cit.*, p. x.

18. *Ibid.*, p. v.

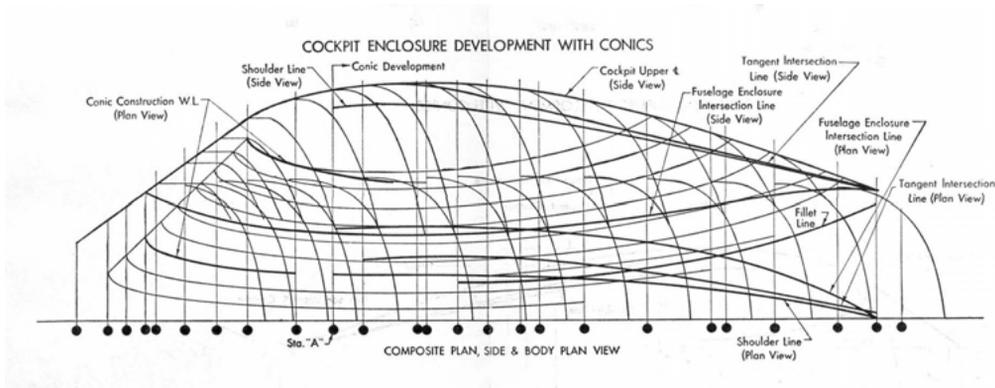


Fig. 3.4 — Procédure de définition de la géométrie du cockpit d'un avion à l'aide de coniques (source : Roy Liming, *Practical Analytical Geometry with Applications to Aircraft*, New York, Macmillan, 1944, p. 224).

industries aéronautique et navales, sous forme de tracés construits à l'aide de méthodes dues à Pascal et Monge<sup>19</sup>. L'idée de Liming consiste à soumettre le tracé des coniques à une formalisation préliminaire, consistant à les définir en premier lieu, avant tout tracé, à partir de leurs équations mathématiques. Supprimant toute forme d'ambiguïté dans les tracés des courbes, cette approche présente pour intérêt principal de permettre une formulation calculatoire du procédé de construction de surfaces par sections. L'opération artisanale du *lofting* se trouve alors remplacée par une procédure mathématique, indépendante de toute interprétation subjective ou savoir-faire manuel. Les résultats obtenus ne dépendent dès lors plus de l'appréciation qualitative de l'aspect des surfaces, mais d'une méthode numérique *définie* pour garantir la régularité géométrique souhaitée.

Cette méthode ne permet pas réellement de faire l'économie de la construction de prototypes physiques à l'échelle 1 : ceux-ci s'avèrent toujours indispensables à la visualisation des pièces en vue de leur fabrication<sup>20</sup>. Mais ces prototypes ne contiennent désormais *en théorie* aucune information qui ne puisse être recalculée au besoin à partir du modèle mathématique déterminé par le concepteur<sup>21</sup>. L'approche de Liming constitue ainsi en ce sens une des premières méthodes de conception *numérique* : la géométrie des pièces peut désormais être stockée exclusivement sous forme de tableaux contenant les coefficients des équations coniques utilisées. Faciles à conserver et reproduire, ces

19. Gerald Farin, « A History of Curves and Surfaces in CAGD », *op. cit.*, p. 3.

20. David J. Kasik, William Buxton et David R. Ferguson, « Ten CAD challenges », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, n° 2, 2005, p. 83.

21. Comme expliqué plus bas, la formalisation d'un modèle analogique reste en pratique toujours ambiguë.

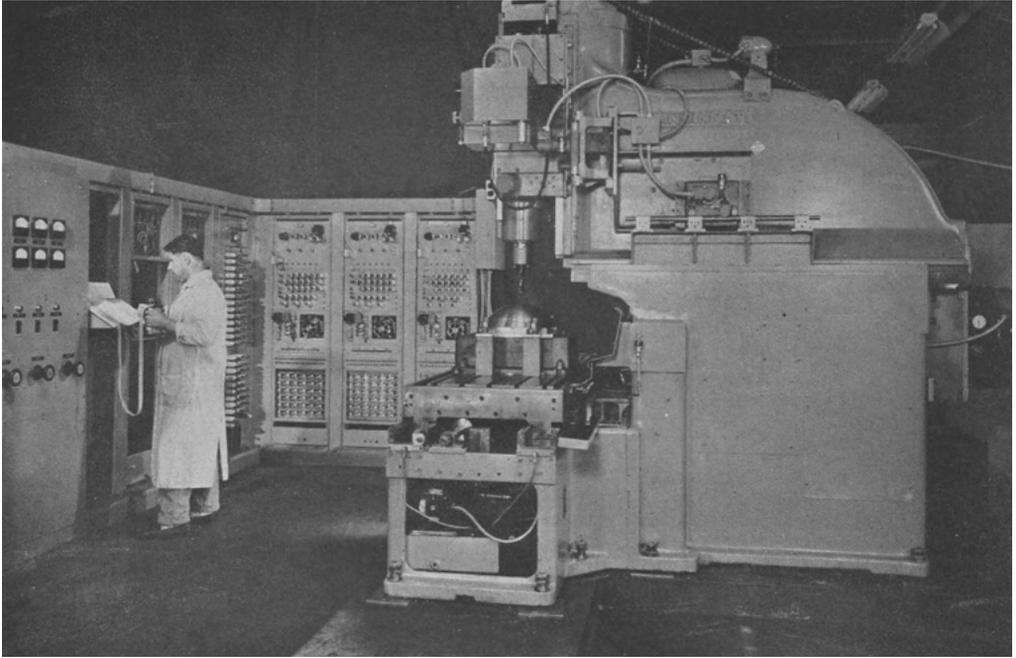


Fig. 3.5 — Développée au Servomechanisms Laboratory du MIT à partir de 1949, le premier prototype complet de fraiseuse à commande numérique était piloté par des instructions stockées sur des rubans perforés (source : Hartley E. Howe, « Teaching Power Tools to Run Themselves », *Popular Science*, vol. 167, n° 2, 1955, p. 107).

tables numériques rendent la fabrication d'un appareil moins dépendante de la préservation d'artefacts physiques, comme des modèles ou des plans à l'échelle 1.

Ce principe d'une « numérisation » des tracés de conception analogique sera largement développé par la suite dans les industries automobile et aéronautique. L'intérêt pour ces approches est indissociable du développement des machines à commande numérique, dont les premiers prototypes sont conçus à la fin des années 40 (figure 3.5). Initialement accueillies sans grand enthousiasme par l'industrie, ces machines seront progressivement adoptées aux États-Unis suite à une politique de subvention publique, visant à développer une technologie considérée d'importance stratégique dans le contexte de la guerre froide<sup>22</sup>. La popularité de ces machines augmentera significativement après leur inclusion dans l'exposition International Machine Tool Exhibition, organisée à Chicago en 1955<sup>23</sup>.

22. Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *op. cit.*, p. 38.

23. *Ibid.*, p. 38.

Ces machines doivent au départ être programmées directement : un opérateur saisit « manuellement » des instructions de contrôle visant à spécifier un « parcours d'outil » (*toolpath*), correspondant à la trajectoire mécanique que l'effecteur (fraise, forêt) devra suivre afin de produire la géométrie souhaitée. Outre son coût prohibitif en temps, cette saisie manuelle limite la complexité des formes géométriques accessibles à ces machines. En effet, un parcours d'outil ne se déduit pas simplement de la forme à produire, mais doit intégrer des facteurs « secondaires », rendant sa détermination complexe. Le premier de ces facteurs est la forme de l'outil, qui doit être prise en compte afin d'avoir le moins d'impact possible sur la géométrie produite. Le parcours d'outil visant à usiner une même surface sera ainsi différent selon le diamètre de la fraise utilisée ainsi que sa géométrie : toroïdale, sphérique<sup>24</sup>... Le second type de facteur à prendre en compte est d'ordre mécanique : le parcours d'outil calculé doit tenir compte des propriétés physiques du matériau utilisé et des capacités de la machine, pour éviter les incidents mécaniques et garantir le degré de finition souhaité. La détermination « manuelle » des parcours d'outil constitue donc une opération délicate, ce qui restreint dans un premier temps l'usage de la commande numérique à des tâches simples : perçage et forage « point par point », opérations de surfacage basiques<sup>25</sup>. Les premières machines numériques n'offrent donc au départ guère plus que la possibilité d'automatiser certaines opérations prédéfinies, ce qui explique sans doute en partie l'intérêt timide exprimé par les industriels dans un premier temps.

Un tournant s'amorce en 1959 avec la présentation du langage APT (Automatically Programmed Tools) par un consortium composé du MIT, de la Aircraft Industries Association (AIA) et de l'US Air Force<sup>26</sup>. Spécifiquement développé pour simplifier la programmation des machines à commande numérique, APT introduit une « surcouche » permettant à l'utilisateur de « programmer » directement la géométrie à réaliser, et non les coordonnées du parcours d'outil permettant d'y arriver. À partir d'une description mathématique de la forme à usiner, obtenue par combinaison de primitives géométriques (points, lignes, courbes...), le langage détermine la trajectoire optimale pour l'outil choisi. Tout en simplifiant l'utilisation des machines à commande numérique, APT introduit ainsi une évolution conceptuelle majeure : le processus de fabrication est désormais directement piloté par les spécifications du concepteur. Par la médiation de la programmation, le système notationnel utilisé par le concepteur acquiert une autorité supérieure : sa fonction prescriptive

---

24. Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *op. cit.*, p. 216.

25. Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *op. cit.*, p. 38.

26. Douglas T. Ross, « Origins of the APT Language for Automatically Programmed Tools », *ACM SIGPLAN Notices*, vol. 13, n° 8, 1978, p. 61.

se trouve augmentée d'une capacité *opératoire*. Comme le note Samuel Bianchini, toute l'entreprise informatique peut fondamentalement être ramenée à ce processus, visant à conférer à des systèmes de *symboles* (les programmes) une capacité d'action sur le monde<sup>27</sup>. Mais ce schéma conceptuel entraîne une contrainte importante. Pour devenir opératoire, les décisions de conception doivent se prêter à une formulation symbolique : elles doivent pouvoir s'exprimer à l'aide des primitives géométriques attendues par le langage APT. La commande numérique suppose une approche mathématique de la conception.

Au cours des années 60, cette contrainte va impulser le développement de nouvelles méthodes permettant la formalisation de plans analogiques. Inspirées par le succès de l'approche de Liming et rendues possibles par le développement des outils de calcul numérique, des techniques d'interpolation mathématique se développent, permettant de « couvrir » l'ensemble d'un modèle physique d'une carrosserie ou d'un fuselage à l'aide de « portions de surfaces » (*patches*). Ces portions sont calculées pièce par pièce, à partir d'une grille de point ou d'un réseau de courbes, relevés directement sur les modèles physiques<sup>28</sup>. Le succès de cette étape préliminaire de « prise de mesure » joue donc un rôle central dans la qualité de l'ensemble du processus d'interpolation. Afin d'en augmenter au maximum la précision, un ensemble de techniques sont développées et mises en application par l'industrie, incluant notamment des méthodes de numérisation 3D basées sur la technique de photogrammétrie<sup>29</sup> (figure 3.6).

L'avionneur Boeing, disposant déjà depuis le milieu des années 50 d'outils de conception basés sur les équations de Liming, va s'intéresser à ces nouvelles méthodes d'interpolation dès le début des années 60. En 1964, James Ferguson, membre d'une équipe de recherche de Boeing, publie une méthode d'interpolation<sup>30</sup> basée sur l'utilisation d'une famille de courbes polynomiales nommées « splines ». Nommées par analogie avec l'outil mécanique traditionnel, les splines représentent mathématiquement des fonctions définies par morceaux par des polynômes. Ceci signifie que la spline n'est pas décrite par une même formulation mathématique sur l'ensemble de son domaine de définition, mais par plusieurs formulations différentes (en l'occurrence polynomiales) définies sur des sous-domaines. Les points de la courbe correspondant à la connexion

---

27. Samuel Bianchini, « .exp : De l'expérimental à l'expérimentable », dans Élie During, Laurent Jeanpierre, Christophe Kihm et Dork Zabunyan (dir.), *In actu : De l'expérimental dans l'art*, Dijon, Presses du Réel, 2009, p. 286.

28. Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *op. cit.*, p. 38.

29. Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *op. cit.*, p. 4.

30. James Ferguson, « Multivariable Curve Interpolation », *Journal of the ACM*, vol. 11, n° 2, 1964, p. 221-228.

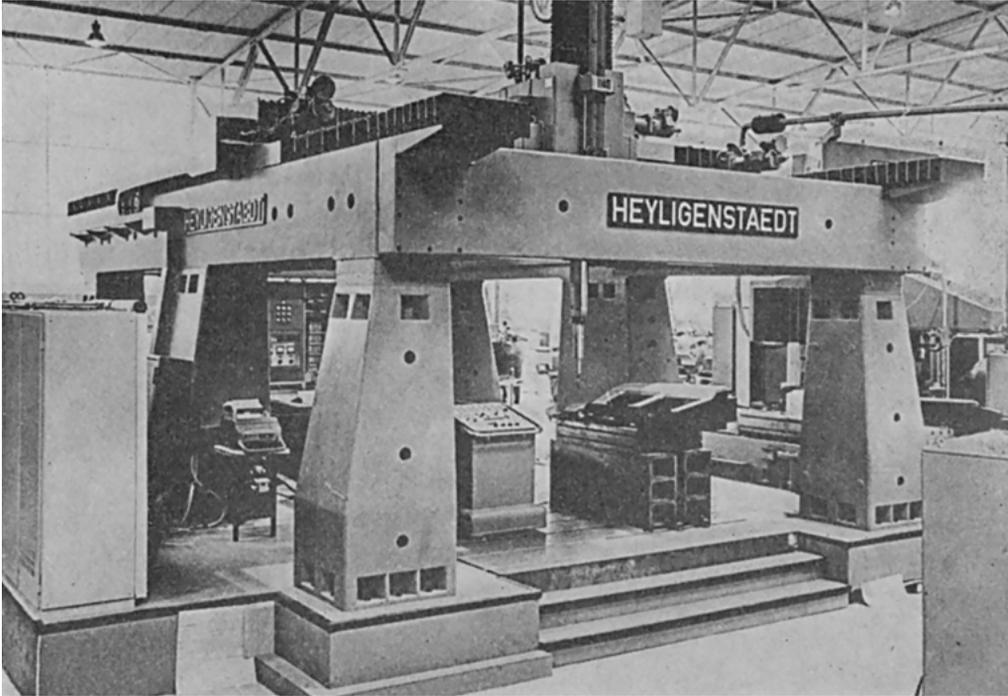


Fig. 3.6 — Scanner photogrammétrique en usage dans l'industrie automobile autour de 1970 (source : Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 321, n° 1545, 1971, p. 210).

de deux sous-domaines successifs sont classiquement appelés « nœuds » (*knots*). Ces nouveaux modèles mathématiques de courbes vont permettre à un chercheur du MIT, Steven A. Coons, de proposer une méthode de construction de portions de surfaces<sup>31</sup> : chaque portion, ou « patch », peut désormais être définie simplement à partir de la donnée des quatre courbes définissant son bord. Publiée en 1967<sup>32</sup>, cette méthode sera par la suite utilisée par le constructeur Ford, chez qui Coons travaille comme consultant<sup>33</sup>.

Les méthodes de construction de surfaces par « patches », comme celle de Steven A. Coons, permettent de construire un modèle mathématique d'une forme sur la base d'un petit nombre de courbes interpolées à partir de mesures physiques. Dotées d'un pouvoir descriptif suffisant pour s'adapter à la plupart des géométries, ces approches permettent dès lors d'obtenir des traductions mathématiques, formalisées, des modèles analogiques produits par les équipes

31. Gerald Farin, « A History of Curves and Surfaces in CAGD », *op. cit.*, p. 7.

32. Steven A. Coons, *Surfaces for Computer-Aided Design of Space Forms*, rapport technique, Cambridge, MIT, 1967.

33. Gerald Farin, « A History of Curves and Surfaces in CAGD », *op. cit.*, p. 8.

de conception. Mais elles échouent, cependant, à simplifier réellement la transition entre données de conception et instructions de pilotage des machines à commande numérique : plusieurs problèmes pratiques empêchent encore de mettre en place un processus opérant cette transition de manière automatisée et continue. Tout d'abord, si la « qualité » des connexions entre les portions de surface constituant le modèle d'ensemble est en partie assurée par les propriétés mathématiques des méthodes d'interpolation, l'évaluation qualitative d'un opérateur humain reste en pratique déterminante pour garantir l'obtention d'une forme suffisamment « lisse<sup>34</sup> » au niveau de ces connexions. Par ailleurs, la « prise de mesure » des coordonnées à interpoler sur les modèles physiques n'est pas réductible à une problématique de précision : il importe également de savoir distinguer ce qui relève d'une véritable intention de conception, de certaines inflexions et détails pouvant s'apparenter à du « bruit », ou un défaut de construction ou de finition du modèle physique<sup>35</sup> — une tâche reposant, en grande partie, sur le jugement des opérateurs humains en charge de l'interpolation. La décision d'interpoler ou non certains détails du modèle reste alors à la discrétion de ces opérateurs. Il en résulte, dès lors, une ambiguïté constitutive quant à la qualité de la formalisation mathématique réalisée, et l'impossible de se passer complètement du modèle analogique au profit de sa « mise en équation » : il peut en effet être nécessaire de se référer à tout moment au modèle pour contrôler la qualité du travail fourni par les opérateurs. En dépit des progrès réalisés jusqu'au milieu des années 60, les approches d'interpolation n'apportent donc qu'une réponse partielle aux problématiques rencontrées par le secteur industriel.

### 3.3 L'intégration CAO/FAO

Au milieu des années 60, Pierre Bézier forme un petit groupe de recherche au sein de la régie Renault, visant à dépasser les limitations des approches d'interpolation. Composé d'ingénieurs partageant l'idée que « l'information et les données devraient être exclusivement transmise sous forme numérique<sup>36</sup> » tout au long du processus de production des automobiles, ce groupe ne va pas chercher à adresser les défauts des méthodes d'interpolation existantes, mais proposer un nouveau paradigme de conception amenant les concepteurs à travailler dès le départ avec des données géométriques rigoureuses. L'objectif de cette recherche n'est rien d'autre que l'élimination des « maître modèles » produits

---

34. Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *op. cit.*, p. 39. Notre traduction.

35. Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *op. cit.*, p. 209.

36. *Ibid.*, p. 39. Notre traduction.

de manière analogique : dès lors que le concepteur exprime directement ses intentions sous un format numérique, la commande des machines de fabrication devient un processus linéaire et, par définition, exact. Les ingénieurs de Renault imaginent ainsi un système *interactif* de conception et fabrication, permettant la manipulation de courbes et surfaces mathématiques, leur visualisation, et finalement l'usinage par commande numérique de la forme spécifiée. Éliminant toute forme d'ambiguïté, le système vise par ailleurs à augmenter radicalement le rendement de la production : l'objectif est de pouvoir passer en quelques heures du tracé d'une courbe à l'usinage d'une surface en polystyrène, là où il fallait précédemment attendre plusieurs semaines, voire plusieurs mois, avant d'obtenir les premiers modèles analogiques d'une pièce<sup>37</sup>.

L'outil développé par Renault, baptisé UNISURF, constitue ainsi le premier exemple de système de conception et fabrication assistées par ordinateur (système de CAO/FAO, ou, en anglais CAD/CAM system). L'idée d'un passage continu, automatique et instantané entre conception et fabrication conduit parfois à parler d'*intégration* CAO/FAO, soulignant l'ambition synthétique portée par de tels systèmes. En pratique, UNISURF n'est pas un réel système de production : l'objectif n'est pas de réaliser les pièces métalliques définitives des voitures de série, mais essentiellement d'aboutir à un modèle physique permettant la visualisation et la révision des décisions des concepteurs. Cette fonction s'apparente en partie à celle traditionnellement remplie par les modèles analogiques, à l'exception d'une différence majeure : les modèles physiques usinés par UNISURF ne possèdent désormais plus aucune fonction prescriptive, car l'information de référence est définie, *en amont*, sous une forme numérique. En ce sens, UNISURF peut être vu comme la première véritable réalisation d'un projet dont les bases ont été posées par Roy Liming dans les années 40 : une « dématérialisation » des décisions de conception, reléguant la construction de modèles physiques à une pure fonction de visualisation. Le « changement de paradigme » ayant permis la réalisation de ce projet est l'abandon du processus de conception traditionnel, au profit d'une manipulation « directe » de données numériques.

C'est donc d'abord sur le plan conceptuel que résident les innovations introduites par Pierre Bézier et son équipe. En termes pratiques, le système UNISURF se compose d'un ordinateur, d'une machine à dessiner (figure 3.7) et d'une fraiseuse à commande numérique (figure 3.8). Les concepteurs définissent d'abord un jeu de courbes directrices sur une « maquette d'intention » préliminaire, modèle physique réalisé à l'échelle 1/5<sup>e</sup>. Il s'agit à la fois d'abstraire les caractéristiques stylistiques principales de ce modèle, et de définir un ensemble de « patches » permettant de construire la carrosserie par parties,

---

37. Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *op. cit.*, p. 39.



Fig. 3.7 — UNISURF : vue du système de dessin (source : Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 321, n° 1545, 1971, p. 212).

toutes usinables en une fois à l'aide de la machine à commande numérique. Chaque portion de surface ainsi définie donne ensuite lieu à un processus de conception et de fabrication numériques. Travaillant directement sur l'ordinateur, les concepteurs font exécuter à la machine une série de tracés jusqu'à l'obtention d'un jeu de courbes représentant adéquatement le bord de chaque « patch ». La saisie d'un ensemble de points intérieurs permet ensuite de compléter la définition de la surface. Une fois cette étape de conception réalisée, le système permet l'usinage direct d'un bloc de polystyrène, permettant l'appréciation immédiate des propriétés spatiales de la portion de surface considérée<sup>38</sup>.

Innovant par son approche, UNISURF a également conduit au développement d'un nouveau type de définition mathématique des courbes et surfaces, aujourd'hui connu sous le nom de « courbes et surfaces de Bézier ». En effet, si le système de Renault s'avérait relativement standard pour l'époque sur le plan de ses aspects mécanique et électronique<sup>39</sup>, sa nature « interactive » appe-

38. Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *op. cit.*, p. 211.

39. Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *op. cit.*, p. 38.

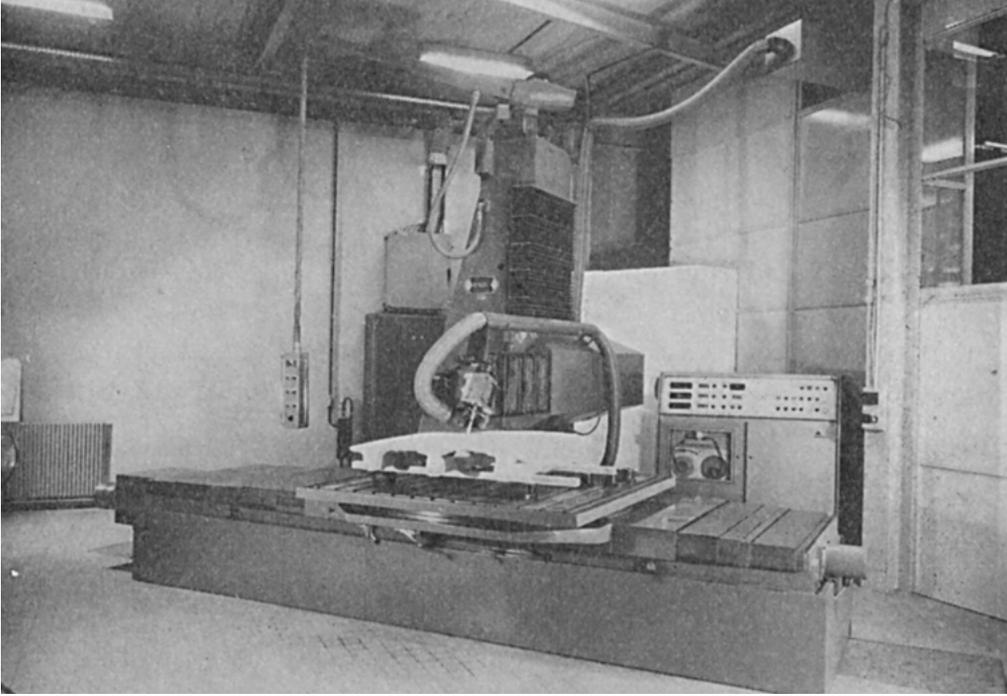


Fig. 3.8 — UNISURF : vue du système d'usinage (source : Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 321, n° 1545, 1971, p. 212).

lait à l'invention d'outils mathématiques plus aisément « manipulables » que les splines utilisées dans les méthodes d'interpolation. Les courbes (et surfaces) de Bézier ont donc été conçues pour répondre à l'impératif de baser le système sur un formalisme intuitif et accessible aux concepteurs, ne nécessitant pas l'acquisition d'autres notions mathématiques que celles usuellement attendues<sup>40</sup>. Le succès de ces courbes tient à la notion de « polygone de contrôle », une construction géométrique à la fois simple à manipuler et offrant la possibilité d'une définition mathématique rigoureuse d'une large gamme de formes. À l'exception de ses premier et dernier sommets, ce polygone de contrôle ne coïncide pas avec les points de la courbe : il détermine donc avant tout son aspect d'ensemble. Il est en réalité possible de considérer la courbe de Bézier comme une version « lissée » du polygone de contrôle : un algorithme récursif, inventé par le mathématicien Paul de Faget de Casteljaeu en 1963<sup>41</sup> et redé-

40. Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *op. cit.*, p. 209.

41. Paul de Faget de Casteljaeu, *Courbes et surfaces à pôles*, rapport technique, Paris, Citroën, 1963.

couvert indépendamment par un des membres de l'équipe de Pierre Bézier<sup>42</sup>, permet de construire simplement une courbe de Bézier à partir de son polygone de contrôle<sup>43</sup>. Cette définition purement géométrique constitue l'avantage principal des courbes de Bézier sur les méthodes basées sur des splines. Dans le cas des courbes de Bézier cubiques<sup>44</sup> utilisées dans le système UNISURF, la définition se réduit à la manipulation de quatre points de contrôle (figure 3.9), correspondant à des propriétés géométriques intuitives : la courbe est entièrement définie par la donnée de ses points de départ et d'arrivée (premier et dernier points de contrôles), ainsi que par ses tangentes en ces points (points de contrôles intérieurs).

Démarrée en 1965, la construction d'UNISURF prendra trois ans : le premier prototype voit le jour en 1968, et rencontre un bon accueil de la part des concepteurs. En 1972, Renault décide de s'équiper de cinq machines à dessiner supplémentaires, ainsi que de nombreuses fraiseuses numériques. Ces systèmes seront testés en parallèle des méthodes traditionnelles pendant trois ans. Il sera finalement décidé en 1975 d'en généraliser l'usage au sein de l'entreprise<sup>45</sup>.

Porté à la connaissance d'autres départements de recherche industriels et académiques, les succès d'UNISURF et des courbes de Bézier vont entraîner une vague de développements mathématiques au cours des années 70, conduisant à la formulation d'une représentation unifiée des courbes et surfaces. L'industrie aéronautique joue à nouveau un rôle majeur dans ces avancées. Dans les années 70, les équipes de conception de Boeing utilisent différents types de représentations géométriques, le plus souvent incompatibles entre elles : des approches basées sur des coniques, héritées des travaux de Liming, cohabitent avec les méthodes d'interpolation développées par Ferguson et Coons au cours des années 60. L'entreprise va tenter d'unifier ces méthodes en adoptant une représentation mathématique générale des courbes et surfaces. Elle choisit pour ce faire d'examiner le cas des « B-splines » (abréviation de l'anglais *basis splines*), une famille de courbes étudiée par Carl de Boor pour le compte de General

42. Gerald Farin, « A History of Curves and Surfaces in CAGD », *op. cit.*, p. 5.

43. Le travail de Paul de Faget de Casteljau avait en réalité conduit à la découverte du principe mêmes des courbes dites « de Bézier ». Embauché en 1959 par Citroën afin de développer une méthode de rationalisation de plans analogiques existants, de Casteljau a formulé le concept de « courbe à pôle », introduisant pour la première fois l'idée d'une définition des courbes à l'aide de polygones de contrôle (Paul de Faget de Casteljau, « De Casteljau's Autobiography: My Time at Citroën », *Computer Aided Geometric Design*, vol. 16, n° 7, 1999, p. 584). Mathématiquement équivalente à la formulation développée de manière indépendante par Pierre Bézier, cette approche fut cependant gardée secrète jusqu'en 1972 par Citroën, privant de Casteljau de la paternité de sa découverte (Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *op. cit.*, p. 39).

44. Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *op. cit.*, p. 211.

45. Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *op. cit.*, p. 40.

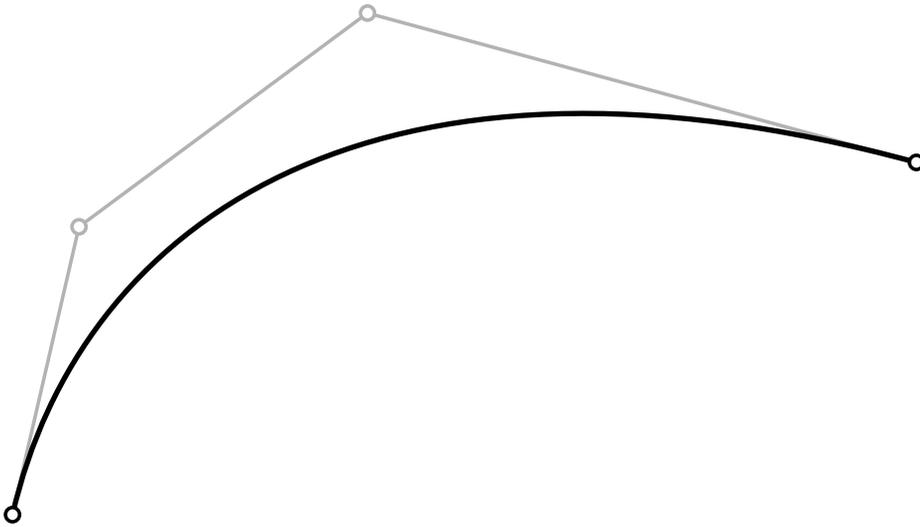


Fig. 3.9 — Courbe de Bézier cubique (en noir) et polygone de contrôle (en gris).

Motors en 1962<sup>46</sup>. Connues depuis 1946<sup>47</sup>, les B-splines deviennent grâce à de Boor utilisables dans le champ de la production numérique, en raison de la découverte d'un algorithme d'évaluation numérique efficace et stable<sup>48</sup>.

Mathématiquement, une *courbe B-spline* de degré  $p$  est une combinaison linéaire de *fonctions de base B-splines*, définies par morceaux<sup>49</sup>. La « partition » sur laquelle sont définies ces fonctions est donnée par un ensemble de  $m + 1$  nœuds  $\{t_0, \dots, t_m\}$ , comme dans le cas des courbes splines. Les fonctions de base B-splines sont des polynômes de degrés  $p$  construits par récurrence à partir de la donnée de ces nœuds :  $n + 1$  fonctions de base sont ainsi construites, où  $n = m - p - 1$ . La combinaison linéaire de ces fonctions permet d'engendrer une infinité de courbes B-splines, toutes définies par morceaux sur la même partition que les fonctions de base B-splines utilisées dans leur construction. Les  $n + 1$  coefficients de cette combinaison linéaire sont des points de l'espace, dont l'ensemble définit le « polygone de contrôle » de la courbe : pour un degré  $p$  et un ensemble de nœuds donnés, il est en effet possible, en pratique, d'explo-

46. Carl de Boor, « Bicubic Spline Interpolation », *Journal of Mathematics and Physics*, vol. 41, n° 1, 1962, p. 212-218.

47. Carl Schoenberg, « Contributions to the Problem of Approximation of Equidistant Data by Analytic Functions », *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 4, n° 2, p. 112-141.

48. Gerald Farin, « A History of Curves and Surfaces in CAGD », *op. cit.*, p. 9.

49. Les Piegl, « On NURBS: A Survey », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 11, n° 1, 1991, p. 57.

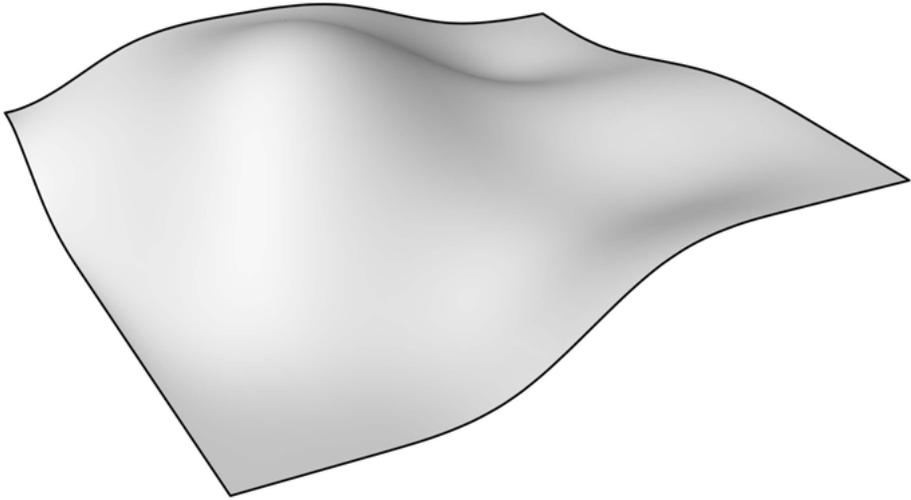


Fig. 3.10 — Surface NURBS de degré 3.

rer l'espace des formes accessibles en manipulant les sommets d'un polygone déterminant l'aspect d'ensemble des courbes obtenues. Les courbes B-splines s'avèrent donc à la fois similaires aux splines et aux courbes de Bézier, dont elles partagent la simplicité de manipulation : en 1977, Wolfgang Böhm montrera ainsi que les B-splines généralisent en réalité mathématiquement les courbes de Bézier<sup>50,51</sup>.

La possibilité d'une représentation générale des courbes de Bézier à partir des B-splines offrait des possibilités robustes de définition de portions de surfaces (« patches »); mais les courbes B-splines restaient incompatibles avec les coniques, nécessaires à la définition de formes élémentaires (cercle, ellipses...). Les chercheurs de Boing résoudre ce problème en 1979 avec l'adoption des courbes NURBS (Non-Uniform Rational Basis Spline, figure 3.10), employées

50. Wolfgang Böhm, « Cubic B-spline Curves and Surfaces in Computer Aided Geometric Design », *Computing*, vol. 19, n° 1, 1977, p. 29–34.

51. La courbe de Bézier cubique présentée sur la figure 3.9 peut ainsi être décrite comme une B-spline de degré  $p = 3$ , dotée de  $n + 1 = 4$  points de contrôle. Une application de la formule  $n = m - p - 1$  donne alors  $m = 7$ , ce qui implique un ensemble total de 8 nœuds. Cet ensemble se compose en réalité de deux groupes de quatre nœuds identiques, correspondant aux deux extrémités de la courbe : les courbes de Bézier ne possèdent ainsi aucun nœud « intérieur », et se caractérisent par une utilisation de multiples nœuds « répétés » à leurs extrémités. Cette multiplication peut s'interpréter comme une manière de contraindre la courbe à passer par ses premier et dernier point de contrôle (en conformité avec la définition des courbes de Bézier), ce qui n'est pas le cas en général pour les courbes B-splines. Précisons que si une courbe de Bézier donnée peut s'interpréter comme une courbe B-spline de même degré et possédant le même nombre de points de contrôle, les coordonnées même de ces points varient selon la description mathématique adoptée pour modéliser la courbe (B-spline ou Bézier).



Fig. 3.11 — Démonstration du logiciel Sketchpad (source : Ivan E. Sutherland, « Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System », thèse de doctorat, Cambridge, MIT, 1963, p. 3).

à partir de cette date comme représentation de référence dans le système de CAO Tiger, développé en interne par l'avionneur<sup>52</sup>. Mathématiquement, les NURBS généralisent les B-splines en ajoutant la possibilité de pondérer (par une série de coefficients multiplicateurs) les points de contrôle utilisés dans la combinaison linéaire des fonctions de base B-splines. Cette propriété leur permet de décrire un gamme beaucoup plus large de géométries, dont les coniques et d'autres courbes de « forme libre ». Leur première présentation exhaustive est due à Kenneth Versprille, dans sa thèse de doctorat réalisée sous la direction de Steven A. Coons<sup>53</sup>. Confiant dans la versatilité des NURBS, Boeing propose dès 1981 de les intégrer au standard d'échange de données géométriques IGES<sup>54</sup> (Initial Graphic Exchange Specifications). Cette représentation devient rapidement un standard de l'industrie, simplifiant l'échange de fichiers et la collaboration entre équipes de conception.

52. Les Piegl, « On NURBS: A Survey », *op. cit.*, p. 55.

53. Kenneth James Versprille, « Computer-Aided Design Applications of the Rational B-spline Approximation Form », thèse de doctorat, université de Syracuse, 1975.

54. Les Piegl, « On NURBS: A Survey », *op. cit.*, p. 56.

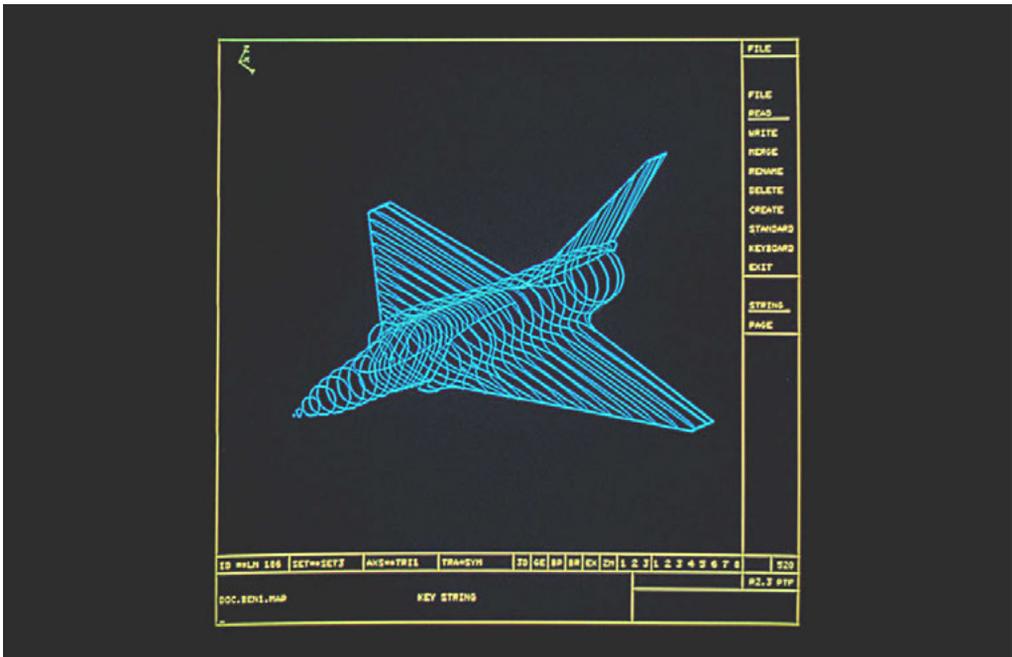


Fig. 3.12 — Capture d'écran de la version 3 du logiciel CATIA, 1988 (source : <http://avant.org/project/bonus-levels>).

Ces développements théoriques et l'augmentation des capacités de calcul et d'affichage des ordinateurs conduisent, au tournant des années 80, au développement des premiers logiciels de CAO munis d'interfaces graphiques, dont le principe avait été inventé en 1963 au MIT avec le logiciel Sketchpad d'Ivan E. Sutherland<sup>55</sup> (figure 3.11). Cette époque marque simultanément le développement d'un marché commercial pour de tels logiciels, jusqu'ici d'abord développés en interne par des entreprises comme Renault ou Boeing. En 1983, le logiciel Geomod, développé par la société SDRC (Structural Dynamics Research Corporation) devient le premier modeleur commercial entièrement basé sur les NURBS<sup>56</sup>. En 1981, le célèbre logiciel CATIA<sup>57</sup> (Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée, figure 3.12) est présenté par la société Dassault Systèmes, une filiale de Dassault Aviation créée spécifiquement pour le développement et la distribution de ce logiciel, basé sur un système développé en interne depuis 1977. Encore largement utilisé aujourd'hui, CATIA sera suivi par l'introduction d'autres logiciels de CAO dans le courant des an-

55. Ivan E. Sutherland, « Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System », thèse de doctorat, Cambridge, MIT, 1963.

56. Les Piegl, « On NURBS: A Survey », *op. cit.*, p. 56.

57. <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/catia> (consulté le 15 juin 2017).

nées 80 et 90, tels que SolidWorks<sup>58</sup>, Rhinoceros<sup>59</sup> et Inventor<sup>60</sup>. La pertinence de l'utilisation des NURBS dans ces logiciels à destination de l'ingénierie, de l'architecture ou de la conception industrielle n'a jusqu'à ce jour pas été démentie : en dépit de tentatives récentes de promouvoir d'autres modes de représentation<sup>61</sup>, les NURBS restent actuellement le mode de description surfacique de référence dans le domaine de la conception assistée par ordinateur.

### 3.4 Le pouvoir prescriptif de la conception numérique

L'utilisation industrielle des outils de CAO/FAO se concentre dans un premier temps sur deux types d'applications. Il s'agit tout d'abord d'assurer une fonction de prototypage, permettant aux concepteurs de visualiser et matérialiser rapidement des propositions de forme, favorisant ainsi le développement itératif d'un produit ou d'une pièce. Il s'agit ensuite de simplifier le passage à la production en série, en usinant certains composants requis par les machines-outils utilisées. L'intégration CAO/FAO ne contribue donc pas *directement* au processus de fabrication : en ce qui concerne la production effective des pièces finales, les outils à commande numérique laissent la place à des machines « classiques », obéissant à une logique de production en série perfectionnée depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle. Cette approche est notamment adoptée par Renault au début des années 70 : le système UNISURF ne vise pas à produire directement des carrosseries mais à permettre l'usinage de maquettes en polystyrène, ainsi que certains composants de la chaîne de fabrication industrielle : matrices d'emboutissages, électrodes de soudure<sup>62</sup>...

À la fin du xx<sup>e</sup> siècle, cette situation va évoluer à mesure que la chaîne technique de CAO/FAO se trouve de plus en plus mobilisée en vue de la fabrication de pièces « finales ». Bénéficiant d'une fiabilité accrue, d'une diffusion plus large et d'un coût opérationnel inférieur, les outils numériques deviennent compétitifs avec des procédés plus traditionnels, et commencent à

58. <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/solidworks> (consulté le 15 juin 2017).

59. <https://www.rhino3d.com> (consulté le 15 juin 2017).

60. <https://www.autodesk.fr/products/inventor> (consulté le 15 juin 2017).

61. On peut notamment citer, à cet égard, la technologie des T-splines, acquise en 2011 par Autodesk. Les T-splines proposent une tentative d'unification entre les NURBS et les surfaces de subdivision, une méthode de représentation mathématique des surfaces connue depuis les travaux d'Edwin Catmull et de James Clark en 1978 (Edwin Catmull et James Clark, « Recursively Generated B-spline Surfaces on Arbitrary Topological Meshes », *Computer-Aided-Design*, vol. 10, n° 6, 1978, p. 350-355). Très intuitives dans leur utilisation mais généralement considérées comme moins précises que les NURBS, les surfaces de subdivision sont traditionnellement privilégiées dans les industries des effets spéciaux, de l'animation et du jeu vidéo.

62. Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *op. cit.*, p. 216.

intervenir directement dans des contextes de fabrication en série. Initialement limitée à des cas particuliers (petites séries, pièces de précision...), cette utilisation sérielle de la commande numérique, dépassant le programme initial d'une utilisation dédiée au prototypage, annonce la possibilité tendancielle d'une généralisation du numérique à tous les niveaux de la production. L'avènement d'un nouveau paradigme de production « file to factory », fondé sur la capacité d'un passage continu « du fichier à l'usine », devient alors une possibilité tangible. Cette possibilité découle directement des avancées théoriques et technologiques mises en place à partir du milieu du xx<sup>e</sup> siècle. Le développement de la technologie des NURBS a en effet fourni, d'une part, un procédé standard de notation géométrique, facilitant le transfert des données formelles tout au long de la chaîne de production. D'autre part, le développement, amorcé par UNISURF, d'une approche *interactive* de la conception assistée par ordinateur, accompagné d'un accroissement rapide des capacités graphiques des machines, facilite la manipulation de ces données géométriques en dissimulant leur complexité derrière des interfaces utilisateur intuitives. Suivant un processus de croisement disciplinaire typique de l'informatique, la disponibilité de nouveaux modèles théoriques donne ainsi naissance à des schémas novateurs d'interaction homme-machine : un exemple remarquable est la notion de polygone de contrôle, constituant à la fois un mode de description élégant des surfaces complexes et un objet visuel simple à manipuler, ce qui lui confère une place centrale dans la plupart des logiciels de conception.

L'ensemble de ces développements conduit à l'émergence d'un nouveau paradigme de conception, fondé sur l'idée d'un passage continu entre intention, formalisation géométrique et matérialisation physique. Désormais capable d'un rôle prescriptif généralisé et étendu à l'étape de fabrication, la conception numérique réactive des questions anciennes, relatives à l'autorité des systèmes notationnels. Pour certains auteurs, l'adoption des outils de CAO pourrait ainsi permettre à l'architecture de réaliser le projet d'un « devenir allographique » total, dont Nelson Goodman semblait mentionner la possibilité dans *Langages of Art*<sup>63</sup>. Sans nécessairement souscrire à cette idée, il convient dans tous les cas de prendre acte d'un véritable décuplement de la capacité notationnelle des outils de conception à l'ère numérique<sup>64</sup>. Sans chercher à se rapporter à tout prix au dualisme autographique/allographique de Nelson

---

63. Saul Fischer, « Architectural Notation and Computer Aided Design », *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, vol. 58, n° 3, 2000, p. 273–289.

64. À tel point que Jeff Kowalski, Directeur de la technologie d'Autodesk, a récemment proposé une nouvelle interprétation de l'acronyme anglais CAD : *Computer Aided Documentation* au lieu de *Computer Aided Design* (Jeff Kowalski, « CAD is a Lie: Generative Design to the Rescue », *Line//Shape//Space*, 5 janvier 2016, en ligne : <http://lineshapespace.com/generative-design>, consulté le 27 juillet 2016).

Goodman, les premières formes d'utilisation systématique du numérique en architecture, comme le fameux musée Guggenheim Bilbao de Frank Gehry (achevé en 1997, figure 3.13), peuvent ainsi raisonnablement être analysées sous l'angle d'une augmentation radicale de l'autorité de l'étape de conception — et par conséquent, de l'autorité des concepteurs eux-mêmes.

Les logiciels de conception disponibles à partir des années 90 permettent en effet de quantifier et documenter un grand nombre de qualités spatiales et matérielles, autrefois difficilement transmissibles avec précision. De nombreuses spécifications traditionnellement véhiculées sous une forme discursive peuvent désormais être codifiées et *annotées*, sans restriction sur le niveau de description atteint. Chaque composant d'une pièce ou d'un édifice peut ainsi être décrit non seulement sur le plan géométrique, mais également physique et matériel, cette description pouvant dans certains cas s'étendre jusqu'à l'échelle de l'organisation interne du composant<sup>65</sup>. Sur la base de ces propriétés physiques, le comportement sous contrainte des matériaux (compression, tension...) peut être simulé et intégré aux décisions de conception. Un logiciel de CAO/FAO tel que SolidWorks propose également, via ses nombreuses extensions, de prendre en charge des opérations « métier » relatives au moulage, à la tôlerie, voire à l'ingénierie électronique. Il devient dès lors possible d'évaluer et spécifier de manière intégrée l'ensemble des étapes de fabrication de la pièce finale, et non plus simplement sa configuration « statique » et définitive. Dans le champ de l'architecture, les technologies de modélisation des données du bâtiment (*Building Information Modelling*, ou BIM) poussent aujourd'hui à l'extrême cette volonté d'intégration, en proposant un modèle numérique unique contenant toute l'information nécessaire à la construction, l'entretien, l'altération voire la démolition d'un édifice.

Cette fonction d'intégration se démarque comme une des innovations principales des outils de conception numérique, dépassant la simple capacité de spécification et de stockage de l'information. Des fonctions traditionnellement remplies par des médias distincts deviennent accessibles au sein d'un même environnement : description de qualités géométriques et spatiales, visualisation et évaluation des performances (rendu 3D et simulation), organisation logistique et matérielle, pilotage direct de certaines opérations de fabrication par l'intermédiaire du couplage CAO/FAO... C'est en ce sens qu'Antoine Picon, analysant les transformations opérées par le numérique dans le champ de l'architecture, retenait en 2004 « la possibilité d'un processus de documentation continue entre la pure représentation architecturale et les spécifications tech-

---

65. Neri Oxman, « Material-Based Design Computation », thèse de doctorat, Cambridge, MIT, 2010, p. 121.

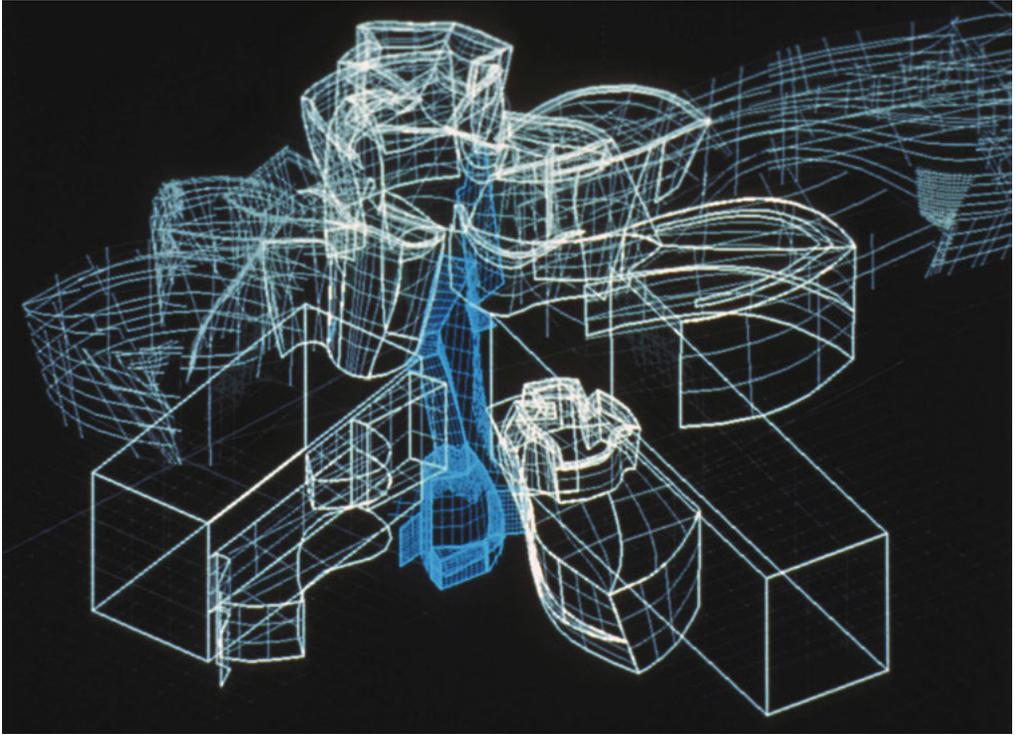


Fig. 3.13 — Frank Gehry, modèle numérique du musée Guggenheim Bilbao, 1993 (source : Kurt W. Forster, « Frank O. Gehry: Guggenheim Museum, Bilbao, 1991–1997 », dans Vittorio Magnano Lampugnani et Angeli Sachs (dir.), *Museums for a new millennium : concepts, projects, buildings*, Munich, Prestel, 1999, p. 124).

riques<sup>66</sup> ». Ce continuum de fonctions courant de la pure visualisation à la description technique n'est pas simplement constitué à des fins de simplification du flux de travail : couplées entre elles, ces fonctionnalités composent un nouveau paradigme de conception *numérique*, caractérisé par l'interaction de processus symboliques et opératoires.

---

66. Antoine Picon, « Architecture and the Virtual: Towards a New Materiality », *op. cit.*, p. 120. Notre traduction.



Deuxième partie

# Révolutions ? De l'identique au variable



## Chapitre 4

# Objectile et variabilité paramétrique

### 4.1 Vers une production non standard : 1993–2003

L'asservissement des moyens de fabrication à la technologie de commande numérique annonce un tournant historique dans l'histoire de la manufacture : pour la première fois depuis l'invention de l'imprimerie, la production de masse rompt avec la logique *matricielle*. Dans un mode de production numérique, les objets sont en effet fabriqués à partir de leurs spécifications mêmes, automatiquement traduisibles en instructions de contrôle. Obéissant à ces instructions, des robots dotés d'une capacité de mouvement sur deux, trois ou davantage de degrés de liberté procèdent à la soustraction ou la déposition directe de matière, produisant la forme souhaitée. Contrairement aux matrices utilisées dans l'emboutissage ou aux moules des procédés par injection, ces machines ne visent donc pas à informer la matière en un seul mouvement, mais procèdent par suivi d'une *trajectoire* calculée de manière spécifique. Elles se montrent en conséquence agnostiques par rapport à la forme à réaliser : seul importe qu'elles possèdent une latitude de déplacement suffisante.

Dans ce régime de production fondé sur l'idée d'un passage continu « du fichier à l'usine », la conception et la fabrication d'une *série de pièces uniques* devient théoriquement accessible au même titre que la duplication d'un objet standardisé. Ce scénario d'une « personnalisation de masse<sup>1</sup> » se pose à la fois comme une possibilité technique, théorique et *économique*. L'abandon de la logique matricielle, éliminant le besoin d'une fabrication de contre-formes et d'outils spécifiques pour chaque pièce à produire, invalide en effet en théorie<sup>2</sup>

---

1. L'expression « personnalisation de masse » (*mass customization*) a initialement été introduite par Stanley Davis dans son livre *Future Perfect* (Stanley M. Davis, *Future Perfect*, Boston, Addison-Wesley, 1987).

2. En pratique, la personnalisation de masse pose un certain nombre de problèmes, qui ne peuvent être abordés de manière générique. Dans le domaine de l'architecture, notamment, l'application à grande échelle d'un principe constructif basé sur l'utilisation d'éléments géométriques uniques s'est heurté, au cours des 20 dernières années, aux problèmes du transport et du stockage, entraînant le développement d'un vaste champ de recherche lié à l'utilisation de moyens de fabrication robotique « sur site » (*on site*). On peut ici citer notamment les travaux de Gramazio et Kohler à l'ETH de Zurich. Par ailleurs, il est intéressant de noter que certains programmes de recherche contemporains, comme celui de l'unité Large Scale Discrete Fabrication de la Bartlett School of Architecture, dirigé par Gilles

le principe d'économie d'échelle qui présidait jusque-là à l'organisation de la production moderne. Dans un mode de production pleinement numérique, produire des pièces toutes différentes n'entraîne pas de surcoût opérationnel par rapport à des éléments identiques : le seul travail supplémentaire impliqué consiste en la mise à jour — automatisable — d'instructions de contrôle entre deux usinages. S'il est évidemment possible d'utiliser les machines numériques dans la perspective d'une fabrication standardisée, rien n'y contraint donc par principe. Au niveau le plus fondamental, les modes de production numériques se distinguent ainsi du régime de production industriel par leur capacité à prendre en charge la *variation*<sup>3</sup>.

À partir de la seconde moitié des années 90, un ensemble d'architectes et de designers commencent à explorer le potentiel que représentent les outils numériques non plus simplement en termes de représentation et de formalisation géométrique, mais également dans leur capacité à prendre en charge la fabrication physique d'éléments complexes et « sur mesure ». Pour cette première génération de concepteurs numériques, les capacités de variation des modes de production numériques représentent l'opportunité d'un dépassement de la logique moderniste de la standardisation, ouvrant de nouvelles perspectives esthétiques, techniques et économiques. Ce nouveau mode de production *non standard* est expérimenté à deux niveaux : certains concepteurs exploitent immédiatement son potentiel pratique pour la production d'éléments de construction ou d'objets, tandis que d'autres adoptent une démarche plus spéculative, analysant plus largement son incidence sur les processus de conception, de fabrication et de diffusion.

En 2003, l'exposition *Architectures non standard*<sup>4</sup>, organisée au Centre Pompidou par Frédéric Migayrou et Zeynep Mennan (figure 4.1), rend compte d'une première décennie d'expérimentations conduites dans le champ de l'architecture et du design. Traitant d'échelles aussi variées que l'objet, l'édifice ou la ville, l'exposition « cherche à prendre la mesure des mutations sociales, éco-

---

Retsin et Manuel Jiménez García, participant d'un réinvestissement des idées modernistes de modularité dans le contexte d'une production numérique variable (Gilles Retsin et Manuel Jiménez García, « Computational Mereology: Large Scale Discrete Fabrication », 2015, en ligne : <http://www.bartlett.ucl.ac.uk/architecture/programmes/postgraduate/units-and-showcases/march-architectural-design/cluster4/2015-2016>, consulté le 4 janvier 2017).

3. Le livre *Future Shock* d'Alvin Toffler, paru en 1970, est l'un des premiers à présenter cette caractéristique à un large public : « la standardisation n'est imposée que par les technologies primitives. L'automation, au contraire, ouvre la possibilité d'une variété infinie, éblouissante, étourdissante (...). Pour de nombreux ingénieurs et experts commerciaux, la variété, à l'avenir, ne sera pas plus coûteuse que l'uniformité » (Alvin Toffler, *Future Shock*, New York, Random House, 1970, p. 236, notre traduction).

4. Frédéric Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), *op. cit.*



Fig. 4.1 — *Architectures non standard* : vue d'une installation présentant des maquettes et rendus de l'agence Asymptote (source : <http://www.asymptote.net/pompidou-slideshow>).

nomiques et politiques induites par une mise en œuvre généralisée d'une production "non standard" de l'architecture, du design, et des politiques territoriales et urbaines<sup>5</sup> ». L'approche mise en place par ses commissaires se définit d'abord comme une exploration conceptuelle, formelle et technique d'un « principe de continuité<sup>6</sup> » entre conception, fabrication et distribution, mis en place par l'instauration d'un « domaine computationnel généralisé<sup>7</sup> ». Les projets présentés soulignent dès lors, en premier lieu, la large diffusion d'une approche de la conception basée sur la modélisation mathématique de courbes et surfaces, fondés sur des principes de continuité et de calcul différentiel. Simultanément, l'exposition prend le parti pris de se refuser à considérer les outils numériques comme de purs moyens de représentation. Tranchant avec l'idée d'une « dématérialisation » de la production architecturale, elle présente au contraire ces outils comme la condition d'établissement d'un lien continu, linéaire, entre le régime purement virtuel de la conception et l'étape de ma-

5. *Ibid.*, p. 13.

6. *Ibid.*, p. 13.

7. *Ibid.*, p. 13.

térialisation physique : « [t]out projet non standard est en effet immédiatement déclinable en termes de production industrielle puisque susceptible de se traduire automatiquement, de se convertir en une faisabilité immédiate à toutes les étapes de sa réalisation sur la chaîne numérique<sup>8</sup> ». Reflet du lien intime entre les principes de continuité mathématique mobilisés par les outils de conception et l'avènement effectif d'un processus de production continu, la notion d'« architecture non standard » renvoie ainsi naturellement, au-delà de son inspiration d'ordre mathématique<sup>9</sup>, à l'idée d'un « refus de la normalisation, de la standardisation étendue comme facteur fondamental de l'industrialisation<sup>10</sup> ».

À un niveau fondamental, la notion de production non standard témoigne d'un changement profond de point de vue sur les outils numériques. Issus des secteurs automobile et aéronautique, ces outils sont initialement perçus comme le perfectionnement productiviste de régimes industriels existants. Quelques années plus tard, cette image est inversée par les concepteurs non standard, qui y voient au contraire de puissants instruments de libération par rapport aux logiques normatives de la production standardisée. La démocratisation de la fabrication numérique est alors perçue comme la possibilité d'un réinvestissement des moyens de production, annonçant, selon une logique aux résonances marxistes, une véritable « révolution numérique ». En filiation directe avec les idées du mouvement maker qui se développera quelques années plus tard, le non standard s'inscrit ainsi dans la tradition d'une critique du mode de production industriel, perçu comme une source d'aliénation.

De manière fondamentale, cette critique de la standardisation s'opère au prisme de la réintroduction d'une capacité de *variation* dans la production industrielle. Ce positionnement n'est pas sans rappeler les idées défendues par John Ruskin au XIX<sup>e</sup> siècle<sup>11</sup>. Témoin critique des premiers développements de la standardisation, Ruskin y oppose la variabilité naturelle de régimes de production artisanaux, comme celui du Gothique. Chez Ruskin, cette variabilité se retrouve investie d'une dimension vitale : résultant d'une réelle liberté d'initiative laissée à l'artisan et de la dimension inévitables des « erreurs » d'exécution dans tout travail manuel, elle permet en effet d'*incarner* la personne de l'artisan dans l'objet. L'objet artisanal s'oppose ainsi à l'abstraction de la mar-

8. Frédéric Migayrou, « Les ordres du non standard », *op. cit.*, p. 33.

9. Selon les commissaires de l'exposition, le terme « non standard » constitue une référence explicite à la théorie mathématique de l'*analyse non standard*, introduite par Abraham Robinson (Abraham Robinson, *Non-standard analysis*, Princeton, Princeton University Press, 1974). Quoi qu'intéressante, cette inspiration mathématique nous paraît cependant secondaire en regard de la compréhension plus immédiate de la notion de non standard comme opposition au standard industriel.

10. Frédéric Migayrou, « Les ordres du non standard », *op. cit.*, p. 26.

11. John Ruskin, *The Seven Lamps of Architecture*, Londres, Smith, Elder & Co., 1849.

chandise industrielle (que Marx qualifia plus tard de « fétichisme<sup>12</sup> »), dans la mesure où il ne peut-être apprécié (et échangé) indépendamment des rapports sociaux sous-tendant sa production.

Dans une logique similaire à la critique ruskinienne, les concepteurs et théoriciens contemporains font volontiers références au régime artisanal<sup>13</sup> dans leurs discussions de la portée critique de la variation. La notion d'« artisanat numérique » (*digital craft*), introduite en 1996 par Malcolm McCullough<sup>14</sup> et reprise par un grand nombre de théoriciens et de concepteurs<sup>15</sup>, témoigne plus largement de cette tendance à rapprocher conceptuellement la production numérique de régimes pré-industriels. Pour Mario Carpo, la logique numérique de la variation rompt en effet avec la logique « d'identité<sup>16</sup> » constituant le fond conceptuel du développement de la production moderne, depuis l'invention des premières technologies de reproduction matricielle à la Renaissance jusqu'aux développements de la standardisation industrielle aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Rompant avec la loi du standard, la production numérique se rapprocherait alors automatiquement des régimes artisanaux antérieurs. L'ère industrielle apparaîtrait en ce sens comme un interlude relativement bref dans une histoire de la manufacture temporellement dominée par la variation.

De manière cruciale, cette résurgence d'un mode de production variable, renvoyant aux modes d'organisation pré-industriels et artisanaux, est fréquemment interprétée comme un dépassement du paradigme albertien, autrement dit comme la remise en cause d'une définition du « concepteur » en tant qu'auteur purement intellectuel, indifférent à l'acte matériel de fabrication. Dans la plupart de ses usages, la notion d'artisanat numérique renvoie en effet à l'idée d'une érosion des frontières, tant conceptuelles que pratiques, entre conception et fabrication. En vertu de l'intégration CAO/FAO et plus généralement des nouvelles relations de *continuité* caractérisant la production non standard, la conception d'un artefact ne saurait désormais être définie comme un processus intrinsèquement séparé de sa matérialisation physique. Désormais autant

---

12. Karl Marx, *Le Capital*, traduction de Jean-Pierre Lefebvre, Paris, Presses Universitaires de France, 1993, p. 81.

13. On peut notamment citer ici le livre de Lars Spuybroek : Lars Spuybroek, *The Sympathy of Things: Ruskin and the Ecology of Design*, Rotterdam, V2\_, 2011. Nous en proposons une analyse dans la section 6.1.

14. Malcolm McCullough, *Abstracting Craft: The Practiced Digital Hand*, Cambridge, MIT Press, 1996.

15. Les occurrences de l'expression « artisanat numérique » sont aujourd'hui très nombreuses, tant dans la littérature « spécialisée » que dans des publications plus généralistes. Outre le texte original de McCullough, on se bornera à signaler ici la parution d'un ouvrage généraliste récent : Lucy Johnston, *Digital Handmade: Craftsmanship and the New Industrial Revolution*, London, Thames & Hudson, 2015.

16. Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, *op. cit.*, p. x. Notre traduction.

engagés dans les logiques intellectuelles du projet qu’avec la matérialité de la fabrication, les concepteurs — qu’il conviendrait donc, au sens strict, de ne plus appeler ainsi — se rapprocheraient d’une position artisanale, intervenant sur l’ensemble de la chaîne de production :

« (...) due to CAD-CAM integration, and counter to the Albertian principle of separation between notation and construction, digital architects today are increasingly designing and making at the same time. Acting almost like prosthetic extensions of the hands of the artisan, digital design and fabrication tools are creating a curiously high-tech analog of preindustrial artisanal practices<sup>17</sup>. »

## 4.2 Objectile

Les rapprochements théoriques entre régimes de production numérique et artisanale n’échappent cependant pas de profondes différences touchant à la nature de leur rapport à la variation. Contrairement à la variation artisanale, fruit d’un travail manuel et toujours singulier, la variation numérique est en effet fondamentalement mécanique et automatisable. Comme le souligne Mario Carpo :

« To a much greater extent than was conceivable at the time of manual technologies, when every case was dealt with on its own merit, and individual variations were discussed, negotiated, and custom-made on demand, the very same process of differentiation can now be scripted, programmed, and to some extent designed. Variability can now become a part of an automated design and production chain<sup>18</sup>. »

Tout en signalant l’érosion de la logique de standardisation, les capacités de variation « non standard » se posent ainsi comme les conséquences directes de développements *industriels* amorcés à partir des années 1970, signalant un tournant dans le rapprochement et l’intégration des logiques de conception et de fabrication numériques (notamment à travers des systèmes comme UNISURF), et plus largement dans le perfectionnement des technologies d’automation<sup>19</sup>.

Cet avènement d’un régime industriel de variation est brièvement analysé en 1988 par Gilles Deleuze, dans un passage de son ouvrage *Le Pli : Leibniz et*

---

17. *Ibid.*, p. 45.

18. *Ibid.*, p. 7.

19. Achim Menges, « The New Cyber-physical Making in Architecture: Computational Construction », *Architectural Design*, vol. 85, n° 8, 2015, p. 30.

*le Baroque*<sup>20</sup>, consacré à la métaphysique de Leibniz. Cette discussion, d'une importance capitale pour la première génération de concepteurs numériques, prend place dans le chapitre 3 du livre, consacré à l'invention *mathématique* de la notion de la variation. Les travaux philosophiques de Leibniz s'accompagnent en effet d'importantes contributions mathématiques dans le domaine du « calcul différentiel » (*calculus* en anglais), dont on peut généralement définir l'objet comme l'étude du « taux de variation » d'une quantité par rapport à une autre<sup>21</sup>. Inventeur de cette discipline aux côtés d'Isaac Newton, Leibniz introduit notamment la célèbre notation  $df/dx$ , exprimant la dérivée de  $f$  par rapport à  $x$  comme le rapport de l'« accroissement infinitésimal » de  $f$  en réponse à une « variation infinitésimale » de  $x$ <sup>22</sup>.

Deleuze commence tout d'abord par noter que les mathématiques baroques, premières à s'intéresser à la question de la variation, introduisent non seulement la notion de fonction mais aussi une nouvelle pensée *fonctionnelle*, variable, de l'objet. Deleuze signale alors que cette idée correspond à une « conception très moderne de l'objet technologique », établissant un lien explicite avec la production non standard :

« [Cette conception] ne renvoie même pas aux débuts de l'ère industrielle où l'idée du standard maintenait encore un semblant d'essence et imposait une loi de constance (« l'objet produit par les masses et pour les masses »), mais à notre situation actuelle, quand la fluctuation de la norme remplace la permanence d'une loi, quand l'objet prend place dans un continuum par variation, quand la productique ou la machine à commande numérique se substituent à l'emboutissage<sup>23</sup>. »

Deleuze ne décrit pas tant ici la capacité générale de variation de la chaîne numérique que la mise en œuvre de cette capacité dans la production d'un type particulier d'objet, dont la *variabilité intrinsèque* trouve à se déployer

20. Gilles Deleuze, *Le pli : Leibniz et le baroque*, op. cit., p. 26.

21. Christopher Clapham et James Nicholson, *The Concise Oxford Dictionary of Mathematics*, Oxford, Oxford University Press, 2009, p. 231.

22. Le développement de l'analyse moderne à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle a entièrement remplacé la notion d'infinitésimal par celle de limite, de sorte qu'aujourd'hui la formule  $df/dx$  ne joue plus qu'un rôle symbolique : elle désigne la dérivée de la fonction  $f$  par rapport à  $x$ , et ne doit pas être interprétée comme un réel quotient de deux quantités infinitésimales. Deux exceptions doivent cependant être notées. D'une part, l'analyse non standard permet aujourd'hui une définition mathématique rigoureuse de la notion d'« infiniment petit », ce qui permet effectivement de définir  $df/dx$  comme un quotient. D'autre part, la physique « classique » continue d'user largement d'une définition intuitive de la notion infinitésimale, permettant des raisonnements plus « visuels » que la notion de limite : l'infinitésimal  $dx$  est alors interprétée comme une « variation élémentaire » de la quantité  $x$ .

23. Gilles Deleuze, *Le pli : Leibniz et le baroque*, op. cit., p. 26.

sous la forme d'un « continuum » d'artefacts différenciés. Cet objet, Deleuze le nomme *objectile*. Pour Deleuze, l'objectile n'est plus défini ontologiquement par une forme fixe (une « essence »), mais par une logique d'ordre *fonctionnel*, encodant un espace de variation formel :

« L'objet ne se définit plus par une forme essentielle, mais atteint à une fonctionnalité pure, comme déclinant une famille de courbes encadrées par des paramètres, inséparables d'une série de déclinaisons possibles ou d'une surface à courbure variable qu'il décrit lui-même. Appelons *objectile* ce nouvel objet<sup>24</sup>. »

Saisissant les enjeux conceptuels majeurs de la production non standard (variabilité, continuité), le concept d'objectile sera largement repris par les concepteurs et théoriciens de la première génération numérique. Ce plébiscite s'explique en premier lieu par la possibilité d'une transposition directe de la notion d'objectile aux modèles mathématiques utilisés dans les outils de conception et fabrication numériques. À la suite d'une première discussion des contributions de Leibniz au domaine du calcul différentiel, le texte de Gilles Deleuze propose en effet une « traduction » mathématique du concept d'objectile, l'identifiant à un ensemble paramétré de courbes, représenté par une notation fonctionnelle générique. En vertu de cette formulation, la notion d'objectile semble dès lors renvoyer très concrètement aux modèles mathématiques de courbes et de surfaces utilisés dans les outils numériques, comme les NURBS. Bien que constituant au sens propre une comparaison et non une définition (l'objectile est décrit « *comme* déclinant une famille de courbes encadrées par des paramètres<sup>25</sup> »), cette compréhension mathématique du concept d'objectile trouve une très forte résonance avec les transformations vécues au sein des pratiques de conception numérique au cours des années 1990. En effet, les courbes NURBS, auparavant réservées à l'industrie, connaissent alors une très forte diffusion et deviennent pour la première fois accessibles à un large public de concepteurs<sup>26</sup>, à travers des logiciels qualifiés de *modeleurs paramétriques*<sup>27</sup>. Les notions de « calcul différentiel » et de « topologie » commencent alors à infuser les débats théoriques : comme le note Greg Lynn, « [i]l ne fait aucun doute que c'est grâce à l'essor des techniques de visualisation assistée par ordinateur que les architectes ont pu, pour la première fois, expérimenter

24. *Ibid.*, p. 26.

25. *Ibid.*, p. 26. Nos italiques.

26. Autrement dit, à des concepteurs non rattachés exclusivement à des secteurs de l'industrie « lourde », comme l'automobile et l'aéronautique.

27. Comme CATIA, utilisé notamment par Frank Gehry.

avec des formes basées sur le calcul différentiel<sup>28</sup> ». Dans ce contexte, la notion d'objectile apparaît alors comme un puissant outil théorique, établissant un lien direct avec les capacités « paramétriques » des nouveaux outils de conception informatisés.

L'objectile montre en effet que ces outils numériques sont liés à une notion plus précise que la simple variation : celle de la *variabilité*<sup>29</sup>. Là où la variation indique seulement l'expression d'un changement, l'idée de variabilité, ou littéralement de « capacité à varier », renvoie à la genericité de la notation mathématique<sup>30</sup>, porteuse d'une infinité de réalisations potentielles. « Encadrées » par l'unité du formalisme mathématique, ces réalisations produisent des objets à la fois singuliers, et inscrits continûment dans une « série de déclinaisons possibles<sup>31</sup> ». Composées d'éléments hétérogènes mais traversées par une cohérence d'ensemble, de telles séries sont parfois qualifiées de « séries non standard » (autrement dit, de séries *variables*), dans un double mouvement de distinction et de référence par rapport à la production industrielle standardisée : le terme de « série » se dissocie ici de l'idée de reproductibilité identique, mais continue de renvoyer à un ensemble cohérent, dont le modèle n'est désormais plus un type standardisé mais un *objectile* (dans sa compréhension mathématique) ou, pour reprendre un terme introduit par Greg Lynn, un « multi-type<sup>32</sup> ».

### 4.3 Variabilité paramétrique

Ce rapprochement entre objectile et outils de modélisation « paramétriques » amène cependant à considérer plus précisément la notion même de

---

28. Greg Lynn, *Animate Form*, New York, Princeton Architectural Press, 1999, p. 16. Notre traduction.

29. Dans un texte publié dans le catalogue de l'exposition *Architectures non standard*, Greg Lynn indique que l'enjeu de la fabrication numérique ne réside pas dans une *variété* accrue, mais dans la mise en œuvre d'une logique de *variation*. Cette opposition opère une distinction similaire à celle que nous développons ici entre variation et variabilité, en dépit d'un choix lexical différent (la variation de Greg Lynn correspondrait davantage à notre idée de variabilité). Si la variété revient à « tout autoriser », la « variation » renvoie à l'existence d'un ordre sous-jacent, dans un sens proche de la notion « d'encadrement » mathématique d'une famille de courbes utilisé par Deleuze : « la variation implique une organisation et une structure aux multiples niveaux d'un ordre hiérarchique interdépendant » (Greg Lynn, « Variations calculées », dans Frédéric Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), Paris, Centre Pompidou, 2003, p. 90–92).

30. Mario Carpo, « Parametric Notations: The Birth of the Non-Standard », *Architectural Design*, vol. 86, n° 2, 2016, p. 26.

31. Gilles Deleuze, *Le pli : Leibniz et le baroque*, op. cit., p. 26.

32. Greg Lynn, *Animate Form*, op. cit., p. 13. Notre traduction.

*paramètre*. En effet, si Deleuze se réfère dans sa discussion du concept d'objectile à une notion d'ordre mathématique, les concepteurs non standard — et plus largement, les concepteurs numériques — possèdent leur propre compréhension des termes « paramètres » et « paramétrique ». Or, ces usages ne sont pas sans ambiguïté : on peut en effet identifier au moins trois acceptions pertinentes du terme de « paramètre » dans le cadre de la production numérique. Si deux de ces acceptions renvoient directement à des définitions mathématiques, un troisième sens correspond à un usage spécifique aux pratiques de conception. L'examen précis de ces significations s'avère alors indispensable pour réexaminer les modalités d'une transposition du vocabulaire deleuzien aux pratiques de la conception numérique non standard.

Un premier sens possible du terme « paramétrique » renvoie à la notion mathématique d'*équation paramétrique*. Par définition<sup>33</sup>, l'équation paramétrique d'une courbe exprime les coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  de ses points à partir d'un paramètre  $u$ , de sorte qu'à chaque point de la courbe corresponde une unique valeur de  $u$ . Ainsi, le jeu d'équations paramétriques  $x = \cos(u)$  et  $y = \sin(u)$  définit, en deux dimensions, une géométrie bien précise : le cercle de centre  $(0, 0)$  et de rayon 1. Lorsqu'on fait varier le paramètre  $t$  entre 0 et  $2\pi$ , on obtient l'ensemble des coordonnées  $(x, y)$  des points du cercle. Cette définition se généralise pour les surfaces, dont les points sont exprimés à l'aide de deux paramètres, classiquement appelés  $u$  et  $v$ . Une équation paramétrique permet ainsi de décrire *explicitement* un ensemble géométrique : elle permet de calculer simplement les coordonnées de tout point appartenant à l'ensemble — courbe ou surface — à partir du choix des valeurs d'un jeu de paramètres. Par extension, les modèles mathématiques de courbes et de surfaces *définis* à l'aide d'équations paramétriques sont parfois eux-mêmes qualifiés de paramétriques. Tel est par exemple le cas des surfaces NURBS, souvent qualifiées de « surfaces paramétriques » dans la littérature informatique.

Au sens strict, la notion d'équation paramétrique ne renvoie donc pas à la description générique d'une *famille* de courbes ou de surfaces, mais d'un ensemble de points composant *une* courbe ou *une* surface. Mathématiquement, une équation paramétrique permet ainsi la description *intrinsèque* d'une géométrie donnée, à l'aide de coordonnées « locales » nommées paramètres. Ce mode de description s'oppose à une description *extrinsèque*, basée sur les coordonnées cartésiennes « globales »  $x$ ,  $y$  et  $z$  : une équation paramétrique ne fournit en fait rien d'autre que la « formule » permettant la conversion entre coordonnées intrinsèques et globales. La notion d'équation paramétrique se

---

33. Christopher Clapham et James Nicholson, *The Concise Oxford Dictionary of Mathematics*, *op. cit.*, p. 584.

révèle donc *a priori* conceptuellement distincte de l'interprétation usuelle de l'objectile comme générateur d'une *série* variable d'objets géométriques.

S'il est important de souligner les différences entre ce premier sens mathématique du terme « paramètre » et les interprétations classiques de l'objectile, cette notion d'équation paramétrique semble pourtant avoir été prise en compte par Deleuze dans la construction de l'analogie mathématique introduisant son concept. La formulation originale de Gilles Deleuze précise en effet que l'objectile, en tant que « famille de courbes encadrées par des paramètres », s'avérerait inséparable « d'une série de déclinaisons possibles » ou « d'une surface à courbure variable qu'il décrit lui-même<sup>34</sup> ». Il est raisonnablement permis de penser que Deleuze souligne ici la possibilité de décrire une surface paramétrique comme ensemble de courbes infiniment rapprochées. Ce point de vue est en effet parfaitement valable sur le plan mathématique. Une surface définie par l'équation paramétrique  $(x, y, z) = S(u, v)$ , pour  $u \in [0, 1]$  et  $v \in [0, 1]$  peut en effet être représentée par une série de courbes paramétrées en  $u$ . Il suffit pour cela de considérer l'ensemble des fonctions :

$$u \mapsto S(u, v_0), \text{ avec } u \in [0, 1].$$

Chacune de ces fonctions, définissant une courbe d'équation  $(x, y, z) = S(u, v_0)$ , s'obtient en *fixant* dans l'équation de  $S$  le paramètre  $v$  à une valeur particulière, notée ici par  $v_0$ <sup>35</sup>. En faisant décrire à  $v_0$  toute la plage de valeurs possibles pour  $v$ , c'est-à-dire  $[0, 1]$ , on obtient alors une famille de courbes décrivant la surface  $S$  d'origine ou, selon un autre point de vue, un « découpage » de cette surface comme famille de courbes<sup>36</sup>.

Cependant, ce point de vue paraît *a priori* plus restrictif que la compréhension usuelle de l'objectile dans le champ de la production numérique non standard. En effet, si l'analogie proposée par Gilles Deleuze permet la génération d'une famille de *courbes* à partir d'une surface paramétrique, les concepteurs s'intéressent en général davantage à la possibilité de générer une série variable de *surfaces*. Nous touchons ici à un point problématique de la transposition de l'analogie mathématique proposée par Deleuze à la production non standard : comment généraliser cette analogie à l'idée d'une notation générique d'un ensemble de surfaces ?

Une première solution pourrait être de reproduire le raisonnement suivi (à notre sens) par Gilles Deleuze à une dimension supérieure. De la même manière que la génération d'une famille variable de courbes est ici envisagée sous l'angle d'une réduction « isoparamétrique » de dimensions à partir de l'équa-

34. Gilles Deleuze, *Le pli : Leibniz et le baroque*, op. cit., p. 26.

35. Chacune de ces courbes constitue alors une courbe *isoparamétrique* de la surface  $S$ .

36. Ce processus peut bien évidemment être reproduit en inversant les rôles de  $u$  et  $v$ .

tion d'une surface (passage de 2 à 1 dimension par fixation des valeurs de l'un des paramètres  $u$  ou  $v$ ), on pourrait concevoir la génération d'un ensemble variable de surfaces comme processus de réduction dimensionnelle à partir d'un ensemble de dimension plus élevée. Autrement dit, la génération d'une famille variable de surfaces s'interpréterait alors comme un processus d'extraction isoparamétrique d'ensembles en 2 dimensions (surfaces) à partir d'un ensemble défini par 3 degrés de libertés (« hypersurface »), c'est-à-dire par 3 paramètres  $u$ ,  $v$ , et  $t$ . Cependant, de même qu'une surface (définie par deux degrés de liberté  $u$  et  $v$ ) doit être plongée dans un espace en 3 dimensions, un objet mathématique à 3 degrés de libertés ne peut être visualisé de manière générale que dans un espace en 4 dimensions (d'où notre utilisation précédente du terme « hypersurface »). L'objet mathématique encodant la génération variable d'une famille de surfaces ne peut donc être représenté de manière compatible avec notre perception tridimensionnelle de l'espace. La seule manière d'appréhender visuellement cet objet réside dès lors dans l'adoption d'un point de vue *temporel*, ramenant la quatrième dimension d'espace « manquante » à une dimension de temps. Cet objet peut dès lors être considéré comme une surface *temporellement* variable, visualisable, à tout moment, dans un espace en 3 dimensions.

Tel est notamment le point de vue adopté par Greg Lynn dans son essai *Animate Form*<sup>37</sup>. Comme Greg Lynn le précise dès l'introduction, la notion d'une forme *animée* ne doit pas être confondue avec celle d'une forme « en mouvement ». Contrairement au mouvement, recouvrant l'idée d'une simple reconfiguration géométrique, l'animation conçoit toute dynamique spatiale en lien immédiat avec les forces et flux guidant son évolution<sup>38</sup>. Entendue ainsi, la notion d'animation se rattache alors directement à notre lecture temporelle de l'analogie mathématique proposée par Deleuze. Greg Lynn introduit ainsi dans *Animate Form* l'idée d'une *sédimentation* des flux et champs de forces sous la forme d'un *paysage topologique*, nommé « enveloppe de performance<sup>39</sup> » ou « multi-type ». Inspirée de l'image du « paysage épigénétique » introduite par Conrad Hal Waddington<sup>40</sup>, cette enveloppe représente *spatialement* l'évolution d'une forme dans son environnement<sup>41</sup>. L'animation temporelle d'une forme se rapporte alors au parcours d'une trajectoire dans un paysage topologique où le temps joue le rôle d'une dimension d'espace<sup>42</sup>. Dans ce contexte,

---

37. Greg Lynn, *Animate Form*, *op. cit.*

38. *Ibid.*, p. 9.

39. *Ibid.*, p. 13. Notre traduction.

40. Conrad Hal Waddington, *The Strategy of the Genes: A Discussion of Some Aspects of Theoretical Biology*, Londres, Allen & Unwin, 1957.

41. Greg Lynn, *Animate Form*, *op. cit.*, p. 33.

42. Pour une discussion de la notion de paysage épigénétique, et de son inscription dans le cadre de la théorie morphogénétique de Conrad Hal Waddington, on pourra notamment se

le processus d'*instanciation*<sup>43</sup> d'un multi-type peut être compris comme l'extraction d'un ou plusieurs *instantanés* à partir d'une séquence temporelle<sup>44</sup>. Ce programme conceptuel explique le fort intérêt de Greg Lynn pour l'usage de logiciels d'animation issus de l'industrie des effets spéciaux. Par leur nature même, ces outils inscrivent en effet leurs capacités de simulation dynamiques dans le cadre d'un paradigme d'affichage image par image, permettant d'extraire un ensemble d'instances formant une série variable par la définition de points clés (« keyframing<sup>45</sup> »).

La théorie de la variabilité numérique proposée par Greg Lynn dans *Animate Form* constitue ainsi, à notre sens, l'une des interprétations les plus fidèles de l'« interprétation » mathématique deleuzienne du concept d'objectif dans le champ de la production numérique non standard : elle s'avère en effet compatible avec la notion d'équation paramétrique, se rapportant dès lors au vocabulaire employé par Gilles Deleuze dans la formulation de son analogie. Cependant, cette approche ne rejoint sans doute pas la compréhension la plus courante du terme « paramètre » : la plupart des interprétations usuelles du texte de Gilles Deleuze semblent en effet s'appuyer sur une compréhension plus intuitive de la notion de paramètre, renvoyant à l'idée d'une notation mathématique générique.

Au niveau le plus fondamental, l'expression mathématique de l'idée de généralité s'opère à travers le concept de *variable*. Une variable désigne un « espace réservé » (*placeholder*) dans la notation formalisée d'un objet mathématique, destiné à être remplacé par la *valeur* particulière d'une entité (nombre entier, réel, fonction. . .). Une notation utilisant des variables constitue par définition un objet générique, encodant une forme de variabilité : ainsi, l'équation  $y = x^2$  peut être comprise comme la définition d'une parabole, c'est-à-dire d'un ensemble géométrique, dans la mesure où elle définit de manière générique la relation entre coordonnées (abscisse  $x$  et ordonnée  $y$ ) satisfaite par tout point appartenant à cet ensemble. La relation  $y = x^2$  peut en ce sens s'interpréter comme la « formule » génératrice de la *série variable* de points appartenant à la parabole.

---

référer à l'analyse présentée par Sara Franceschelli dans : Sara Franceschelli, « Morphogenèse, stabilité structurelle et paysage épigénétique », dans Annick Lesne et Paul Bourguin (dir.), *Morphogenèse : L'origine des formes*, Paris, Belin, 2006, p. 298–308.

43. Greg Lynn, *Animate Form*, *op. cit.*, p. 14.

44. De manière centrale, Greg Lynn introduit donc ici une équivalence entre la notion d'*instantané* temporel et celle d'*instance* d'un multi-type, traduisant l'existence sous-jacente de relations dynamiques entre forme, flux et champs de forces. Or, la littérature consacrée à la conception numérique semble fréquemment développer une compréhension purement « cinématographique » de l'idée d'une forme pensée comme un *instantané*, ce qui relève à notre sens de la confusion pointée par Greg Lynn entre « mouvement » et « animation ».

45. *Ibid.*, p. 23.

Une compréhension « intuitive » du terme « paramètre » peut dès lors se construire en « itérant » le concept de variable, dans l'optique d'apporter un niveau supérieur de généralité à une notation formelle donnée. Un paramètre peut en effet être défini de manière générale comme une variable d'« ordre plus élevé ». Considérons par exemple l'ensemble d'équations :

$$y = ax^2, \text{ avec } a \in \mathbb{R}.$$

La variable  $a$ , ici considérée comme un paramètre, permet de noter de manière générique une famille de courbes paraboliques dont les équations particulières s'expriment toutes sous la « forme »  $y = ax^2$ . Si nous fixons à présent la valeur de  $a$  à une valeur particulière, par exemple,  $a = 1/2$ , nous obtenons alors *une* équation de courbe parabolique :  $y = 1/2 x^2$ . Cette étape représente un premier niveau d'instanciation, produisant un objet mathématique encore doté de variabilité interne : de la donnée d'une famille variable de courbes, nous passons à la notation d'*une* courbe particulière, encodant un niveau « inférieur » de variabilité, *interne* à la courbe, à l'aide des variables  $x$  et  $y$ . Si nous fixons à présent la valeur de la variable  $x$ , en choisissant par exemple  $x = 1$ , nous obtenons alors les coordonnées de l'un des points particuliers composant la courbe :  $(1, 1/2)^{46}$ . L'ajout du paramètre  $a$  à l'équation parabolique  $y = x^2$  correspond donc bien à l'introduction d'un *second niveau* de généralité : l'équation  $y = ax^2$  n'encode désormais plus simplement la variabilité interne d'*une* courbe (c'est-à-dire la variabilité des points qui la composent), mais la variabilité d'*une famille* de courbes paraboliques.

Comprise ainsi, la notion de paramètre s'avère bien distincte de la signification précédemment notée dans notre discussion du concept d'équation paramétrique. D'une part, une équation telle que  $y = ax^2$  ne constitue pas une équation paramétrique au sens strict, dans la mesure où elle s'exprime en termes des coordonnées cartésiennes globales  $x$  et  $y$  et non d'une coordonnée  $u$  intrinsèque : il serait donc plus juste de parler ici de « notation paramétrique », pour reprendre une expression employée par Mario Carpo<sup>47</sup>. D'autre part, la conversion de cette équation sous une forme paramétrique fait apparaître une incompatibilité sémantique entre les deux acceptions du terme de « paramètre ». Une manière simple de convertir l'équation  $y = ax^2$  en équation paramétrique, c'est-à-dire de réaliser un *paramétrage* de la parabole, consiste à poser  $x = u$ . On obtient alors le jeu d'équations  $x = u$  et  $y = au^2$ . Si nous nous référons à la définition d'une équation paramétrique, la variable  $u$  nous apparaîtrait alors comme un paramètre, au sens d'une coordonnée « locale » expri-

46. Pour des raisons de simplicité, nous nous plaçons ici dans le plan en 2 dimensions.

47. Mario Carpo, « Parametric Notations: The Birth of the Non-Standard », *op. cit.*

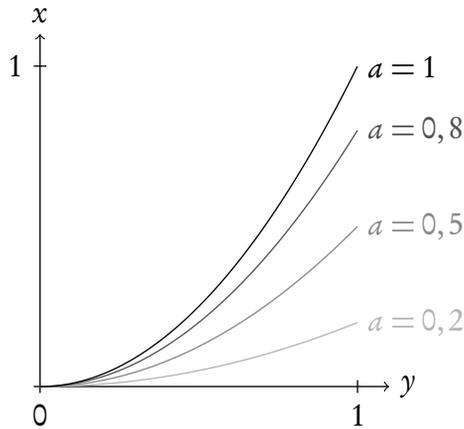


Fig. 4.2 — Tracé de la fonction  $y = ax^2$  pour différentes valeurs du paramètre  $a$ .

mant les positions cartésiennes  $x$  et  $y$ . Cette notion de paramètre ne décrit dès lors pas la variabilité d'une famille de *courbes*, mais d'un ensemble de points formant une courbe particulière. Mais si nous nous plaçons à présent dans le cadre d'une compréhension « intuitive » de la notion de paramètre, et faisons le *choix* de considérer le jeu d'équations  $x = u$  et  $y = au^2$  comme une notation générique décrivant une famille variable de courbes (et non simplement les coordonnées des points composant une courbe particulière), le terme de « paramètre » renverra en priorité à la variable  $a$ . Selon ce nouveau point de vue, le symbole  $u$  ne représente en effet qu'une « simple » variable, dans la mesure où sa généralité encode une variabilité de niveau « inférieure » à celle apportée par  $a$ .

Ces précisions théoriques nous permettent dès lors d'acquérir une image plus complexe de la transposition du concept d'objectif, via l'analogie mathématique proposée par Deleuze, au champ de la production numérique non standard.

Il convient tout d'abord de noter que la variabilité des outils numériques est sans doute plus directement saisissable en termes d'une compréhension « intuitive » de la notion de paramètre. La compréhension des paramètres comme variables de « haut niveau » correspond en effet à l'idée de disposer d'un ou plusieurs « curseurs » permettant de faire varier un objet mathématique dans son ensemble, renvoyant ainsi directement aux « curseurs » (*sliders*) des interfaces graphiques logicielles. Cette notion de paramètre traduit également l'établissement d'un point de vue *hiérarchisé* sur les variables utiles à la description d'un problème, ce qui constitue une possible description générale de l'activité de conception d'un point de vue cognitif. Ces proximités conceptuelles expliquent ainsi certainement l'adoption usuelle d'une compréhension « intuitive » de la notion de paramètre dans le champ de la production numérique, plutôt qu'une signification dérivée de la notion d'équation paramétrique.

Cependant, il faut souligner que la notion d'équation paramétrique permet une compréhension plus précise du *type* de variabilité rendue accessible par les logiciels utilisés dans la conception non standard. En effet, la plupart de ces logiciels sont basés sur des *modèles paramétriques* de courbes et de surfaces (le plus souvent de type NURBS), autrement dit, sur des objets mathématiques décrits à partir d'*équations paramétriques*. Or, ce constat s'avère bien plus précis que l'affirmation usuelle selon laquelle les logiciels de conception se baseraient sur des « notations paramétriques » (une expression que nous avons reliée à une compréhension « intuitive » de la notion de paramètre). Comme l'a montré notre examen du jeu d'équations  $x = u$  et  $y = au^2$ , toute équation paramétrique « augmentée » d'une ou plusieurs variables autres que les coordonnées  $u$  et  $v$  (comme la variable  $a$ ) peut être considérée comme une « notation paramétrique » : il nous a ainsi été possible, en changeant de point de vue, de considérer la variable  $a$  comme un *paramètre* permettant la description générique d'une famille de courbes paraboliques<sup>48</sup>. Or, *l'inverse n'est pas vrai* : toute « notation paramétrique » ne peut nécessairement se traduire sous la forme d'un jeu d'équations paramétriques<sup>49</sup>. La notion d'équation paramétrique renvoie donc bien à une acception plus restreinte de la variabilité mathématique que la notion générique de « notation paramétrique ».

De manière fondamentale, cette non-inversibilité de la relation entre « notation paramétrique » et équation paramétrique se pose comme la conséquence directe de l'opposition entre deux paradigmes distincts de modélisation : l'un basé sur une représentation *explicite* de la géométrie, l'autre sur une représentation *implicite*. Comme nous l'avons noté précédemment, les modèles paramétriques de courbes et de surfaces relèvent d'une description *explicite* : les coordonnées des points se calculent directement à partir de la donnée d'un jeu de valeurs  $(u, v)$ . Par contraste, dans une description *implicite*, l'appartenance de chaque point à un ensemble géométrique est testée sur la base d'une condition numérique à satisfaire. Ainsi, la sphère de centre  $(0, 0, 0)$  et de rayon 1 peut être définie implicitement par la condition  $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} < 1$ , définissant mathématiquement l'ensemble des points situés à une distance inférieure à 1 par rapport à l'origine du système de coordonnées. Dans des cas simples, ces paradigmes de représentation *explicite* et *implicite* s'avèrent équivalents. Cependant, cette équivalence n'est plus garantie lorsqu'un grand nombre de conditions coexistent simultanément, ce qui se produit par exemple fréquemment lors de l'utilisation de techniques de modélisation telles que celle des

---

48. Famille dont chaque membre se trouve alors individuellement décrit, une fois la valeur de  $a$  fixée, par une équation paramétrique.

49. Autrement dit, il n'est pas possible, dans le cas général, de proposer un *paramétrage* explicite de tout type de courbe ou de surface.

*metaballs*<sup>50</sup> (ou *blobs*, figure 4.3). L'utilisateur travaillant dans un contexte de modélisation par metaballs construit en effet un champ scalaire  $f(x, y, z)$ , permettant de calculer une valeur numérique « à tester » en tout point de l'espace. Lorsque cette valeur est inférieure à un certain seuil, le point correspondant est considéré comme décrivant l'intérieur d'un volume<sup>51</sup>. Rapidement, la géométrie pleine ainsi décrite échappe à la possibilité d'une description explicite et, *a fortiori*, d'une représentation sous forme d'équation paramétrique : elle doit alors être évaluée numériquement, à l'aide d'une méthode algorithmique comme celle des *marching cubes*<sup>52</sup>. Rien ne garantit donc, dans le cas général, qu'une notation paramétrique *implicite* possède un équivalent sous la forme d'une équation paramétrique.

L'utilisation intensive de paramètres (dans la compréhension « intuitive » du terme) dans la technique des metaballs (notamment dans la définition du seuil utilisé dans le calcul du champ scalaire) ne saurait donc suffire, au vu de notre examen de la notion mathématique de paramètre, pour rapporter cette méthode de modélisation à la catégorie des *modèles paramétriques* de courbes et de surfaces, dans le sens précis du terme : là où des modèles paramétriques comme celui des NURBS relèvent, fondamentalement, d'une description explicite de la géométrie, des méthodes comme celles des metaballs adoptent une description implicite. Souligner la dimension explicite des modèles paramétriques tels que les NURBS nous permet ainsi de caractériser plus précisément le type de variabilité mis en œuvre par les outils usuels de la conception non standard.

De manière centrale, nous qualifierons ici cette variabilité de *variabilité paramétrique*, en définissant cette notion comme une variabilité apportée par l'utilisation de représentations *explicites* de courbes et de surfaces, basées sur des équations paramétriques. Ce concept de variabilité paramétrique signale donc non seulement la « capacité à varier » des représentations mathématiques utilisées par les concepteurs non standard, mais aussi et surtout l'inscription

---

50. Jules Bloomenthal et Brian Wyvill, « Interactive Techniques for Implicit Modeling », *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 24, n° 2, p. 109–116.

51. Le terme « metaball » provient du fait que ce champ scalaire est en général construit par ajout de « charges » dotées d'une symétrie sphérique, c'est-à-dire d'une influence isotrope dans toutes les directions de l'espace. Isolée, une charge produit alors un volume sphérique, sa surface correspondant au lieu des points où le champ possède une valeur égale au seuil (on parle ainsi d'*isosurface*). En choisissant de manière adéquate l'expression mathématique du champ unitaire associé à chaque charge, on parvient à créer une transition « lisse » entre les volumes créés par deux charges. On obtient alors un volume d'apparence « organique », ce qui explique la terminologie alternative de « blob ».

52. William E. Lorensen et Harvey E. Cline, « Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm », *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 21, n° 4, 1987, p. 163–169.

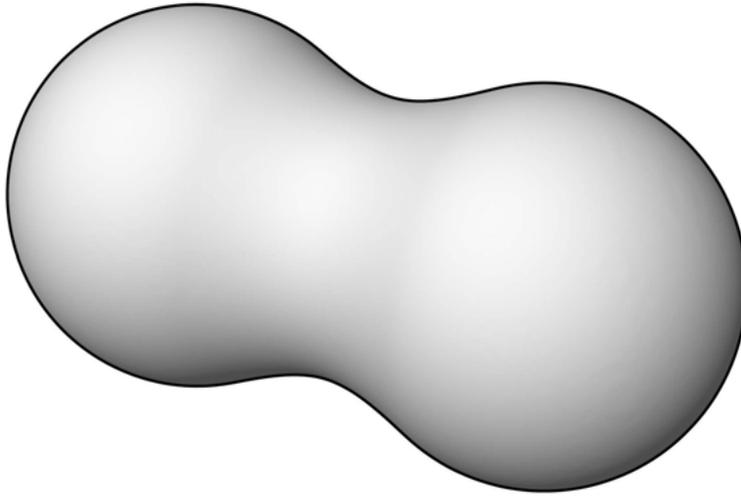


Fig. 4.3 — Surface modélisée par la méthode des metaballs (interaction de deux charges identiques).

de ces représentations dans un paradigme de conception *descriptif*, procédant d'une représentation « descendante » (*top-down*) de la géométrie<sup>53</sup>. De manière fondamentale, cette notion de variabilité paramétrique, que nous associons ici au mode de production non standard, nous permet d'insister sur une dimension souvent non relevée de la conception numérique variable : dans son adoption généralisée de *modèles paramétriques* (dans le sens mathématique du terme), la conception non standard adopte nécessairement une orientation *notationnelle*, et relève d'une forme de description explicite de la géométrie. Il est vrai que l'approche non standard permet au concepteur de développer une production variable sans spécifier explicitement chaque *instance* de la série réalisée — mais son travail de conception réside, précisément, dans la description *explicite* de cette variabilité, laquelle se déploie ici exclusivement selon les degrés de liberté du modèle paramétrique. Comme le note Roland Snooks :

« (...) while parametric models enable a distribution of difference, this is not the difference that emerges from intensive processes, but rather a directly described, top-down, smooth gradient operating within a pre-defined range. Here, all possibility is already given within the starting condition<sup>54</sup>. »

53. Par contraste, des modes de représentations implicites comme les metaballs sont davantage utilisés dans des scénarios de conception « ascendants » (*bottom-up*).

54. Roland Snooks, « Volatile Formation », *Log*, n° 25, 2012, p. 56.

#### 4.4 Conception paramétrique

La notion précédemment proposée de *variabilité paramétrique* ne peut avoir de sens qu'en lien concret avec les aspects techniques des outils habituellement utilisés par les concepteurs non standard. Or, ces outils de conception sont eux-mêmes qualifiés de « modeleurs paramétriques ». Il convient donc d'examiner la compatibilité de notre idée d'une forme « paramétrique » de variabilité avec la signification d'usage de l'expression « conception paramétrique » (*parametric design*) dans le champ de la production numérique non standard.

Dans le domaine des pratiques de conception, la notion de conception paramétrique fait référence à l'idée d'une capacité « d'édition rétroactive » offerte à l'utilisateur : des outils comme CATIA et SolidWorks sont ainsi qualifiés de « modeleurs paramétriques » au sens où tout objet reste éditable tout au long de sa conception, et s'adapte dynamiquement à toute modification. Déjà présente dans le logiciel Sketchpad, mentionné précédemment, cette possibilité d'édition se manifeste dans les logiciels contemporains par l'enregistrement et l'inscription des actions de l'utilisateur au sein d'un « arbre de conception », présentant visuellement toutes les opérations (extrusion, bossage...) contribuant à la définition géométrique de la pièce. Plus qu'un simple historique, cet « arbre » de conception constitue une structure navigable, offrant la possibilité de réactiver, à tout moment, un état antérieur de la pièce. Diverses modifications peuvent alors être apportées : ajout ou suppression d'opérations, altération des dimensions géométriques... Une fois ces corrections finalisées, le logiciel se charge de mettre à jour le modèle dans son ensemble, en propageant la nouvelle configuration géométrique au sein des opérations positionnées ultérieurement sur l'arbre.

La modélisation paramétrique se base non seulement sur le principe d'interfaces utilisateur formalisant la définition des solides en termes de la spécification d'un ensemble de « paramètres géométriques » directs (longueur, largeur, hauteur, rayon, épaisseur...) ou indirects (maillage de contrôle d'une surface NURBS), mais aussi sur la possibilité de définir des assemblages en spécifiant des relations de contrainte entre différents composants. En plus d'offrir des possibilités avancées d'animation et de simulation dynamique, ces contraintes visent à garantir la cohésion d'ensemble du modèle lorsqu'une partie de celui-ci se trouve modifiée. Le déplacement d'un ensemble de perçages entraînera ainsi, par exemple, l'ajustement de la position des écrous ou vis destinés à s'y insérer, pourvu que l'utilisateur ait contraint ces éléments dans une configuration coaxiale. À un niveau fondamental, la notion de conception paramétrique implique donc l'explicitation et la formalisation des interdépendances entre les différentes entités géométriques constituant une scène. Cette remarque justifie

le terme de « conception associative », parfois utilisé de manière équivalente à celui de « conception paramétrique ». Ce terme, présent notamment dans les essais publiés Bernard Cache au début des années 2000, est aujourd'hui d'un emploi plus rare. Il présente cependant l'avantage d'explicitier clairement l'une des idées centrales de la conception dite paramétrique et, peut-être, de résoudre les ambiguïtés introduites par les différentes significations, discutées précédemment, du terme « paramètre ».

Dans son acception usuelle, la notion de conception paramétrique ne renvoie ainsi immédiatement ni la notion « intuitive » de paramètre, ni à celle d'équation paramétrique. Ce point étant souligné, un examen plus approfondi des logiciels de modélisation paramétriques permet cependant de mettre en évidence leur lien concret avec ces deux compréhensions du terme « paramètre » précédemment étudiées. Tout d'abord, les « paramètres géométriques » présentés aux utilisateurs à travers les interfaces de conception correspondent souvent directement à des variables « de haut niveau » d'équations mathématiques. Toute édition graphique de surfaces ou de volumes se répercute ainsi directement dans la mise à jour de certains coefficients des représentations mathématiques utilisées par le logiciel. Les capacités d'édition des modeleurs paramétriques sont donc directement liées à la généralité des « notations paramétriques » qu'ils emploient. Mais plus fondamentalement, ces notations prennent dans la grande majorité des cas la forme d'*équations paramétriques*, dans le sens mathématique précis que nous avons donné à cette notion. Des modèles paramétriques tels que les NURBS, permettant une représentation explicite des courbes et des surfaces, fournissent ainsi un cadre robuste aux calculs volumiques (intersection, union...) nécessaires à la mise en œuvre des capacités « paramétriques » des modeleurs, c'est-à-dire à la mise à jour dynamique d'un assemblage géométrique lorsqu'une modification est apportée à l'un de ses composants. Dans la plupart des logiciels de CAO contemporains, les objets sont ainsi représentés à l'aide d'un principe de « modélisation surfacique » (*boundary representation*, souvent abrégé par BREP) : les volumes sont définis par la représentation de leurs enveloppes externes, dont les différents « patches » sont représentés par des équations paramétriques de surfaces (le plus souvent de type NURBS).

Renvoyant au départ à un type particulier de fonctionnalités logicielles, la conception paramétrique apparaît ainsi techniquement et conceptuellement dépendante du concept mathématique d'*équation paramétrique*, sous-tendant, telle que nous l'avons définie, une forme de *variabilité paramétrique*. Cette forme de variabilité, dont nous avons proposé une caractérisation dans ce cha-

pitre, s'avère donc intimement liée à l'idée de « conception paramétrique » à laquelle se réfèrent fréquemment les concepteurs non standard<sup>55</sup>.

#### 4.5 Un rendez-vous théorique manqué?

L'influence du concept d'objectile s'inscrit dans le contexte plus large d'une diffusion spectaculaire des théories deleuziennes dans le champ de la production numérique au cours des années 90, et plus particulièrement au sein de l'« avant-garde » architecturale<sup>56</sup>. Mais contrairement à d'autres concepts deleuziens (*pli*, *affect*...), la notion d'objectile conserve dans sa « transposition » architecturale un sens générique, renvoyant avant tout à l'idée d'une variabilité de la production, sans privilégier une échelle d'application particulière. L'objectile s'applique ainsi potentiellement non seulement à l'architecture, mais également à toutes les disciplines de conception concernées par l'essor des

---

55. Cet usage précis de l'expression « conception paramétrique », que nous associons ici à la « première génération » de concepteurs numériques (qualifiés de concepteurs « non standard », en référence à l'exposition organisée en 2003 au Centre Pompidou), n'est aujourd'hui véritablement plus présent que dans le champ de l'ingénierie. Dans le champ de l'architecture et, dans une moindre mesure, celui du design objet, l'expression « conception paramétrique » renvoie désormais en général simplement à l'idée d'une conception ouverte sur la variation, indépendamment de toute notion d'édition rétroactive ou d'arbre de conception. Ce relâchement de l'acception originelle de la notion de conception paramétrique s'explique sans doute par l'introduction, au cours des années 2000, d'un grand nombre d'environnements de conception alternatifs aux modeleurs paramétriques traditionnels, entraînant une adaptation des terminologies en usage. Il convient également de noter ici la possibilité d'une confusion introduite par l'idée d'un « style paramétrique », défendue par l'actuel directeur de l'agence Zaha Hadid Architects, Patrick Schumacher (Patrik Schumacher, « Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design », *Architectural Design*, vol. 79, n° 4, 2009, p. 14–23). Le « paramétricisme » proposé par Patrick Schumacher se base en effet davantage sur une compréhension *intuitive* de la notion de paramètre que sur une définition mathématique précise du terme, ou une acception d'usage importée des pratiques de conception de l'ingénierie. Au sein des approches « paramétricistes » défendues par Schumacher, des méthodes de modélisation réellement paramétriques (dans le sens mathématique du terme), comme les NURBS, côtoient ainsi de nombreuses approches *implicites* : optimisation topologique, systèmes multi-agents, etc.

56. Cette fortune des théories deleuziennes en architecture a été abondamment commentée et analysée. Elle s'explique en partie par le rôle d'« intercesseur » joué par un petit nombre de figures-clé, comme le théoricien Sanford Kwinter et les architectes Peter Eisenman et Greg Lynn (Simone Brott, « Deleuze and “The Intercissors” », *Log*, n° 18, 2010, p. 135–151). Le concept de « pli » conduira ainsi à la publication en 1993 d'un numéro spécial de *Architectural Design*, *Folding in Architecture* (Greg Lynn (dir.), *Folding in Architecture*, Londres, Academy, 1993), ouvrant conceptuellement la « première décennie numérique » en substituant à la fracturation déconstructiviste une approche *continue*, permise par un processus de « transformation lisse, impliquant une intégration intensive des différences au sein d'un système à la fois continu et hétérogène » (Greg Lynn, « Architectural Curvilinearity: The Folded, the Pliant and the Supple », *Architectural Design*, n° 102, 1993, p. 24, notre traduction).

technologies de production numérique. Reconnaisant l'absence d'impératif (et sans doute les difficultés pratiques) à s'astreindre à l'échelle architecturale, des architectes de formation, comme Greg Lynn, Lars Spuybroek et Bernard Cache, réalisent ainsi certaines de leurs expérimentations à l'échelle de l'objet. Parfois édités et commercialisés (comme les services à thé et café conçus par Greg Lynn pour Alessi), ces projets constituent le versant pratique, voire économique, des recherches théoriques liées au concept d'objectile.

L'architecte et théoricien Bernard Cache, étudiant de Gilles Deleuze au sein de l'Institut polytechnique de philosophie (dont il devient diplômé en 1986<sup>57</sup>), constitue à cet égard une figure centrale. Largement considéré comme l'un des pionniers du paradigme de production « du fichier à l'usine<sup>58</sup> », présent dans l'exposition *Architectures non standard*, Bernard Cache est directement associé au développement du concept d'objectile chez Deleuze<sup>59</sup> ; il se distingue, en outre, par son investissement économique de cette notion. L'atelier Objectile, qu'il fonde en 1995 avec le designer Patrick Beaucé, se double ainsi en 2002 d'une unité de production complète basée à Metz, nommée Objectile Production Numérique<sup>60</sup>. Cette initiative constitue à notre connaissance l'une des premières tentatives d'implémentation entrepreneuriale basée sur les principes de la production non standard<sup>61</sup>. Basée sur des recherches entreprises depuis 1995, cette unité de production vise à explorer la conception, la fabrication et la commercialisation de panneaux de bois « non standard » (figures 4.4 et 4.5) à usages décoratifs ou fonctionnels (portes, isolation acoustique...). Au-delà de la référence sémantique au concept d'objectile, la société adopte un fonctionnement basé sur la production de déclinaisons à partir de typologies génériques et variables, en filiation directe des idées exposées par Deleuze

---

57. Frédéric Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), *op. cit.*, p. 201.

58. Greg Lynn, « Giant Robots », *Log*, n° 36, 2016, p. 14. Notre traduction.

59. Bernard Cache est en effet directement mentionné dans *Le Pli* comme l'une des inspirations principales du lien conceptuel entre une pensée fonctionnelle de l'objet, héritée des travaux de Leibniz, et les avancées récentes de la production numérique (Gilles Deleuze, *Le pli : Leibniz et le baroque*, *op. cit.*, p. 26).

60. Frédéric Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), *op. cit.*, p. 201.

61. En contraste avec la destination expérimentale de la plupart des productions « non standard », Objectile Production Numérique semblait en effet viser une diffusion large et des applications « grand public », comme en témoigne cet article publié en 2008 dans une revue en ligne d'aménagement et décoration : Christophe Leray, « Objectile : Des panneaux décoratifs surprenants dans une vaste gamme de finitions », 2008, en ligne : <http://www.travaux.com/dossier/coups-de-coeur-produits-de-la-redaction/11435/Objectile--des-panneaux-decoratifs-surprenants-dans-une-vaste-gamme-de-finitions.html> (consulté le 26 août 2016). La société de Bernard Cache et Patrick Beaucé a cessé ses activités en 2011.

dans *Le Pli*. À partir d'un ensemble de motifs répartis en six catégories<sup>62</sup>, la chaîne de production mise en place permet la génération et la fabrication d'instances uniques de panneaux, adaptées aux mesures et aux besoins esthétiques de chaque projet. Comme le montre le texte de présentation figurant dans le catalogue d'*Architectures non standard*, ce modèle de production se base sur une application « orthodoxe » des principes *file to factory*, étendus d'une prise en charge des aspects liés à la commercialisation et à la diffusion des produits. Les motifs usinés sur les panneaux (le plus souvent par des opérations de fraisage) sont ainsi « automatiquement adaptés au calepinage fourni par l'architecte, de façon à en générer : le découpage (. . .); les programmes d'usinage; l'ensemble des documents nécessaires au suivi de la production et de la commercialisation (. . .)<sup>63</sup> ».

Ces exemples concrets d'« application » du concept d'objectile montrent à quel point *Le Pli* a pu jouer un rôle majeur pour la première génération de concepteurs numériques. Mais la portée de la notion d'objectile ne saurait cependant se réduire à ses interprétations « paramétriques ». Quelques lignes après avoir fait référence au champ de la production numérique, Deleuze opère ainsi un rapprochement entre le concept d'objectile et la notion de *modulation*, telle qu'elle est définie — en tant qu'opération technique — par Gilbert Simondon dans *L'individu et sa genèse physico-biologique*<sup>64</sup>. Pour Deleuze, la dimension *fonctionnelle* de l'objectile renvoie à l'idée d'une variation continue de la *matière* et de la *forme*, concepts qu'il faut ici comprendre dans le sens de la doctrine aristotélicienne de l'hylémorphisme. Si l'opération technique du moulage représente une « application » directe de l'hylémorphisme, en incarnant la « descente » hiérarchique et définitive d'une forme dans une matière, la variabilité de l'objectile se rapprocherait plutôt de l'opération technique de modulation, caractérisée en premier lieu par la permanence d'un rapport *énergétique* entre forme et matière :

« Le nouveau statut de l'objet ne rapporte plus celui-ci à un moule spatial, c'est-à-dire un rapport forme-matière, mais à une modulation temporelle qui implique une mise en variation continue de la matière autant qu'un développement continu de la forme. Dans la modulation, "il n'y a jamais arrêt pour démoulage, parce que la circulation du sup-

62. Bernard Cache et Patrick Beaucé, « Panneaux décoratifs — Panneaux Turing et panneau métallique », dans Frédéric Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), Paris, Centre Pompidou, 2003, p. 146.

63. *Ibid.*, p. 146.

64. Gilbert Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, Paris, Presses Universitaires de France, 1964.



Fig. 4.4 — Objectile, panneaux produits par usinage numérique, 1996. Vue de l'exposition *Archaeology of the Digital: Media and Machines* au Canadian Centre for Architecture, Montréal, 21 mai – 5 octobre 2014 (source : <http://www.cca.qc.ca/en/events/3425/archaeology-of-the-digital-media-and-machines>).

port d'énergie équivaut à un démoulage permanent ; un modulateur est un moule temporel continu. . . Mouler est moduler de manière définitive, moduler est mouler de manière continue et perpétuellement variable<sup>65</sup>. »

Cette référence à Simondon confère ainsi au concept d'objectile une résonance philosophique plus large que la seule théorisation d'une forme paramétrique de variabilité. Tout porte à croire que Deleuze conçoit ici l'objectile comme rattaché au projet simondonien d'une critique de l'hylémorphisme : l'intérêt de la notion d'objectile résiderait dès lors moins dans son illustration de l'idée d'un « multi-type » générique que dans l'instauration d'un rapport *dynamique* entre forme et matière, rattaché à l'opération de modulation. La remarque clôturant la discussion du concept d'objectile dans *Le pli* semble de fait souligner cette orientation dynamique, signalant un dépassement de la doc-

65. Gilles Deleuze, *Le pli : Leibniz et le baroque*, op. cit., p. 26.



Fig. 4.5 — Détail de trois panneaux produits par l'agence Objectile (source : <http://www.frac-centre.fr/collection-art-architecture/objectile/sans-titre-64.html?authID=134&ensembleID=348>).

trine hylémorphique pour laquelle la forme et la matière définissent, *a priori*, deux « causes » de l'objet : Deleuze indique ainsi que l'objectile « est un objet maniériste, et non plus essentialiste », qui devient « événement<sup>66</sup> ».

À notre connaissance, ce cadre plus fondamental d'une critique de l'hylémorphisme, dans lequel se développe la pensée de Gilles Deleuze, n'a jamais été relevé dans la littérature consacrée à la notion de production numérique non standard. Centrées sur une forme de variabilité que nous avons précédemment pu qualifier de *paramétrique*, les analyses du concept de production non standard envisagent d'habitude la notion d'objectile en tant que formalisation conceptuelle d'une « généricité » nouvellement accessible aux concepteurs par l'intermédiaire des logiciels de modélisation ; et Deleuze lui-même semble indiquer, par sa référence à la pratique de Bernard Cache, qu'il s'agirait là du principal contenu théorique offert par la notion d'objectile.

Nous pensons, cependant, que les références explicites de Deleuze à la « productive ou la machine à commande numérique<sup>67</sup> » doivent être considérées avec précaution — et ne sauraient en aucun cas se substituer à une discus-

66. *Ibid.*, p. 27.

67. *Ibid.*, p. 26.

sion du cadre conceptuel dans lequel trouvent à s'inscrire, en premier lieu, les pages du *Pli* introduisant la notion d'objectile. Toute lecture de l'objectile en tant que « conception très moderne de l'objet technologique<sup>68</sup> » doit ainsi être située en regard de l'idée d'un dépassement d'une forme d'essentialisme, que Deleuze associe à la perspective des logiques de la production standardisée<sup>69</sup>. Cette remarque nous amène ainsi à nous interroger, de manière centrale, sur la possibilité de considérer effectivement le mode de production non standard comme un exemple *concret* du type de régime productif « non essentialiste » imaginé par Gilles Deleuze. Au-delà de son abandon des techniques de reproduction matricielle, le non standard opère-t-il réellement une remise en cause des logiques profondes de la production standardisée ?

Cette interrogation appelle, à notre sens, une réponse négative, inscrivant en réalité le régime de production non standard en *contradiction* avec les principales idées conceptuelles de la notion d'objectile : dans son principe même, le non standard relève en effet d'une orientation *hylémorphique* qui le rapproche conceptuellement, en dépit de sa substitution d'un « multi-type » paramétrique au type industriel unique, des formes standardisées de production. Le chapitre suivant va à présent nous permettre de développer cette idée, centrale dans notre thèse, à travers une discussion de la notion simondonienne de modulation, telle qu'elle intervient dans les pages du *Pli* consacrées au concept d'objectile. Cette discussion nous permettra de nuancer l'idée de « révolution » fréquemment associée au mode de production non standard : nous serons en effet conduits, au terme de cette analyse, à défendre l'idée d'une continuité fondamentale entre les positionnements d'une majorité de concepteurs non standard et l'orientation auctoriale du paradigme albertien.

---

68. *Ibid.*, p. 26.

69. La production standardisée est « essentialiste » dans la mesure où chaque objet de la série est défini avant tout par sa conformité au type standardisé, plutôt que par sa matérialité individuelle.

## Chapitre 5

# Persistance du schéma hylémorphique

### 5.1 Le rôle de la modulation dans la pensée de Gilbert Simondon

La référence faite par Deleuze à la notion de modulation vient qualifier l'idée selon laquelle l'objectile ne procéderait pas d'un rapport statique entre forme et matière, mais relèverait au contraire d'une « mise en variation continue de la matière autant qu'un développement continu de la forme<sup>1</sup> ». Cette idée d'articulation continue entre forme et matière trouve son origine dans la notion de *modulation*, développée par Gilbert Simondon dans la première partie de sa thèse de doctorat, *L'individu et sa genèse physico-biologique*<sup>2</sup>. Dans sa description de la modulation en tant que type particulier d'opération technique, Simondon prend ainsi l'exemple d'un laminoir :

« On pourrait concevoir un laminoir qui modulerait réellement la matière, et fabriquerait, par exemple, une barre crénelée ou dentée ; les laminoirs qui produisent la tôle striée *modulent* la matière, tandis qu'un laminoir lisse la *modèle* seulement<sup>3</sup>. »

La modulation se définit ici par une action *continûment variable* du laminoir sur la matière. En reprenant la terminologie utilisée par Deleuze, on peut en effet affirmer que la matière est alors mise en « variation continue » par l'évolution dynamique du profil appliqué par le laminoir ; et que ce changement de profil, résultant d'une modification des propriétés mécaniques du laminoir (comme par exemple une variation périodique de la distance entre les cylindres de laminage), correspond effectivement à un « développement continu » de la forme.

Mais la notion de modulation ne s'astreint pas chez Simondon à la simple description d'une opération technique. Ce concept est en effet introduit au sein d'une discussion philosophique d'ambition plus large, visant à examiner la validité de la doctrine hylémorphique comme *principe* de l'individuation.

---

1. *Ibid.*, p. 1986.

2. La discussion qui suit se base sur la réédition de ce texte au sein de l'ouvrage : Gilbert Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Grenoble, Jérôme Millon, 2013.

3. *Ibid.*, p. 47.

Un examen plus approfondi de l'argumentaire suivi par Simondon révèle alors que la modulation joue le rôle d'un cas limite : plus précisément, la modulation constitue l'une des extrémités du spectre des opérations techniques examinées par Simondon afin d'étudier les processus d'individuation dans le champ technique. Au-delà de la notion de modulation, c'est donc à l'exposé des principales étapes de la critique simondonienne de l'hylémorphisme qu'il convient de se consacrer ici.

## 5.2 La critique simondonienne de l'hylémorphisme

Un premier temps de cette critique vise à discuter l'aptitude de l'hylémorphisme « pur » — c'est-à-dire d'un *principe d'individuation* fondé sur la rencontre entre une forme et une matière — à expliquer la réalité *concrète* des opérations de prise de forme technique. Cette étude des « technologies de prise de forme » commence logiquement par le procédé de moulage, examiné à travers l'exemple de la fabrication d'une brique d'argile. Dans ces premières étapes de l'argument, Simondon montre que l'opération technique du moulage, quoique relevant *a priori* d'un schéma typiquement hylémorphique d'imposition d'une forme « pure » à une matière « brute », passive, ne peut en réalité être comprise en ces termes. Interpréter le moulage en termes hylémorphiques revient en effet, pour Simondon, à confondre les notions *abstraites* de forme et de matière — la forme « pure » et la matière « brute » — avec la forme et la matière réelles, *préparées*, intervenant concrètement dans l'opération de moulage.

« L'argile, conçue comme support d'une indéfinie plasticité, est la matière abstraite. Le parallélépipède rectangle, conçu comme forme de la brique, est une forme abstraite. La brique concrète ne résulte pas de l'union de la plasticité de l'argile et du parallélépipède (...). Donner une forme à de l'argile, ce n'est pas imposer la forme parallélépipédique à de l'argile brute : c'est tasser de l'argile préparée dans un moule fabriqué<sup>4</sup>. »

Au sens strict, la forme intervenant dans la fabrication d'une brique parallélépipédique n'est pas le parallélépipède en tant qu'être géométrique, mais un moule *fabriqué*. Or, cette matérialisation doit nécessairement dévier de la forme mathématique « pure », non seulement en raison de la précision limitée des techniques de manufacture, mais aussi pour des raisons fonctionnelles, sans lesquelles l'opération de moulage ne saurait avoir lieu. Comme le note Simondon :

---

4. *Ibid.*, p. 40.

« Le moule est construit de manière à pouvoir être ouvert et fermé sans endommager son contenu. Certaines formes de solides, géométriquement concevables, ne sont devenues réalisables qu'avec des artifices très complexes et subtils. L'art de construire les moules est, de nos jours encore, un des aspects les plus délicats de la fonderie<sup>5</sup>. »

La forme du moule lui-même n'est donc pas directement la forme géométrique « imposable » à la matière : elle est une *construction* qui, autour de l'idée de cette forme pure, se déploie comme autant d'artifices techniques capables d'en permettre une matérialisation physique. Ces artifices ne permettent pas toujours d'obtenir des tirages immédiatement conformes au référent géométrique initial : les moules utilisés dans la fonderie, équipés d'évents, produisent ainsi des objets portant la trace solidifiée des canaux d'injection du métal liquide.

De même, la matière remplissant le moule n'est pas cet objet brut, infiniment plastique, que l'hylémorphisme considère comme réceptacle passif et immédiatement disponible de la forme. L'argile utile au moulage est d'abord broyée, tamisée, mouillée, pétrie : elle résulte d'une longue « demi-chaîne technique » de préparation avant de se donner à l'artisan-mouleur comme « cette pâte homogène et consistante ayant une assez grande plasticité pour pouvoir épouser les contours du moule dans lequel on la presse, et assez ferme pour conserver ce contour pendant le temps nécessaire pour que la plasticité disparaisse<sup>6</sup> ». Dans l'opération du moulage d'argile, la matière n'intervient donc pas simplement par sa plasticité, c'est-à-dire sa capacité à adopter une forme imposée du dehors : elle doit être capable de « tenir » cette forme, de concilier plasticité et consistance. De manière centrale, cette consistance traduit, selon Simondon, une capacité de l'argile à organiser l'agencement de ses propriétés physiques microscopiques à un *ordre de grandeur supérieur*, celui de la future brique d'argile : « chaque molécule intervient au niveau du futur individu, et entre ainsi en communication interactive avec l'ordre de grandeur supérieur à l'individu<sup>7</sup> ». La préparation de l'argile « brute » vise ainsi à révéler un *potentiel* de prise de forme, excédant la simple qualité de plasticité — immédiatement disponible — dans sa capacité à opérer un changement d'échelle nécessaire à l'individuation :

« Il y a dans l'argile brute une aptitude à devenir masse plastique à la dimension de la future brique en raison des propriétés colloïdales des hydrosilicates d'alumine : ce sont ces propriétés colloïdales qui rendent

---

5. *Ibid.*, p. 40.

6. *Ibid.*, p. 41.

7. *Ibid.*, p. 41.

efficaces les gestes de la demi-chaîne technique aboutissant à l'argile préparée (...). L'argile préparée est celle en laquelle chaque molécule sera effectivement mise en communication, quelle que soit sa place par rapport aux parois du moule, avec l'ensemble des poussées exercées par ces parois<sup>8</sup>. »

La limite théorique principale de l'hylémorphisme réside dans l'oubli de ces étapes de préparation technique de la forme et de la matière, conduisant à une vision *abstraite* de l'opération technique. Pour Simondon, la prise de forme découle avant tout d'un processus de *médiation* : une « rencontre entre deux réalités de domaines hétérogènes<sup>9</sup> », c'est-à-dire entre des « ordres de grandeur » distincts. Les étapes de préparation de la forme pure et de la matière brute, produisant un moule et une masse d'argile concrets, ne visent rien d'autre qu'à permettre la médiation, dans l'opération technique, entre ces différents ordres de grandeur. Sans ces étapes préparatoires, non saisies par l'hylémorphisme, le futur individu ne pourrait tout simplement pas prendre forme.

### 5.3 Forme, matière, potentiel, information

La question principale de l'individuation est donc celle d'une rencontre entre différents ordres de grandeur, avant même de se poser dans les termes d'une « matière » et d'une « forme ». En vérité, pour Simondon, les notions de forme et de matière n'expriment rien d'autre que l'adoption de *différents points de vue* sur le système en cours d'individuation : « la forme est le système en tant que macrophysique, en tant que réalité encadrant une individuation possible ; la matière est le système envisagé au niveau microphysique, moléculaire<sup>10</sup> ». La critique simondonienne de l'hylémorphisme ne vise donc pas simplement à corriger l'abstraction des notions de forme et matière, en les confrontant à l'imperfection réelle du moule et à la matérialité de l'argile ; il s'agit plus fondamentalement pour Simondon de dépasser la polarité *statique* entre forme et matière, en proposant une vision *dynamique* de ces termes. Forme et matière constituent désormais des notions *relatives*, constituées dans le déroulement même de l'opération individuante.

L'hylémorphisme se traduit d'abord par une compréhension excessivement *géométrique* de l'opération technique : la forme pure est sensée se transférer géométriquement à la matière, la coupant « abstraitement<sup>11</sup> » selon les directions de son contour géométrique. Or, comme le montre Simondon, l'organi-

---

8. *Ibid.*, p. 41.

9. *Ibid.*, p. 40.

10. *Ibid.*, p. 82.

11. *Ibid.*, p. 52.

sation macroscopique de l'individu final ne doit pas seulement être vue comme résultat de l'imposition « descendante » (*top-down*) de la forme « géométrique » du moule à la matière, mais au moins également comme produit d'une structuration « ascendante » (*bottom-up*) de la matière à partir du niveau microscopique, *dans* l'enveloppe du moule. En d'autres termes, dans un hylémorphisme « corrigé », la notion de forme — correspondant au moule — doit procéder d'une compréhension *topologique*, et non géométrique : « la forme matérialisée est une forme qui peut agir comme limite, comme frontière topologique d'un système<sup>12</sup> ».

Simultanément, l'hylémorphisme développe une vision excessivement *passive* de la matière : les « qualités » de la matière ne sont investies d'aucun rôle dynamique dans la prise de forme. Elles jouent le rôle d'invariants *essentiels*, permettant la description de l'individu *individué*<sup>13</sup>, au sens où elles se transmettent *passivement* de la matière brute à l'individu, sans intervenir en rien dans l'opération de prise de forme. Or, Simondon montre au contraire que les qualités de la matière sont conditions même de l'individuation : « la qualité de la matière est source de forme, élément de forme que l'opération technique fait changer d'échelle<sup>14</sup> ». Les propriétés colloïdales de l'argile, lui conférant simultanément plasticité et consistance, ne constituent ainsi pas simplement des « qualités » mais de véritables *formes implicites*<sup>15</sup>. Au niveau microscopique, la matière est forme, ou plus précisément la matière *recèle déjà une tension vers la forme du futur individu*. Pour que la prise de forme macroscopique puisse avoir lieu, il doit donc exister au préalable, dans la matière, des « prises de forme » naturelles, une structuration microscopique susceptible de changer d'ordre de grandeur dans la médiation de l'opération technique.

« Il faut que la matière soit structurée d'une certaine façon, qu'elle ait déjà des propriétés qui soient la condition de la prise de forme. On pourrait dire en un certain sens que la matière recèle la cohérence de la forme avant la prise de forme ; or, cette cohérence est déjà une configuration ayant fonction de forme. La prise de forme technique utilise des prises de formes naturelles antérieures à elle (...)»<sup>16</sup>.

L'exemple de l'opération de moulage met ainsi en évidence le rôle d'ensemble joué par les différentes propriétés physiques de l'argile : contrairement à l'interprétation hylémorphique qui ne retiendrait que la capacité de la ma-

---

12. *Ibid.*, p. 46.

13. *Ibid.*, p. 64.

14. *Ibid.*, p. 41.

15. *Ibid.*, p. 55.

16. *Ibid.*, p. 52.

tière à se déformer pour accueillir la forme, qualifiant ses autres caractéristiques de simples « qualités », l'analyse de Simondon montre que les capacités de plasticité et de consistance sont physiquement inséparables. Il ne s'agit donc pas simplement ici pour la matière de *recevoir* la forme, mais de la *garder*, ou encore de se répartir de manière homogène sur les parois du moule : au niveau microscopique, la matière joue donc un rôle *actif* dans l'opération de prise de forme.

« L'argile n'est pas seulement passivement déformable; elle est activement plastique, parce qu'elle est colloïdale; sa faculté de recevoir une forme ne se distingue pas de celle de la garder, parce que recevoir et garder ne font qu'un : subir une déformation sans fissure et avec cohérence des chaînes moléculaires<sup>17</sup>. »

La relation entre matière et forme est donc dynamique, active, *énergétique* : la forme fournit l'enveloppe topologique sur laquelle la matière va « s'appuyer » pour prendre forme, transformant ses propres *éléments* de forme microscopiques internes en un agencement macroscopique correspondant à l'individu. Ainsi, les notions de forme et de matière ne peuvent être saisies dans leur compréhension hylémorphique de causes *a priori* de l'individuation : elles ne prennent véritablement sens qu'au moment de leur rencontre, dans une médiation qui est l'individuation même. Saisir cette rencontre, dans son dynamisme énergétique, est précisément ce qu'échoue à faire l'hylémorphisme :

« Quand on cherche un principe d'individuation existant avant l'individu, on est contraint de le placer dans la matière ou dans la forme, puisque seules préexistent la forme et la matière; comme elles sont séparées l'une de l'autre et que leur réunion est contingente, on ne peut faire résider le principe d'individuation dans le système de forme et de matière en tant que système, puisque ce dernier n'est constitué qu'au moment où la matière prend forme<sup>18</sup>. »

Pour Simondon, les notions de « forme » et de « matière » ne doivent ainsi plus être conçues comme des essences séparées *a priori*, mais comme des agencements structurels observés à différents ordres de grandeurs, réunis dans la médiation du processus d'individuation. Pour rendre compte du caractère dynamique de cette médiation, l'analyse de Simondon met donc en évidence la nécessité d'adjoindre un troisième terme au couple hylémorphique : l'indivi-

---

17. *Ibid.*, p. 41.

18. *Ibid.*, p. 61.

duction s'explique simultanément en termes de forme, de matière et d'énergie. Cette condition énergétique s'observe alors comme état d'ensemble d'un système<sup>19</sup> structuré à divers ordres de grandeur. De manière fondamentale, cette énergie rend compte des *tensions internes* amorçant l'individuation : pour qu'il y ait individuation, c'est-à-dire pour qu'il y ait possibilité d'un *devenir* du système, forme et de matière doivent tendre simultanément vers le futur individu. Dans le moulage, les « demi-chaînes techniques » de préparation du moule et de l'argile n'ont en ce sens d'autre but que d'instaurer un état de tension énergétique, trouvant sa résolution dans une médiation produisant l'individu.

Pour Simondon, cette condition énergétique de tension correspond à la présence d'une *énergie potentielle*. Empruntée à la physique, cette notion exprime de manière générale la tendance à l'évolution d'un système, lorsque celui-ci se trouve hors de son état d'équilibre le plus stable. Un pendule écarté de sa position d'équilibre acquiert ainsi une énergie potentielle de pesanteur : une fois le pendule relâché, cette énergie se convertit en énergie cinétique, produisant des oscillations. L'énergie totale se dissipe finalement sous forme de frottements, conduisant le système à son état le plus stable, caractérisé par un minimum de l'énergie potentielle. Pour Simondon, l'individuation relève d'un tel processus de transferts énergétiques, marquant l'évolution du système d'un état *métastable* vers un état de plus grande stabilité. Cette trajectoire générale se décline alors en deux processus, correspondant respectivement aux schémas individuation *physique* et *vitale*. L'individuation physique se caractérise par l'atteinte d'un état d'équilibre *stable*, au-delà duquel aucune évolution n'est possible : le système atteint alors son état « final », correspondant à la production d'un individu physique « stabilisé » (comme, par exemple, une brique d'argile). À ce processus d'individuation *physique*, borné chronologiquement, Simondon oppose un second schéma correspondant à l'individuation *vitale*. Contrairement à l'individuation physique, l'individuation vitale rend compte d'un devenir perpétuel : l'état de stabilité absolu n'est jamais atteint, et le système progresse sans cesse d'état métastable en état métastable, perpétuant ainsi les conditions de son propre devenir<sup>20</sup>.

Également empruntée à la physique, la notion de métastabilité introduite par Simondon s'avère plus précise que la simple idée d'une présence initiale d'énergie potentielle. L'exemple du pendule pris précédemment ne correspond ainsi pas rigoureusement, en termes énergétiques, au processus d'individuation

---

19. Le terme de « système » doit ici être compris dans le sens physique d'un *système fermé* : un ensemble d'éléments n'effectuant aucun échange énergétique avec l'extérieur. Les seules dynamiques énergétiques à prendre en compte sont alors celles internes au système : « [1]a notion de système est nécessaire pour définir la condition énergétique, car il n'y a d'énergie potentielle que par rapport aux transformations possibles dans un système défini » (*Ibid.*, p. 63).

20. *Ibid.*, p. 152.

tel que l'envisage l'auteur. En effet, l'état initial du pendule (écart par rapport à la position d'équilibre) correspond à un équilibre *instable* : cette instabilité entraîne une incapacité à maintenir cet état ; le pendule dissipe « automatiquement » son énergie potentielle. Un état métastable, au contraire, se maintient tant qu'il n'est pas perturbé. En physique, les états métastables correspondent typiquement à des minima *locaux* d'énergie potentielle, correspondant à des « cuvettes » énergétiques dont le système ne peut la plupart du temps sortir sans apport d'énergie. Un système peut donc en théorie rester indéfiniment dans un état métastable, même si cet état ne s'avère pas optimal au regard des lois de la thermodynamique. Un exemple bien connu de système métastable est celui de l'eau surfondue : dans certaines conditions, l'eau peut être refroidie de sorte à rester liquide en deçà de son point de solidification. Le système se trouve alors dans un état métastable : la transition vers la phase solide lui est interdite tant qu'il ne reçoit pas une énergie nécessaire au franchissement de la « marche » énergétique apparue lors du processus de surfusion. En général, l'apport d'une petite perturbation au système (par exemple par agitation) suffit à provoquer la sortie de cet état métastable : l'eau se solidifie alors soudainement. Cette notion de métastabilité permet à Simondon de rendre compte de l'état de tension latent pré-existant au processus d'individuation : pour qu'il y ait individuation, il est avant tout nécessaire que le système se trouve dans un état de tension énergétique. Cette configuration particulière du système, Simondon la nomme « situation hylémorphique » :

« On peut, en effet, assez légitimement nommer situation hylémorphique celle en laquelle il existe une certaine quantité de matière groupée en sous-ensembles d'un système isolés les uns par rapport aux autres, ou une certaine quantité de matière dont les conditions énergétiques et la répartition spatiale sont telles que le système est en état métastable<sup>21</sup>. »

Le terme de « situation hylémorphique » renvoie ici bien à l'idée d'une présence simultanée de forme et de matière. Mais il convient de se souvenir ici que ces notions correspondent pour Simondon à deux points de vue, macroscopique et microscopique, sur un même système. La situation hylémorphique qualifie ainsi l'état d'ensemble d'un seul système, autrement dit, sa *préparation* par disposition d'une certaine quantité de *matière* selon un agencement topologique particulier, nommé *forme*. Dans le cas du moulage, la « situation hylémorphique » initiale peut ainsi être décrite comme le remplissage du moule par une masse d'argile. La matière, l'argile, possède alors une certaine exten-

---

21. *Ibid.*, p. 82.

sion spatiale (celle du moule) correspondant à la « forme ». La forme ne désigne donc pas simplement le moule, mais l'agencement topologique du système entier : on pourrait dire que la forme correspond au lieu du contact de l'argile avec les parois du moule. Son extension est bien macroscopique, là où la notion de matière renvoie plutôt, en termes énergétiques, aux dynamiques microscopiques internes de l'argile.

Placé en situation hylémorphique, le système se trouve alors dans un état métastable. La situation hylémorphique signale donc *le point de départ* du processus d'individuation : la médiation entre forme et matière, caractérisant l'individuation dans son déroulement *dynamique*, n'a pas encore été amorcée ; mais toutes les conditions énergétiques sont réunies pour qu'une perturbation enclenche le processus d'individuation. Cette perturbation, ou singularité, Simondon la nomme *information*.

« Une situation hylémorphique est une situation en laquelle il n'y a que forme et matière, donc deux niveaux de réalité sans communication. L'institution de cette communication entre niveaux — avec transformations énergétiques — est l'amorce de l'individuation ; elle suppose l'apparition d'une singularité, que l'on peut nommer information, soit venant du dehors, soit sous-jacente<sup>22</sup>. »

Chez Simondon, l'information revêt une signification processuelle : elle correspond à *l'amorce* du processus d'individuation. L'information est donc *in-formation*, ce par quoi le système prend « forme », s'individue. Dans le cas de la brique d'argile, cette information est apportée par le moule : une fois fermé, pressé, le moule amorce l'individuation à partir de la situation hylémorphique de départ. L'argile n'est plus simplement placée *dans* le moule : ses structures microscopiques s'organisent et se pressent *contre* les parois du moule, produisant une brique cohérente et sans fissure. Il y a alors eu information, c'est-à-dire médiation entre la matière et une enveloppe topologique nommée forme. Pour Simondon, le moule est ainsi « un dispositif pour produire une information toujours la même à chaque moulage<sup>23</sup> » (plus généralement, Simondon qualifie toute forme de « dispositif » produisant l'information, la singularité initiale amorçant le processus d'individuation<sup>24</sup>).

Cette compréhension processuelle de l'information renvoie directement à l'acceptation originale de la notion d'information, suggérée par l'étymologie commune avec *formation*, *former*. Avant de constituer une quantité *extensive*, mesurable, telle que la conçoivent par exemple la théorie de l'information et

22. *Ibid.*, p. 82.

23. *Ibid.*, p. 57.

24. *Ibid.*, p. 48.

la cybernétique, l'information apparaît en effet, chez des auteurs comme Cicéron et Saint Augustin, dans le sens de « processus d'être informé ». Introduite pour rendre compte en langue latine de concepts platoniciens, la notion d'information est alors directement connectée au concept de forme<sup>25</sup>. Quoi qu'influencé par la cybernétique et la théorie de l'information, Simondon semble ainsi se prémunir, dans ce retour à une acception processuelle du terme « information », de la compréhension purement quantitative qu'en proposent ces disciplines scientifiques<sup>26</sup>.

#### 5.4 La modulation comme opération transductive

Cette notion d'information permet désormais à Simondon de proposer une formulation générale de sa théorie de l'individuation. Simondon a ici recours à l'image du processus physique de *crystallisation* : selon Simondon, l'individuation se décrit en effet fondamentalement comme la propagation d'un *germe structurel* — l'information — dans un champ de potentiel pré-individuel *métastable* — les deux niveaux de réalité de la « forme » et de la « matière » —, entraînant une « cristallisation » progressive. L'individuation, correspondant à la structuration à grande échelle du système, s'opère alors de proche en proche, selon un mécanisme que Simondon nomme *opération transductive* :

« Nous entendons par transduction une opération, physique, biologique, mentale, sociale, par laquelle une activité se propage de proche en proche à l'intérieur d'un domaine, en fondant cette propagation sur une structuration du domaine opérée de place en place : chaque région de structure constituée sert à la région suivante de principe de consti-

---

25. Pieter Adriaans, « Information », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2013, en ligne : <https://plato.stanford.edu/archives/fall2013/entries/information> (consulté le 9 décembre 2016).

26. Simondon note en effet : « la notion d'information ne doit jamais être ramenée aux signaux ou supports ou véhicules d'information, *comme tend à le faire la théorie technologique de l'information, tirée d'abord par abstraction de la technologie des transmissions* » (Gilbert Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 35, italiques dans le texte). Selon Pieter Adriaans, la compréhension technologique de l'information comme une quantité « transmissible » par un signal, donc mesurable et extensive, correspond à une acception relativement récente de la notion d'information — dont l'émergence, au XIX<sup>e</sup> siècle, s'accompagne du déclin progressif des usages du terme « information » (dans son sens processuel) dans le discours philosophique. Ce serait sur la base de cette signification extensive, coupée de sa dimension processuelle initiale, que Claude Shannon aurait élaboré sa propre définition quantitative de l'information : comme nous le verrons par la suite, cette définition fait disparaître toute référence au *processus* de création du message, et donc à son contenu sémantique, au profit de la construction d'une définition statistique, extensive de l'information (Pieter Adriaans, « Information », *op. cit.*).

tution, si bien qu'une modification s'étend ainsi progressivement en même temps que cette opération structurante. Un cristal qui, à partir d'un germe très petit, grossit et s'étend selon toutes les directions dans son eau-mère fournit l'image la plus simple de l'opération transductive<sup>27</sup>. »

Ainsi, si Simondon retient le terme de « situation hylémorphique » pour qualifier le point de départ de l'individuation, le schéma conceptuel de l'opération transductive signale un dépassement complet de la doctrine hylémorphique. L'individuation n'est plus perçue comme l'imposition descendante d'une « forme » dans une « matière », mais comme la structuration progressive, ou « cristallisation », d'un champ de potentiel métastable.

Cette présentation d'ensemble de la théorie « transductive » de l'individuation nous permet dès lors de discuter de la notion de modulation, telle qu'elle intervient dans l'argumentaire simondonien.

Nous avons jusqu'ici rencontré à plusieurs occurrences l'exemple du moulage d'une brique d'argile : les premiers développements du raisonnement suivi par Simondon sont en effet construits à partir de cette opération technique. D'un point de vue didactique, le moulage constitue un point de départ adéquat pour une critique de l'hylémorphisme : le fonctionnement technique mis en œuvre est « simple » et connu de tous ; la « forme » et la « matière » y sont intuitivement identifiables ; l'individu obtenu — la brique d'argile — *semble* relever de l'imposition hylémorphique d'une forme à une matière. Remettant progressivement en cause chacun de ces présupposés, l'analyse simondonienne se fixe alors sur d'autres formes d'opérations techniques, dont la modulation.

Le processus de modulation s'observe fréquemment dans les systèmes électroniques, notamment dans les montages amplificateurs de type triode. Dans une triode, la modulation renvoie au processus de modification dynamique de la tension, c'est-à-dire de la différence de potentiel électrique, entre l'anode et la cathode. Cette modification dynamique est opérée par une « grille », qui joue donc le rôle de modulateur. Concrètement, le chauffage de la cathode permet la formation d'un nuage d'électrons dans l'espace interstitiel vide entre cathode et anode. En vertu de la différence de potentiel positive entre anode et cathode, ces électrons se déplacent alors vers l'anode, entraînant la formation d'un courant. Afin de moduler ce courant, une tension négative est imposée entre la cathode et la grille. Cette tension vient contrer la différence de potentiel entre cathode et anode, de sorte qu'un flux moins important d'électrons parvient à l'anode, entraînant une diminution du courant. Le montage est amplificateur

---

27. Gilbert Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 32-33.

car les variations de *tension* à la grille entraînent des variations proportionnelles du *courant* traversant la cathode et l'anode : en plaçant une résistance de charge appropriée aux bornes de l'anode et de la cathode, ce courant peut alors être transformé en une tension largement supérieure à celle de la grille.

Pour Simondon, ces deux opérations techniques, moulage et modulation, s'avèrent toutes deux descriptibles dans les termes de l'opération transductive, dont elles constituent des cas limites : « [l]e moule et le modulateur sont des cas extrêmes, mais l'opération essentielle de prise de forme s'y accomplit de la même façon ; elle consiste en l'établissement d'un régime énergétique, durable ou non<sup>28,29</sup> ». Cependant, contrairement à l'image du moulage, comportant encore un certain schématisme hylémorphique, la modulation possède l'avantage de se présenter directement en termes énergétiques, et constitue donc, à l'image de la cristallisation, une image plus « juste » de l'opération transductive. En conséquence, les notions de *modulation* et d'*opération transductive* sont utilisées de manière équivalente dans la pensée simondonienne<sup>30</sup>. Si la cristallisation fournit une image *physique* au concept d'opération transductive, la modulation en apporte une image *technique*. De manière générale, Simondon décrit ainsi le rôle de la forme dans l'individuation comme un élément *modulateur* : « la matière est ce qui véhicule [l'énergie] et la forme ce qui module la répartition de cette même énergie<sup>31</sup> ». Tout processus d'individuation, c'est-à-dire toute *in-formation*, relève donc d'une modulation.

## 5.5 L'hylémorphisme latent de la production non standard

Cette compréhension du concept de modulation comme opération transductive nous permet désormais d'explicitier notre idée d'une contradiction dans l'application du concept d'objectile à la production non standard.

---

28. *Ibid.*, p. 47.

29. Dans la modulation, le nuage d'électrons entre cathode et anode constitue la « matière », dans le sens d'un « véhicule d'énergie potentielle qui s'actualise ». La « forme » est ici apportée par le champ de potentiel inverse créé par la tension de grille : à la manière d'un « moule variable », ce champ de potentiel fait varier continûment l'actualisation de l'énergie potentielle entre anode et cathode. L'individuation, soit la production du courant amplifié, devient alors un processus continu, variable, toujours renouvelé. Contrairement à la fabrication de la brique d'argile, il n'y a en effet jamais ici « arrêt pour démoulage » : tout se passe comme si, en vertu de la rapidité des échanges énergétiques dans la triode, on assistait à un processus de « démoulage permanent ». Ce renouvellement permanent de l'opération de modulation, opposé au caractère définitif du moulage, conduit alors à la distinction citée par Deleuze dans *Le Pli* : « [m]ouler est moduler de manière définitive ; moduler est mouler de manière continue et perpétuellement variable » (*Ibid.*, p. 46–47).

30. *Ibid.*, p. 540.

31. *Ibid.*, p. 46.

L'objectile, compris comme analogue à l'opération de modulation, se rapporte fondamentalement à la *dynamique même* d'un processus d'individuation. C'est en ce sens que l'objectile, comme le souligne Deleuze, participe d'une compréhension « fonctionnelle » de l'objet : l'objet n'est plus perceptible comme un donné statique, mais devient inséparable de sa capacité d'« expression » dynamique. Autrement dit, l'objet ne peut être saisi que dans sa variabilité, dans le déroulement même de son individuation ; comme le note Deleuze, « il devient événement<sup>32</sup> ». Or, cette variabilité, comme le montre l'étude de la notion simondonienne de modulation, n'est pas seulement variabilité de la forme. Il n'y a en effet modulation que lorsque la variabilité du modulateur s'actualise, comme structure, dans un champ de potentiel porté par la matière : dans la modulation, la variation de la forme — le modulateur — et de la matière sont simultanées. À l'instar de la modulation, l'objectile doit donc être compris comme schéma d'individuation non hylémorphique, renvoyant à un *devenir conjoint de la forme et de la matière*.

Or, force est de constater qu'un tel schéma d'individuation contraste avec la notion même de production non standard, lorsque celle-ci est comprise dans le cadre d'une production « du fichier à l'usine ». Dans sa formulation même, le principe du schéma *file to factory* sépare strictement le domaine de variabilité de la forme de celui de la matière. Dans un tel schéma technique, la variabilité s'exprime en effet concrètement, tout d'abord, au niveau numérique, par la génération d'un ensemble de fichiers contenant des formes distinctes, destinées à des étapes de fabrication singulières. Or, une fois stockée sous forme de fichier, la forme ne varie plus ; elle s'impose alors à la matière comme un donné préexistant, pur, *géométrique*. Dans ce contexte, la notion d'objectile se dégrade alors comme simple expression d'une variabilité formelle : la « mise en variation » de la matière, opérée dans un second temps (la fabrication), ne constitue qu'une étape de réalisation *passive* d'« instantanés » extraits du modèle numérique variable. Cette réduction conceptuelle accompagne dans les faits la compréhension littérale de l'objectile comme *modèle paramétrique*. Tout semble pourtant indiquer que pour Deleuze, la notion mathématique de variation constitue le point de départ d'une réflexion théorique plus large, de la même manière que chez Simondon, l'opération *technique* (moulage, modulation) fournit les bases conceptuelles d'une compréhension *générale* du processus d'individuation. Mais ces visées théoriques semblent avoir été oubliées des interprètes du concept d'objectile dans le champ de la production non standard, où l'objectile a été avant tout compris en un sens « paramétrique ». En conséquence, les concepteurs non standard se sont la plupart du temps avérés incapable de dépasser un point de vue hylémorphique sur la production, s'ins-

---

32. Gilles Deleuze, *Le pli : Leibniz et le baroque*, op. cit., p. 27.

crivant ainsi paradoxalement dans la continuité de l'héritage industriel « standard ».

Pour le concepteur industriel « standard », l'individuation résulte fondamentalement de la rencontre d'un type prédéfini — le standard — avec une matière passive. Les variations matérielles des individus produits sont tolérées dans une certaine mesure : la « matière » de différentes pièces produites en série peut exhiber des qualités légèrement différentes de rugosité, de grain, de patine. Mais ces particularités, précisément, doivent demeurer des *qualités* : la matière ne doit jamais faire irruption sur le terrain de la forme<sup>33</sup>. Toute pièce déviant *géométriquement* du modèle sera ainsi déclarée comme non conforme, et éliminée. Or, force est de constater que la production non standard reproduit dans ses grandes lignes ce schéma conceptuel. Pour le concepteur non standard, l'individuation n'est certes pas conçue sous l'autorité d'un type unique, standardisé. Mais chacune des individuations visant à produire une *instance* d'un « multi-type », d'un « objectile », est prise dans un rapport hylémorphique, soumis à la domination d'une forme pure, figée, extraite du modèle variable. Comme dans un processus standardisé, ces individuations particulières tolèrent toutes une certaine plage de déviations *matérielles* par rapport au modèle : la matière usinée peut exprimer ses *qualités* propres; différents panneaux de bois obtenus par commande numérique peuvent différer sensiblement dans leur grain, leur couleur; la soustraction de la matière peut révéler des détails « imprévus », comme dans certains panneaux de l'agence Objectile laissant apparaître l'alternance des strates internes du contreplaqué (figure 4.5). Mais, comme dans le mode de production standard, une conformité *géométrique* est attendue entre chaque individu et l'instance paramétrique qui en définit la « forme » : toute déviation sera immédiatement qualifiée d'erreur d'usinage.

Cette conformité géométrique attendue entre le *modèle* (numérique) de la forme et l'individu signale une indifférence de la production non standard pour les conditions *énergétiques* de la rencontre entre forme et matière. Dans la modulation, pourtant, la prise de forme est résolution d'un état de tension énergétique : il ne s'agit pas simplement pour la matière de recevoir la forme, mais de contribuer *activement*, en s'offrant comme le terrain énergétique d'une structuration possible, à la formation du futur individu. En ce sens, le concept de modulation ne saurait décrire la compréhension « non standard » de l'individuation technique : pour le concepteur non standard, la matière constitue une ressource inerte, en attente, prête à être usinée<sup>34</sup>. Corrélativement, la

---

33. Il convient ici de rappeler qu'au contraire, pour Simondon, les qualités de la matière constituent de véritables *formes implicites*.

34. L'anglais utilise d'ailleurs le terme de « stock » pour désigner la matière à usiner dans le cas d'opérations soustractives, comme le fraisage.

forme est conçue comme une simple enveloppe géométrique venant délimiter cette matière<sup>35</sup> : elle s'impose *abstraitement*, sans friction. La production non standard relève ainsi fondamentalement d'une compréhension abstraite, hylémorphique, des notions de forme et de matière.

À cet égard, il semble ainsi, étrangement, que l'abandon des logiques de production matricielle ait contribué au renforcement de la position hylémorphique. Mais cette évolution n'est peut-être pas totalement paradoxale. En dépit de son schématisme hylémorphique intuitif, la duplication matricielle, dans la matérialité de son déroulement physique, permettait en effet à l'esprit critique de prendre conscience des dimensions *énergétiques* de la prise de forme. Tel est le point de départ de la critique simondonienne de l'hylémorphisme, amorcée par une description fine de la réalité physique de l'opération de moulage, soulignant la nécessité d'une *préparation* énergétique du système. À l'inverse, la commande numérique procède d'une forme d'abstraction, et rend moins directement sensibles les processus physiques de préparation de la forme et de la matière. La fabrication semble désormais directement régie par une forme pure, abstraite, spécifiée *géométriquement* par le concepteur. Simultanément, que ce soit dans l'usinage soustractif ou additif, la plupart des chaînes techniques utilisées en fabrication numérique se basent sur des matériaux connus, testés, renvoyant l'image d'un comportement passif. Mais ces matériaux sont en vérité rarement « bruts » : la prévisibilité de leur comportement résulte la plupart du temps d'une forme de préparation préalable. Des matériaux comme ceux utilisés dans l'impression 3D, disponibles sous formes de cartouches (pour les résines) ou de rouleaux de filaments (pour les plastiques), sont ainsi issus d'une longue « chaîne technique » visant à garantir la reproductibilité de leurs comportements dans une plage d'utilisation donnée. De même, la forme « pure » du modèle 3D finalisé par le concepteur subit, lors de sa conversion en « parcours d'outil », un ensemble de corrections géométriques garantissant la prévisibilité de l'opération de fabrication. La production non standard semble ainsi fréquemment adopter le présupposé implicite d'une fabrication « normalisée ». Comme nous le verrons par la suite, le détournement des méthodes et outils habituels de la fabrication numérique représente dès lors une des directions possibles pour une remise en cause *par la pratique* des conceptions hylémorphiques du paradigme non standard.

Les orientations hylémorphiques analysées dans cette section inscrivent ainsi la production non standard dans la continuité d'une pensée essentialiste de la production. Le schéma même d'un régime *file to factory* perpétue en

---

35. L'hylémorphisme latent de la production non standard explique ainsi sans doute, au-delà de raisons d'ordre mathématique, l'importance prise par les surfaces, enveloppes et autres objets « délimiteurs » dans la conception numérique des années 90.

effet l'un des principaux traits conceptuels du paradigme albertien : l'établissement d'un rapport prescriptif entre conception et fabrication, trahissant une représentation *abstraite* de la prise de forme matérielle. L'adoption de représentations numériques variables ne s'avère dès lors pas incompatible avec le maintien d'une vision *linéaire* de la production, dominée par l'autorité d'une notation *explicite* de la « forme ». Cette remarque permet en ce sens de revisiter les critiques souvent adressées à la première génération de projets numériques, qualifiant ceux-ci de « formalistes<sup>36</sup> » : la production non standard se caractérise de fait par la réduction de l'individu technique à sa géométrie.

---

36. Dans les critiques adressées notamment à l'architecture expérimentale des années 90, le terme de « formalisme » ne semble pas entendu au sens qu'il possède traditionnellement en théorie esthétique, mais implique plutôt que cette architecture serait déconnectée des préoccupations liées à la matérialité, et focalisée exclusivement sur des questions de pure géométrie.

Troisième partie

# **Vers une sortie du schéma hylémorphique**



## Chapitre 6

# Partage d'autorité : agentivité matérielle

### 6.1 L'hylémorphisme comme concentration de l'agentivité

Le chapitre précédent nous a conduit à décrire la production non standard dans les termes d'un prolongement, plutôt qu'une remise en cause, du paradigme albertien. Fondée sur l'identification d'une orientation hylémorphique sous-jacente à l'idée même du régime *file to factory*, cette critique nous a permis d'identifier la domination — tant conceptuelle que pratique — du concept de *forme* au sein de la production non standard.

De manière fondamentale, cette domination de la forme apparaît comme corrélative d'un schéma de domination *sociale* sous-jacent à la doctrine hylémorphique. Comme le montre Simondon, le principe d'individuation hylémorphique s'inscrit dans le contexte d'un certain rapport social, formulé dans les termes d'une relation hiérarchique entre « l'homme libre » et « l'esclave<sup>1</sup> ». C'est dans ce contexte social que l'hylémorphisme formule ensuite la situation productive comme *division du travail*, créant les rôles d'un « concepteur » et d'un « fabricant ». Le concepteur correspond bien évidemment à l'homme libre : lui seul possède le pouvoir d'engager la production d'un objet ; son ordre commande la réalisation d'une forme exprimée logiquement, en termes de pure géométrie. La matière n'est pas choisie, touchée, transmise de main à main au fabricant : elle est simplement désignée par son nom, *spécifiée*. Le fabricant se trouve alors chargé d'actualiser matériellement le désir de son maître. Pour Simondon, ce contexte social explique la hiérarchisation hylémorphique des concepts de forme et de matière, corrélative d'un point de vue *abstrait* sur l'individuation physique : les détails concrets de la fabrication ne sont pas dignes d'intérêt philosophique, car ils relèvent du travail de l'esclave, et non de l'homme libre.

« Ce que le schéma hylémorphique reflète en premier lieu, c'est une représentation socialisée du travail et une représentation également socialisée de l'être vivant individuel (...). L'opération technique qui *impose une forme à une matière passive et indéterminée* n'est pas seulement

---

1. Gilbert Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 51.

une opération abstraitement considérée par le spectateur qui voit ce qui entre à l'atelier et ce qui en sort sans connaître l'élaboration proprement dite. C'est essentiellement l'opération commandée par l'homme libre et exécutée par l'esclave ; l'homme libre choisit de la matière, indéterminée parce qu'il suffit de la désigner génériquement par le nom de substance, sans la voir, sans la manipuler, sans l'apprêter : l'objet sera fait de bois, ou de fer, ou en terre. La véritable passivité de la matière est sa disponibilité abstraite derrière l'ordre donné que d'autres exécuteront. La passivité est celle de la médiation humaine qui se procurera la matière. La forme correspond à ce que l'homme qui commande a pensé en lui-même et qu'il doit exprimer de manière positive lorsqu'il donne ses ordres : la forme est donc *de l'ordre de l'exprimable* ; elle est éminemment active parce qu'elle est ce que l'on impose à ceux qui manipuleront la matière ; elle est le contenu même de l'ordre, ce par quoi il gouverne. Le caractère actif de la forme, le caractère passif de la matière, répondent aux conditions de la transmission de l'ordre qui suppose hiérarchie sociale : c'est dans le contenu de l'ordre que l'indication de la matière est un indéterminé alors que la forme est détermination, exprimable et logique<sup>2</sup>. »

La hiérarchie conceptuelle entre forme et matière se pose dès lors comme le fruit d'un processus de réification : un type particulier de rapport social se transpose en rapport matériel, constituant le principe d'individuation hylémorphique. Ce segment de l'analyse simondonienne pose donc l'hylémorphisme comme un « rapport de domination », exprimés dans les termes mixtes d'acteurs *humains* (concepteur et fabricant) et *matériels* (ou « non-humains »). Or, dans ce contexte, les notions d'*activité* et de *passivité*, initialement mobilisées par Simondon pour décrire les caractères propres de la forme et de la matière, se *transposent* alors à la description des relations entre acteurs humains : « la passivité est celle de la médiation humaine qui se procurera la matière<sup>3</sup> ». La critique simondonienne nous incite donc à identifier une notion théorique partageable par les champs humain et non-humain, rendant compte de la symétrie suggérée entre passivité de la matière et passivité de l'esclave.

La notion d'*agentivité*, entendue ici dans une acception rendant son application possible tant à des acteurs humains que non-humains<sup>4</sup>, constitue à ce titre une ressource centrale. La compréhension de la situation productive

---

2. *Ibid.*, p. 51. Italiques dans le texte.

3. *Ibid.*, p. 51.

4. Nous précisons plus en détails le sens donné à cette notion dans la section suivante.

comme un « champ d'agentivités humaines et non-humaines<sup>5</sup> » fournit en effet un cadre conceptuel nouveau à la description du rapport de domination hylémorphique. Dans ses aspects sociaux, ce rapport de domination peut désormais être interprété dans les termes d'une *privation d'agentivité*, traduisant la capacité socialement instituée du concepteur à interdire toute possibilité d'action autonome du fabricant : autrement dit, à s'opposer à l'expression libre de son agentivité. Simultanément, le privilège accordé à la forme traduit l'absence de considération pour les agents matériels du processus productif (matière, moule, machine...)<sup>6</sup>. Mais cette dernière proposition mérite d'être précisée : au sens strict, la forme elle-même ne possède pas d'agentivité dans le schéma hylémorphique, car elle constitue avant tout une notion abstraite, reflet géométrique pur des intentions du concepteur. Ainsi, il serait inexact de qualifier la prédominance conceptuelle de la notion de forme dans les termes d'une sélection de l'« agentivité de la forme » au détriment d'autres types d'agentivité matérielle : derrière l'activité de la forme se cache toujours l'action d'un concepteur. La logique de domination sociale de l'hylémorphisme transparait donc dans son « oubli » de toute agentivité matérielle, et signale alors une attention exclusive portée à l'agentivité du concepteur : le concepteur apparaît en définitive comme seul agent *actif* de l'ensemble du processus de production.

Cette analyse conserve toute sa validité dans le champ de la production non standard. En renvoyant la vision d'un processus productif traversé par l'autorité d'une forme « pure », géométrique, le régime *file to factory* exclut effectivement toute agentivité qui ne serait pas celle du concepteur. La *continuité* des processus *file to factory* n'exprime ainsi rien d'autre que l'aspiration à un passage « direct » de l'intention initiale du concepteur vers l'opération de matérialisation physique, dans un processus protégé de l'intervention de tout agent externe, c'est-à-dire de toute altération de l'intention initiale. Le régime *file to factory* représente ainsi, comme nous l'avons déjà noté, le rêve technologique d'une réalisation *effective* de l'idée d'une traduction « sans glissement de sens » du « dessin » à sa matérialisation, que Robin Evans avait identifiée comme une croyance implicite à toute pratique notationnelle de conception.

Cependant, la transposition de l'analyse sociale simondonienne au cadre du régime de la production numérique non standard suppose de préciser à nouveau les sources des agentivités à l'œuvre — autrement dit, d'identifier quels sont ici les *agents* susceptibles d'une capacité d'action. En effet, dans le cadre d'une utilisation de moyens de production *automatisés*, les « fabricants » ne désignent pas des acteurs humains, mais des machines à commande numérique :

---

5. Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, Chicago, University of Chicago Press, 1995, p. 11. Notre traduction.

6. Ce qui revient à négliger les aspects fondamentalement *énergétiques* de la prise de forme, comme souligné par l'analyse de Simondon.

le concepteur incarne donc ici, par définition, la seule source d'agentivité humaine. Le schéma de domination hylémorphique se traduit donc exclusivement, dans le contexte de la production non standard, dans les termes d'une domination d'agents *non-humains* — là où, dans la situation productive critiquée par Simondon, l'hylémorphisme se traduisait certes par une forme de domination de la matière, mais aussi par la domination concrète d'acteurs *humains*, comme les fabricants, soumis à l'ordre du concepteur.

Cette divergence sur le plan des acteurs ne change cependant pas les conclusions de l'analyse simondonienne : la nature non-humaine des « fabricants » intervenant dans le cadre de la production non standard n'empêche pas que ceux-ci puissent être considérés comme des « esclaves », dès lors que la notion d'esclavagisme est comprise dans le sens d'une *privation d'agentivité*. Dans son ouvrage *The Sympathy of Things: Ruskin and the Ecology of Design*<sup>7</sup>, Lars Spuybroek — l'un des concepteurs figurant dans l'exposition *Architectures non standard* — expose ainsi l'idée d'un paradigme de production numérique polarisé entre une phase de conception « artisanale » et une étape de fabrication robotique réalisée par des « esclaves d'acier<sup>8</sup> ». Participant d'un mécanisme de domination semblable à celui critiqué par Simondon, la vision proposée par Lars Spuybroek exemplifie ainsi la réticence des concepteurs non standard face à l'idée d'une expression libre d'agentivités matérielles au cours du processus de production.

Comme le note Antoine Picon, cette pensée de la machine comme « esclave » s'avère plus largement symptomatique d'une contradiction inhérente aux rapprochements fréquents entre le champ de la production numérique et les travaux de John Ruskin<sup>9</sup>, sensés appuyer l'idée d'un « artisanat numérique ». La vision proposée par Lars Spuybroek d'une fabrication réalisée par des « esclaves d'acier » se pose en effet comme la conclusion surprenante d'une position théorique inspirée par la vision ruskinienne de l'artisanat gothique.

En son cœur, la position ruskinienne décrit l'activité productive comme théâtre d'une *distribution d'agentivité*. On peut certes noter, dans l'organisation sociale des chantiers gothiques, la présence de la figure « centrale » du maître bâtisseur. Mais ce dernier ne saurait être considéré comme « l'architecte » de l'édifice final, dans le sens moderne du terme : le gothique se définit en effet comme un processus de convergence des « forces en présence dans la forme<sup>10</sup> ». La forme gothique n'est donc pas intégralement spécifiée à l'avance par le maître bâtisseur, mais émerge dans l'interaction d'un réseau d'acteurs,

7. Lars Spuybroek, *The Sympathy of Things: Ruskin and the Ecology of Design*, *op. cit.*

8. *Ibid.*, p. 58. Notre traduction.

9. Antoine Picon, « Free the Robots! », *op. cit.*, p. 148.

10. Lars Spuybroek, *The Sympathy of Things: Ruskin and the Ecology of Design*, *op. cit.*, p. 16. Notre traduction.

humains et non-humains : maître bâtisseur, artisans, matériaux, forces de gravité, structures d'organisation sociale. . . Deux caractéristiques du gothique, initialement introduites par John Ruskin dans son essai *The Nature of Gothic*<sup>11</sup>, jouent ici un rôle fondamental : la « variabilité » (*changefulness*) et la « sauvagerie<sup>12</sup> » (*savageness*). La variabilité renvoie à une capacité d'ajustement géométrique et « paramétrique<sup>13</sup> » des composantes élémentaires de l'architecture gothique, comme ses croisées d'ogives<sup>14</sup>. Elle relève donc d'une décision « macroscopique », correspondant à un travail de conception essentiellement réalisé par le maître bâtisseur<sup>15</sup>. La sauvagerie s'exprime en revanche dans les aspects matériels, à plus petite échelle, de l'architecture, et notamment dans la réalisation d'ornementations<sup>16</sup>. Elle rend donc compte d'un processus ouvert dans lequel les artisans peuvent exercer leur capacité d'invention, et au sein duquel la « maladresse » se trouve investie d'une dimension vitale.

L'idée spuybroekienne d'un artisanat numérique « non standard » se fonde sur le réinvestissement de ces notions de variabilité et sauvagerie — mais ces deux principes se trouvent désormais affectés à la conception seule<sup>17</sup>, sans que l'auteur n'y voie une contradiction avec ses inspirations ruskiniennes. Pourtant, privée de la possibilité d'une expression « sauvage », la fabrication devient un processus purement passif, déterminé à l'avance. Ses acteurs sont alors effectivement réduits en « esclaves d'acier ». Or, cette situation contredit directement l'idée ruskinienne d'une agentivité productive distribuée, réservant une large place à l'expression autonome des agents chargés de la fabrication<sup>18</sup>.

Emblématique des contradictions profondes de la production non standard et de la plupart des formulations de l'idée d'un « artisanat numérique », l'exemple de l'ouvrage de Lars Spuybroek nous donne ainsi l'occasion de poser, à l'inverse, la question suivante : peut-on imaginer un processus de production numérique ouvert à l'expression autonome d'agentivités matérielles, là

---

11. John Ruskin, *The Nature of Gothic: A Chapter of the Stones of Venice*, New York, Garland, 1877.

12. Lars Spuybroek, *The Sympathy of Things: Ruskin and the Ecology of Design*, op. cit., p. 16.

13. Dans le même sens où un « modéleur paramétrique » permet de générer un ensemble de variations d'un même modèle générique, correspondant à différents jeux de données géométriques de conception.

14. *Ibid.*, p. 19.

15. *Ibid.*, p. 26.

16. *Ibid.*, p. 13.

17. *Ibid.*, p. 58.

18. Cette discussion ne tient par ailleurs pas compte d'un second aspect problématique du projet de Lars Spuybroek. La défense du travail artisanal, chez Ruskin, possède en effet une dimension morale : il peut dès lors sembler problématique de déconnecter les idées de Ruskin de leur attention portée à la *personne* de l'artisan, et de les réinvestir dans le cadre d'un processus de production automatisé.

où la production non standard s'est traditionnellement caractérisée par une concentration exclusive de l'agentivité dans la personne du concepteur? Cette question dépasse en réalité la simple prise en compte des machines de fabrication, et s'étend à l'ensemble des agents *non-humains* intervenant au cours de la production. Elle implique donc, avant tout, une discussion plus approfondie du concept même d'agentivité non-humaine.

## 6.2 Agentivité non-humaine et émergence

Le concept d'agentivité renvoie tout d'abord à la notion d'agent. Le terme « agent » se rencontre à l'origine au sein du discours philosophique dans le sens général d'une « entité exerçant une action<sup>19</sup> ». En parallèle, une seconde acception de la notion d'agent se développe historiquement dans le contexte de la description de phénomènes physiques, renvoyant à l'idée d'une « force agissante », d'un « principe d'action<sup>20</sup> ». En langue anglaise, l'un des premiers usages correspondants se rencontre ainsi dans un traité d'alchimie publié en 1471, où le terme d'« agent » est utilisé pour désigner une « force capable d'agir sur la matière<sup>21</sup> ». Cette signification matérielle du terme « agent » connaît un développement accru au XIXe, rendant compte notamment des progrès réalisés dans le domaine de la chimie<sup>22</sup>. Ce type d'utilisations reste aujourd'hui fréquent dans la littérature scientifique, notamment en biologie (on peut par exemple citer la notion d'« agent pathogène ») ou en chimie (« agent tensioactif »...).

De manière générale, la notion d'agent décrit donc génériquement toute entité « capable d'exercer une action<sup>23</sup> », que cette entité soit humaine ou matérielle. Le concept d'agentivité, dans son acception « traditionnelle », renvoie cependant à une acception plus restreinte du terme « agent ». Classiquement, la compréhension philosophique de l'agentivité se fonde en effet sur des théories intentionnelles de l'action<sup>24</sup>, ce qui signifie que, parmi tous les types d'action possibles, les *actions intentionnelles* sont considérées comme les plus fon-

19. [Anon.], « Agent », *Oxford English Dictionary*, en ligne : <http://www.oed.com/view/Entry/3859> (consulté le 30 décembre 2016). Notre traduction.

20. [Anon.], « Agent », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/agent> (consulté le 30 décembre 2016).

21. [Anon.], « Agent », *op. cit.*

22. *Ibid.*

23. Markus Schlosser, « Agency », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2015, en ligne : <http://plato.stanford.edu/entries/agency> (consulté le 29 mai 2016).

24. Ces théories sont par exemple significativement représentées, dans la tradition analytique, par les travaux de Gertrude Elizabeth Margaret Anscombe et Donald Davidson. Voir notamment : Gertrude Elizabeth Margaret Anscombe, *Intention*, Cambridge, Harvard University Press, 1957 et Donald Davidson, « Actions, Reasons and Causes », *The Journal of Philosophy*, vol. 60, n° 23, 1963, p. 685–700.

damentales. Cette hiérarchie conceptuelle implique alors une compréhension restreinte de l'agentivité comme *capacité d'action intentionnelle*.

Au sein des théories intentionnelles de l'action, les intentions s'interprètent traditionnellement sous la forme de *représentations mentales*, construites en fonction des motivations, désirs et croyances de l'agent. Dans son acception classique, la notion d'agentivité affirme ainsi un lien *causal* entre la capacité même d'un être à agir intentionnellement et une certaine structuration de l'esprit permettant la construction de telles représentations mentales. Les théories standard de l'action décrivent en effet le mécanisme psychique conduisant à réaliser une action intentionnelle, autrement dit à exercer un forme d'agentivité, dans les termes d'une *instanciation* de certains états mentaux en lien avec des événements survenus dans l'environnement<sup>25</sup>.

Les théories intentionnelles de l'action, bâties sur l'idée d'agents capables de construire une représentation mentale du monde, constituent donc en priorité des théories de *l'agentivité humaine*. En vérité, la tendance à interpréter l'action en termes d'états mentaux (désirs, croyances, buts) semble constituer une prémisse fondamentalement humaine, comme l'ont montré plusieurs recherches en psychologie expérimentale, telles que l'expérience célèbre de Fritz Heider et Marianne Simmel sur le « comportement apparent » d'un ensemble d'objets<sup>26</sup>. Une compréhension purement intentionnelle de l'agentivité conduit ainsi à écarter toute notion d'agent qui ne s'inscrirait pas strictement dans le cadre du « principe d'action » humain. Par conséquent, les théories classiques de l'action échouent à rendre compte des capacités d'actions de certains êtres *non-humains*, vivants ou inertes, dont les comportements ne semblent pas régis par la notion d'intention : on peut penser notamment au cas de formes microscopiques de vie, mais également à des *ensembles* d'agents, vivants ou inertes (comme les essaims d'abeille), qui semblent relever d'une véritable capacité d'action *collective*, c'est-à-dire non assignable à l'instanciation localisée d'un état mental. De manière générale, la conception classique de l'agentivité échoue donc à rendre compte de la possibilité d'une agentivité *matérielle*.

Ces remarques conduisent à considérer le concept classique d'agentivité non comme une proposition philosophique générale, mais comme le reflet d'une théorie limitée à l'action d'agents intentionnels<sup>27</sup>. Il devient dès lors possible de formuler d'autres théories de l'agentivité, fondées sur des prémisses différentes que les notions d'intention et de représentation mentale. La notion d'agentivité non-humaine (ou matérielle) apparaît dès lors non seulement comme une possibilité conceptuelle, mais comme un enjeu théorique majeur.

25. Markus Schlosser, « Agency », *op. cit.*

26. Fritz Heider et Marianne Simmel, « An Experimental Study of Apparent Behavior », *The American Journal of Psychology*, vol. 57, n° 2, 1944, p. 243–259.

27. Markus Schlosser, « Agency », *op. cit.*

L'objectif principal de la plupart des théories non-intentionnelles de l'agentivité réside en effet dans le dépassement de « l'ontologie dualiste des hommes et des choses<sup>28</sup> » caractérisant l'ensemble de la pensée occidentale moderne : en d'autres termes, ces théories « alternatives » visent à dépasser l'asymétrie hiérarchique entre les humains, traditionnellement considérés comme les seuls à disposer d'une véritable capacité d'action, et les non-humains (nature, animaux, objets...), classiquement perçus comme passifs et soumis à la volonté humaine.

La théorie dite de l'« acteur-réseau », ou « sociologie de la traduction », issue des travaux réalisés par Madeleine Akrich, Michel Callon et Bruno Latour au Centre de sociologie de l'innovation de Mines ParisTech<sup>29</sup>, et étendue par divers auteurs, dont notamment John Law, constitue l'une des principales formulations d'une conception non-intentionnelle de l'agentivité. Selon la théorie de l'acteur-réseau, la nature humaine ou non-humaine des *acteurs* (définis comme « des entités *faisant* des choses<sup>30</sup> ») importe moins que la « chaîne complète le long de laquelle les compétences et les actions sont distribuées<sup>31</sup> ». La théorie de l'acteur-réseau se préoccupe donc en priorité de ces chaînes, ou *réseaux*, constituant des associations hétérogènes d'humains et de non-humains.

Comme l'a notamment montré Bruno Latour, la prise en compte des agentivités non-humaines représente un enjeu fondamental dans la plupart des problèmes majeurs du monde contemporain, comme celui de la crise environnementale. À l'heure de l'anthropocène, la vision moderne d'une nature passive et infiniment mobilisable par la science n'apparaît plus tenable : les problématiques environnementales constituent en effet le cas typique d'un problème global impliquant un large réseau d'acteurs, agissant à différentes échelles<sup>32</sup> : ressources naturelles, industries, dispositifs légaux, produits chimiques, phénomènes climatiques, espèces naturelles... Dans de telles situations, l'agentivité se trouve alors distribuée entre un nombre important d'acteurs interdépendants, soulignant la nécessité d'une approche *écologique*, entendue au sens d'une compréhension de l'écologie en tant que science des interactions entre

---

28. Andrew Pickering, « Living In the Material World », dans François-Xavier de Vaujany et Nathalie Mitev (dir.), *Materiality and Space: Organizations, Artefacts and Practices*, Basingstoke, Palgrave Macmillan, 2013, p. 25. Notre traduction.

29. Madeleine Akrich, Michel Callon et Bruno Latour (dir.), *Sociologie de la traduction : Textes fondateurs*, Paris, Presses des Mines, 2006.

30. Bruno Latour, « Where Are the Missing Masses? The Sociology of a Few Mundane Artifacts », dans Wiebe E. Bijker et John Law (dir.), *Shaping Technology / Building Society: Studies in Sociotechnological Change*, Cambridge, MIT Press, 1992, p. 241. Italiques dans le texte.

31. *Ibid.*, p. 243. Notre traduction.

32. Bruno Latour, *Nous n'avons jamais été modernes : Essai d'anthropologie symétrique*, Paris, La Découverte, 2013, p. 8.

l'homme et son environnement — ce qui inclut possiblement l'environnement naturel, mais aussi les contextes technique et social<sup>33</sup>.

Le développement d'un concept d'agentivité non-humaine, ou matérielle, renvoie ainsi à l'acception générale de la notion d'agent comme « force dotée d'une capacité d'action » : saisir les agentivités à l'œuvre dans une situation revient ainsi fondamentalement à dresser une liste des « forces en présence », humaines et non-humaines, avec lesquelles l'homme doit dialoguer<sup>34</sup>. Le dépassement du clivage ontologique entre humains et non-humains appelle alors à une définition de l'agentivité fondée sur la notion de *performance* : l'agentivité est avant tout comprise comme une capacité d'action dotée de conséquences *concrètes* dans le monde<sup>35</sup>. Peu importe, dès lors, que l'agent impliqué soit humain ou non-humain : il n'est en effet plus attendu ici de l'agent qu'il soit nécessairement doté d'une intentionnalité, c'est-à-dire d'une capacité de construire des *représentations* mentales du monde.

Dans son livre *The Mangle of Practice: Time, Agency and Science*<sup>36</sup>, Andrew Pickering développe ainsi l'idée selon laquelle le dépassement d'une ontologie dualiste, conduisant à la reconnaissance d'une notion d'agentivité *matérielle*, doit se traduire par l'adoption d'un point de vue *performatif*<sup>37</sup>, plutôt que *représentationnel*, sur le monde<sup>38</sup> — ce qui implique, notamment, de revisiter notre compréhension des pratiques scientifiques. Dans un point de vue *représentationnel*, la science est comprise, avant tout, comme une production de connaissances : la vision de la science est celle d'une « activité qui cherche à représenter la nature, à produire des connaissances qui cartographient, reflètent,

33. Jean Golfin, *Les 50 mots-clés de la sociologie*, Toulouse, Privat, 1972.

34. Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, *op. cit.*, p. 21.

35. Andrew Pickering, « Living In the Material World », *op. cit.*, p. 25.

36. Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, *op. cit.*

37. Nous utilisons ici le terme « performatif » dans un sens dérivé de l'anglais « performative », utilisé par Andrew Pickering pour qualifier, de manière générale, « ce qui a trait à la performance » ([Anon.], « Performative », *Oxford English Dictionary*, en ligne : <http://www.oed.com/view/Entry/140785>, consulté le 4 avril 2017, notre traduction). En français, le terme « performatif » dispose en effet d'un sens plus précis, qualifiant, en linguistique, un énoncé réalisant une action par le fait même de son énonciation ([Anon.], « Performatif », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/performatif>, consulté le 4 avril 2017). Également issu de l'anglais, ce sens est plus tardivement introduit par l'ouvrage de John Langshaw Austin, *How to Do Things With Words* (John Langshaw Austin, *How to Do Things with Words*, Oxford, Clarendon Press, 1962).

38. La présente discussion du concept d'agentivité matérielle, nécessairement trop sommaire, ne rend pas compte des divergences potentielles entre l'approche développée par Andrew Pickering et les formulations « classiques » de la théorie de l'acteur-réseau. On peut cependant noter que ces deux approches participent d'une compréhension *performative* de l'agentivité. Pour une discussion plus approfondie de ces questions, on pourra se référer à l'introduction du livre *The Mangle of Practice* (Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, *op. cit.*).

ou établissent des correspondances avec le monde tel qu'il est réellement<sup>39</sup> ». Dans une telle perspective, les notions de « fait » et d'« observation » scientifiques se substituent alors à celle d'agentivité. Ce point de vue trouve notamment à s'incarner dans la pensée positiviste : pour les positivistes, selon Ian Hacking, « [l]a seule forme de causalité dans la nature réside dans la régularité avec laquelle certains types d'événements suivent d'autres événements<sup>40</sup> ». À une interprétation de la causalité en termes d'*action* d'une entité matérielle sur une autre, les positivistes substituent l'idée de régularité dans l'observation : un rapport de causalité de A vers B signifie ainsi, uniquement, qu'un événement de type B suit toujours un événement de type A, chaque fois que ce dernier est constaté<sup>41</sup>. Le point de vue positiviste ne cherche donc pas à saisir le monde dans les actions matérielles qui s'y produisent, mais à le *représenter*, à créer des lois reproduisant l'image du monde tel qu'il est observé.

Le point de vue performatif vise à se repositionner, en un sens, au niveau de l'action : il participe de l'idée selon laquelle « le monde n'est pas rempli (...) de faits et d'observations, mais d'*agentivité*<sup>42</sup> ». En accord avec cette vision, le point de vue performatif ne réduit pas la pratique scientifique à une série d'observations réalisées par des « intellects désincarnés<sup>43</sup> », mais la considère d'abord sous l'angle de l'action : le monde matériel ne se manifeste pas aux scientifiques en tant que pure séquence d'observations, mais se révèle en tant qu'hôte de multiple formes matérielles d'agentivité, à travers les actions qu'il produit sur les scientifiques et leurs instruments. Pour Andrew Pickering, la pratique scientifique doit donc être comprise, fondamentalement, comme une extension de l'activité « quotidienne » qui nous conduit à « négocier avec l'agentivité matérielle<sup>44</sup> » du monde. Cependant, comme le souligne le terme d'« extension », la science ne se contente pas simplement de « négocier » avec les actions du monde matériel : elle cherche également à les *provoquer* à l'aide de machines<sup>45</sup>, d'*instruments*. L'agentivité matérielle des phénomènes se trouve dans ce cadre engagée dans une interaction circulaire avec, d'une part, l'agentivité humaine des scientifiques, et d'autre part, l'agentivité matérielle de leurs instruments. Selon Andrew Pickering, toute pratique scientifique se comprend

---

39. *Ibid.*, p. 5. Notre traduction.

40. Ian Hacking, *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983, p. 41. Notre traduction.

41. *Ibid.*, p. 46.

42. Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, *op. cit.*, p. 6. Notre traduction, italiques dans le texte.

43. *Ibid.*, p. 6. Notre traduction.

44. *Ibid.*, p. 6-7. Notre traduction.

45. *Ibid.*, p. 7.

alors, fondamentalement, dans les termes d'une « danse d'agentivité<sup>46</sup> » entre ses acteurs humains et non-humains.

Cette vision implique un changement de perspective radical sur la *matérialité*, autrement dit, sur la manière même dont nous sommes « liés » au monde matériel : notre environnement matériel ne se présente plus comme un « univers passif<sup>47</sup> », entièrement offert à la volonté de l'homme, mais comme un monde *actif*, rempli d'agentivité. Selon Pickering, cette vision traduit ainsi l'avènement d'une perspective « posthumaine » dans le domaine des sciences, au sens où « leurs variables explicatives » ne peuvent désormais plus être formulées exclusivement en termes « du monde humain et social<sup>48</sup> » : les hommes ne représentent qu'une fraction de l'agentivité à l'œuvre dans le monde.

Cette remise en cause de l'anthropocentrisme ne doit cependant pas être comprise comme la réactivation d'un traumatisme « copernicien », plongeant l'homme dans l'angoisse d'une centralité perdue : pour Andrew Pickering, elle participe au contraire d'un véritable *réenchantement* du monde. La reconnaissance des capacités performatives de notre environnement matériel « nous rattache densément et constitutivement au monde, plutôt qu'elle ne nous en sépare<sup>49</sup> ». Un monde peuplé d'agents non-humains peut en effet être décrit comme un système métastable, offrant les « conditions énergétiques » nécessaires à la création *émergente* de nouveaux phénomènes et artefacts.

La notion d'émergence peut être définie de manière générale comme la possibilité d'observer, au sein d'un système formé par l'interaction de plusieurs agents, des comportements non directement déductibles à partir de sa configuration de départ<sup>50</sup>. Contrairement à la vision « mécaniste » de la science classique, la notion d'émergence suppose ainsi une forme d'*indétermination* quant à l'issue de l'évolution d'un système. Non réductibles à la formulation d'un ensemble de causes (ou d'intentions) et de contraintes, les phénomènes émergents ne sont pas *prévisibles* dans le sens classique du terme : ils « arrivent<sup>51</sup> ». Pour Andrew Pickering, toute *pratique* définie par la rencontre d'agents humains et non-humains se définit fondamentalement comme une situation d'émergence : son évolution n'est ni réductible à l'intention humaine, ni simplement fonction de causes matérielles ; on assiste plutôt à une coévolution, caractérisée par une interaction et une influence réciproques, non-directionnelles, de l'ensemble des agents. L'issue de l'évolution du système

46. *Ibid.*, p. 21. Notre traduction.

47. Andrew Pickering, « Living In the Material World », *op. cit.*, p. 25. Notre traduction.

48. *Ibid.*, p. 26. Notre traduction.

49. *Ibid.*, p. 26. Notre traduction.

50. [Anon.], « Émergence », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/emergence> (consulté le 4 janvier 2017).

51. Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, *op. cit.*, p. 24. Notre traduction.

donne alors le « sentiment d'un moment de chance brute<sup>52,53</sup> ». Ainsi, la relation entre un jardinier et son bonsaï ne doit ainsi pas être interprétée selon l'idée asymétrique d'une « culture » de l'arbre, mais comme une « danse d'agentivité » menée *avec* l'arbre, produisant une « esthétique émergente » :

« In an obvious sense, keeping a bonsai tree is itself a decentred dance of agency, between the tree—a nonhuman agent—which continually grows new shoots in unpredictable places and directions, and a human agent who reacts to that, trimming the shoots here and there in pursuit of an emergent aesthetic, and so on, back and forth between the human and the nonhuman<sup>54</sup>. »

L'idée développée ici par Pickering dépasse une compréhension purement *matérielle* du concept d'émergence, qui réserverait ce dernier au comportement de systèmes entièrement non-humains, comme des systèmes physiques ou chimiques simples<sup>55</sup>. En effet, l'émergence ne se traduit pas seulement ici par la formation d'une structure matérielle, mais aussi par le développement d'un comportement humain. Cette compréhension établit une réciprocité du rapport entre agents humains et non-humains : si le jardinier cultive l'arbre, l'arbre cultive lui aussi le jardinier. Cette réciprocité des relations d'émergence s'exprime plus précisément en termes d'agentivité : pour Andrew Pickering, toute *pratique* se traduit ainsi par le développement simultané et réciproque de formes d'agentivité humaine et matérielle, et relève donc en ce sens d'un régime « hybride » d'émergence, matériel et humain. Analysant le champ des pratiques scientifiques, Andrew Pickering souligne ainsi que la mise à jour de comportements émergents de la matière — correspondant, par exemple, à la « découverte » d'une nouvelle substance chimique<sup>56</sup> — ne peut être analysé sans prendre en compte le développement émergent et simultané d'un ensemble de machines, de gestes et de compétences — autrement dit, sans envisager un

---

52. *Ibid.*, p. 24. Notre traduction.

53. Le terme de « sentiment », choisi par Pickering, a ici son importance. Les phénomènes émergents peuvent ainsi donner l'*impression* d'une évolution aléatoire, mais ne s'avèrent pas incompatibles avec la notion de causalité. Certains auteurs, rattachés au « courant » philosophique du « nouveau matérialisme », comme Manuel DeLanda, interprètent ainsi l'émergence dans les termes d'une causalité *non-linéaire* : voir notamment Manuel DeLanda, *A Thousand Years of Nonlinear History*, New York, Zone, 2000.

54. Andrew Pickering, « Living In the Material World », *op. cit.*, p. 26.

55. Sur la question de l'émergence en chimie, on pourra se référer, par exemple, aux travaux fondateurs de Turing : Alan Mathison Turing, « The Chemical Basis of Morphogenesis », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 237, n° 641, 1952, p. 37–72.

56. Andrew Pickering, « Living In the Material World », *op. cit.*, p. 31.

processus d'interaction et d'influence mutuelle entre des formes matérielle et humaine d'agentivité.

« Just as the material contours and performativity of new machines have to be found out in the real time of practice, so too do the human skills, gestures, and practices that will envelop them (...). Gestures, skills, and so on—all of these aspects of disciplined human agency come together with the machines that they set in motion and exploit. Here, then, we can note further degrees of symmetry between human and material agency. Just as material agency is temporally emergent in practice, so, necessarily, is disciplined human agency. And, furthermore, while the two are not continuously deformable into one another (...) they are intimately connected with one another, reciprocally and emergently defining and sustaining each other<sup>57</sup>. »

Cette remarque nous permet de revenir au rapprochement, esquissé précédemment, entre un « monde matériel », rempli d'agentivité, et la notion de *champ métastable* introduite par Simondon. Il convient pour ce faire de commencer par noter que l'évolution d'un système émergent, composé d'agents humains et non-humains, peut être considéré comme un processus d'*individuation* — à condition de ne pas se restreindre ici à une compréhension « physique » de la notion d'individu. Dans le cas de la pratique scientifique, l'individuation doit plutôt être comprise comme le processus produisant une nouvelle configuration de la « culture » scientifique au sens large, c'est-à-dire de l'ensemble des agents, humains et non-humains, composant le « système » scientifique<sup>58</sup>. On peut penser ici, par exemple, à la découverte d'une nouvelle substance chimique produisant une reconfiguration d'ensemble de la culture scientifique, marquée par l'émergence — entre autres — de nouveaux instruments, techniques, théories et compétences.

Ce parallèle avec la notion d'individuation étant réalisé, nous pouvons dès lors noter une similarité conceptuelle profonde entre la notion d'émergence, introduite par Pickering, et la théorie simondonienne de l'individuation. Ce rapprochement concerne plus précisément la description offerte par Andrew Pickering du rôle *structurant* de l'intention humaine. Toute théorie « performative » de l'agentivité s'expose en effet à un problème fondamental : comment rendre compte de la capacité humaine à agir selon des buts, autrement dit de la structure *singulière* de l'agentivité humaine, sans rétablir une hiérarchie ontologique entre humains et non-humains ? La réponse pro-

57. Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, op. cit., p. 17.

58. *Ibid.*, p. 3.

posée par Andrew Pickering consiste à définir l'intentionnalité dans le déroulement *temporel* même de la pratique. Pour Pickering, le but d'une pratique n'est jamais donné *a priori*, mais se construit toujours dans le « temps-réel » de l'expérience<sup>59</sup>. L'intentionnalité des agents humains engagés dans une pratique émerge alors en fonction de l'*état actuel* de la culture associée à cette pratique : « [l]a culture existante (...) forme littéralement la *surface d'émergence* de la structure intentionnelle de l'agentivité humaine<sup>60</sup> ». Mais l'émergence de cette intentionnalité s'inscrit un processus « dialectique<sup>61</sup> » : elle produit immédiatement une reconfiguration émergente de la culture dans son ensemble — correspondant, comme souligné précédemment, à un processus d'individuation. Cette dialectique, que Pickering qualifie de processus de « réglage » (*tuning*<sup>62</sup>), permet de rendre compte du rôle structurant de l'agentivité humaine, en évitant le double piège d'un dualisme ontologique classique — ce qui reviendrait à négliger le rôle des agentivités matérielles — et d'une symétrie parfaite entre humains et non-humains — ce qui nierait la possibilité même d'une agentivité intentionnelle. Or, le schéma d'un tel processus de réglage semble bien partager certains traits fondamentaux de la théorie simondonienne : l'émergence d'une intentionnalité humaine peut en effet être perçue comme l'introduction d'un « germe » *informant* dans un système « métastable », qui n'est autre que la culture elle-même, dans sa configuration précédant l'individuation<sup>63</sup>. Comme chez Simondon, l'individuation se traduit alors fondamentalement par une nouvelle configuration du système ; configuration qui, à nouveau, peut s'avérer métastable<sup>64</sup>, révélant un nouveau champ d'agentivités, humaine et non-humaine, capables de générer de nouvelles intentions humaines « structurantes ».

### 6.3 Méthodologie pour une pratique

La présentation des approches théoriques de Gilbert Simondon et d'Andrew Pickering nous permet désormais de mettre à jour un ensemble de perspectives pratiques offrant la possibilité d'un dépassement des limitations, no-

59. *Ibid.*, p. 19–20.

60. *Ibid.*, p. 20. Notre traduction, italiques dans le texte.

61. *Ibid.*, p. 22. Notre traduction.

62. *Ibid.*, p. 21.

63. Ce rapprochement avec la théorie simondonienne n'est pas sans limites. En effet, Simondon oppose à plusieurs reprises le concept de *transduction* à celui de dialectique, employé par Pickering : voir notamment Gilbert Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 111. Une discussion plus approfondie serait nécessaire pour mesurer l'impact de ces divergences sémantiques sur un plan conceptuel.

64. Notre rapprochement avec la théorie simondonienne se base donc ici en priorité sur le processus d'individuation *vitale*.

tées dans le chapitre précédent, du schéma de production non standard. La critique simondonienne de l'hylémorphisme nous a conduit à identifier la production non standard comme processus de *concentration* de l'autorité dans la personne du concepteur, et permis d'imaginer l'alternative de processus de production ouverts à l'expression autonome d'agentivités matérielles. Il convient donc désormais de formuler une méthodologie permettant la mise à l'épreuve pratique des conclusions de cette analyse.

La sociologie des sciences d'Andrew Pickering, présentée dans le chapitre précédent, constitue à ce titre une ressource centrale. Le schéma épistémologique d'une agentivité humaine dialectiquement liée à la « surface d'émergence » d'une culture pose en effet les bases d'une possible position *méthodologique* pour le concepteur numérique. Cette méthodologie peut s'énoncer, dans sa formulation générale, de la manière suivante : le dépassement du point de vue hylémorphique suppose de prendre en compte le substrat d'agentivités matérielles sous-tendant les processus de production numériques, autrement dit, d'évaluer la « surface d'émergence » offerte par ces processus, en *amont* de la définition de toute intention formelle — et, par conséquent, de toute spécification *explicite* de la « forme » en termes géométriques<sup>65</sup>.

En lien avec notre problématique initiale, posant la question d'une possible inscription des étapes de conception et de fabrication numériques dans une articulation non prescriptive, cette méthodologie générale pourra être concrètement réalisée selon plusieurs directions pratiques. Nous en présentons ci-dessous deux modalités possibles de mise en œuvre, dont nous examinerons ensuite trois formes de réalisations concrètes à travers un premier ensemble d'expérimentations, présenté dans le chapitre 7. Certaines des idées introduites ici seront ensuite mobilisées, à nouveau, dans la suite du texte, augmentées d'apports méthodologiques intégrant les développements ultérieurs de notre argument.

La première modalité selon laquelle l'évaluation de la « surface d'émergence » offerte par les processus de production numériques pourra conduire au dépassement des hiérarchies traditionnelles entre conception et fabrication réside tout d'abord dans la possibilité, récemment soulignée par Antoine Picon, de « prêter une attention accrue à ce qui se trouve déjà là<sup>66</sup> » dans la production

---

65. La fonction *générative* que nous prêtons ici au concept théorique de « surface d'émergence », d'abord doté d'une fonction explicative dans la théorie d'Andrew Pickering, résonne avec l'idée, récemment défendue par Alain Findeli, selon laquelle les recherches liées au champ de la conception appelleraient par nature à dépasser la distinction usuelle entre épistémologie et méthodologie. Sur ce point, voir notamment : Alain Findeli, « Rethinking Design Education for the 21st Century: Theoretical, Methodological, and Ethical Discussion », *Design Issues*, vol. 17, n° 1, 2001, p. 11.

66. Antoine Picon, « Free the Robots! », *op. cit.*, p. 151. Notre traduction.

numérique : autrement dit, dans la possibilité de développer une conscience plus profonde des agentivités matérielles impliquées dans les processus de production existants, à même d'entraîner une révision des usages et attentes établis par rapport à ces derniers. On pourra par exemple imaginer conduire des processus « normés » de production numérique dans des « plages de comportements » impossibles à décrire en termes hylémorphiques, car relevant fondamentalement de l'expression émergente de formes matérielles d'agentivité. Comme nous le verrons notamment dans nos projets *Gradient* et *Computational Ruins*, présentés au chapitre 7, cette approche suppose de changer de point de vue sur l'information de commande numérique : dans ces projets, les « parcours d'outil » fournis aux machines viseront ainsi moins à spécifier les actions utiles à l'usinage d'une géométrie prédéterminée qu'à définir de pures *trajectoires*, porteuses d'un potentiel de « matérialisation » indéterminé au moment de leur construction. Affirmant une forme d'irréductibilité du résultat fabriqué à l'information transmise aux machines, cette direction pratique constitue ainsi une réelle opportunité pour opérer un « relâchement » du rapport prescriptif traditionnel entre conception et fabrication.

Cette première approche ne constitue cependant qu'une des modalités possibles d'une expression autonome de formes matérielles d'agentivité au sein d'un processus de production numérique. En effet, la possibilité de *concevoir* des agencements matériels « personnalisés » — entendus dans le sens d'agencements « non-humains », et incluant donc autant la possibilité d'objets relevant du *hardware* (machines, matériaux...) que du *software* (algorithmes...) —, pensés dès le départ comme des entités *actives*, apparaît comme une seconde direction expérimentale majeure : nous l'aborderons dans le chapitre suivant à travers nos projets *Two* et *Computational Ruins*, avant d'en proposer un développement plus détaillé dans la suite de ce texte. Par sa nature, cette approche se rapporte à la notion de *recherche instrumentale* — ce qu'il faut ici comprendre non dans le sens d'une *utilisation* à visée « instrumentale » (ou productiviste) de moyens de production existants, mais dans l'idée d'une pratique réflexive de développement de nouveaux instruments, pouvant ensuite être « utilisés » pour produire des artefacts<sup>67</sup>. Comme nous le verrons, cette approche instrumentale signale fondamentalement un changement de nature de l'*objet même* des actions réalisées par le concepteur : d'une spécification explicite de la géométrie<sup>68</sup>, l'activité de conception se déplace vers la spécification d'un système (hardware et software) produisant l'artefact, dans ses

67. Samuel Bianchini, « Towards Organogenesis: For an Instrumental Approach in Research in Art », *Media-N*, vol. 11, n° 3, 2015.

68. Comme justifié précédemment, nous rattachons ici aux pratiques relevant d'une spécification explicite de la géométrie l'ensemble des pratiques « non standard », centrées sur la notion d'une *variabilité paramétrique*.

aspects « formel » et « matériel<sup>69</sup> », comme résultat d'un processus *émergent*. Cette approche se traduit dès lors, là aussi, par l'abandon d'une vision purement prescriptive de la conception, dans la mesure où l'émergence implique toujours une irréductibilité de l'évolution d'un système à ses « paramètres<sup>70</sup> » initiaux, c'est-à-dire une forme d'indétermination.

Les deux directions pratiques introduites ci-dessus s'avèrent bien entendu compatibles, et peuvent être décrites conjointement comme participant d'un point de vue « hacker<sup>71</sup> » sur la production numérique, dans la mesure où la notion de *hacking*, parmi ses multiples acceptions originelles, renvoie au moins autant au « détournement » de systèmes existants — numériques ou matériels — qu'au « bricolage » de nouveaux systèmes à l'aide de méthodes inventives<sup>72,73</sup>. Cette remarque nous amène ainsi à proposer une formulation générale de notre position méthodologique, posant les conditions d'une recherche *par la pratique* : nous chercherons ainsi, dans notre pratique, à *disposer des configurations d'agentivités non-humaines* — autrement dit, des *agencements* — afin d'établir des situations de production numérique relevant d'une forme d'interaction émergente entre les agents qui les composent<sup>74</sup>. Adhérant à cette méthodo-

---

69. Ces termes sont ici utilisées dans leur sens « intuitif », à des fins de simplification. Comme nous l'avons montré dans notre discussion de la théorie simondonienne, les notions mêmes de « forme » et de « matière » sont en effet ambiguës : leur signification dépend avant tout de l'*échelle* choisie pour l'examen d'un objet.

70. La notion même de « conception paramétrique » semble dès lors contradictoire avec l'idée d'une approche émergente. Cette remarque est l'occasion de pointer une contradiction sémantique du projet « paramétriciste » mené par Patrick Schumacher : ce projet se trouve en effet associé, dans les articles publiés par l'auteur, à l'utilisation de méthodes de conception qui, à l'instar des systèmes multi-agents ou des simulations dynamiques, mettant en œuvre une forme de variabilité *non paramétrique* — c'est-à-dire, une capacité à varier non réductible au développement linéaire de la forme selon des degrés de libertés spécifiés par un paramétrage initial.

71. Notre approche présente ainsi des similarités avec la notion de *design hacking* récemment mobilisée par Andrew Witt (Andrew Witt, « Design Hacking: The Machinery of Visual Combinatorics », *op. cit.*). La notion de *hacking* développée ici apparaît cependant moins explicitement liée à la problématique de la *machine* que celle de Witt, et s'avère plus généralement liée à l'idée d'un engagement explicite du concepteur avec une forme matérielle d'agentivité, que celle-ci soit portée par une machine, un logiciel, ou un matériau.

72. Brian Leibowitz, « Hack, Hacker, Hacking », dans T. F. Peterson et Eric Bender (dir.), *Nightwork: A History of Hacks and Pranks at MIT*, MIT Press, 2011, p. 5.

73. Sur la question des rapports entre bricolage et design, on pourra notamment consulter l'article de Sophie Fétro publié dans le numéro *Essais de bricolage : Ethnologie de l'art et du design contemporains* de la revue *Techniques & Culture*, dirigé par Thomas Golsenne et Patricia Ribault : Sophie Fétro, « Bricolages en design : Inventer des rapports non réguliers à la technique », *Techniques & Culture*, vol. 2, n° 64, 2015, p. 152–167.

74. Dans le chapitre 10, consacrée à la question d'une production numérique *située en contexte d'exposition*, notre discussion se portera sur la possibilité d'ajouter, aux interactions entre agents non-humains considérées ici, des formes d'interaction incluant les agents *humains*

logie, les expérimentations présentées dans le chapitre 7 poursuivront ainsi un double objectif : il s'agira à la fois d'expérimenter concrètement la prise en compte effective de formes matérielles d'agentivité au sein de processus de production numériques, tout en continuant à développer, dans le cadre d'un retour réflexif opéré sur ces expériences, notre argumentaire général en faveur d'un dépassement d'une pensée prescriptive de l'articulation entre conception et fabrication.

Au sens strict, aucune des expérimentations proposées dans le chapitre 7 ne remettra en cause la vision d'un processus productif séparé en deux étapes distinctes de conception et de fabrication ; mais comme nous le suggérons dès l'introduction de cette thèse, ce maintien d'une organisation productive « classique » ne doit pas nécessairement impliquer la prolongation des rapports hiérarchiques qui, traditionnellement, inscrivent les notions de conception et de fabrication dans une relation prescriptive. En d'autres termes, le maintien d'une séparation *pratique* entre conception et fabrication ne se traduira pas par la reproduction de la hiérarchie *conceptuelle* traditionnelle entre ces étapes, mais bien par la remise en cause de cette hiérarchie.

Cette remise en cause de l'articulation hiérarchique entre conception et fabrication implique nécessairement, comme nous l'évoquons plus haut, de repenser la nature même de l'activité de conception : le chapitre 7 nous conduira ainsi à développer une compréhension de la conception en tant que spécification de notations *ouvertes*, précisant les *comportements* de certains des agents matériels impliqués dans la fabrication<sup>75</sup>, plutôt que la géométrie attendue des artefacts à produire. Dans une telle perspective, l'activité de conception se destine à *préparer* la possibilité d'une invention formelle dans le moment même de l'étape de fabrication, plutôt qu'à enfermer cette étape dans un scénario de simple « exécution » de géométries pré-établies<sup>76</sup>. Cette possibilité d'envisager

---

du public. Nous verrons alors, dans ce contexte, que l'idée d'une configuration d'agentivité « disposée » peut être rapportée à celle de *dispositif*, dans le sens pris par ce terme en philosophie à partir des années 70, à travers notamment les travaux de Michel Foucault.

75. Ces comportements qualifient, en pratique, l'action des machines de fabrication, mais aussi celle des matériaux utilisés : il est ainsi possible d'imaginer développer des « notations ouvertes » permettant de *concevoir des matériaux* dotés de comportements spécifiques. Nous nous pencherons notamment sur cette possibilité dans notre discussion du projet *Computational Ruins*.

76. Cette idée d'une conception visant à *préparer* une possibilité expressive fait écho à la notion d'œuvre ouverte, introduite par Umberto Eco dans son livre *L'œuvre ouverte* (*Opera Aperta*), initialement publié en 1962. Pour Eco, les œuvres ouvertes sont des œuvres qui se manifestent comme « des sources d'interprétation possibles » (Umberto Eco, *The Open Work*, traduction d'Anna Cancogni, Harvard University Press, 1989, p. 68, notre traduction) — dans le double sens, intellectuel et physique, du terme d'« interprétation ». L'expérience esthétique d'une œuvre ouverte s'accompagne toujours d'une forme de performance, dans le sens où ces œuvres ne « s'offrent pas comme des œuvres finies », mais doivent être « menées à leur conclu-

la conception comme une production de notations ouvertes pourra bien entendu être généralisée au-delà des contextes singuliers de nos expériences : les projets présentés dans le chapitre 7 poseront ainsi, en ce sens, les bases d'un premier répertoire de moyens expérimentaux que pourront réinvestir d'autres chercheurs et praticiens. Le choix de nous inscrire, dans le prochain chapitre, dans une forme d'organisation « classique » de la production numérique constitue donc, en ce sens, un « premier temps » nécessaire de notre recherche, au vu de la réalité du champ de pratiques destiné à en accueillir les contributions : comme nous le suggérons déjà en introduction, la plupart des modes de production numérique, en dépit des discours du making et de l'artisanat numérique, continuent de répondre aujourd'hui à une forme d'organisation

---

sion » par celui qui en fait l'expérience (*Ibid.*, p. 3, notre traduction). Le livre d'Umberto Eco considère, par exemple, le cas d'œuvres « en mouvement », composées d'« unités structurales non planifiées ou physiquement incomplètes » (*Ibid.*, p. 12, notre traduction) : tel peut ainsi être le cas d'une composition musicale laissant l'ordre d'enchaînement de ses différentes sections à la discrétion de l'instrumentiste chargé de les jouer. Pour ce type d'œuvres, la pluralité d'interprétations appelée par la notion d'œuvre ouverte se fait alors pluralité d'*interventions* (*Ibid.*, p. 19) : l'expérience esthétique de l'œuvre devient inséparable d'une performance, envisagée dans le sens physique du terme. Mais la notion de performance peut également décrire, de manière plus générale, l'expérience de toute œuvre ouverte, même si celle-ci n'est pas « en mouvement » : un roman présenté selon une structure « physiquement » stabilisée (comme *Ulysses* de James Joyce) peut par exemple constituer une œuvre ouverte s'il entretient, à dessein, une forme d'indétermination quant à aux possibilités d'interprétation (intellectuelle) qu'il offre au lecteur — autrement dit, si ce roman, « au lieu de se baser sur une séquence nécessaire et univoque d'événements, privilégie le dévoilement d'un champ de possibilités, afin de créer des situations “ambiguës” ouvertes à tout type de choix opératoires et d'interprétations » (*Ibid.*, p. 44, notre traduction). C'est en réalisant ces « choix », ces interprétations, que le lecteur du roman deviendra alors effectivement performeur. Pour Umberto Eco, l'ouverture constitue une propriété fondamentale de l'expérience esthétique ; et même les œuvres d'art traditionnelles, bien que guidées par une « poétique de la nécessité », visant à circonscrire leurs possibilités d'interprétation à celles prévues par leurs auteurs, n'en restent pas moins, en pratique, « ouvertes à une plage virtuellement illimitée de lectures possibles » (*Ibid.*, p. 55, notre traduction). Seules certaines œuvres sont cependant explicitement créées en tant qu'« œuvres ouvertes » : pensées pour favoriser une pluralité d'interprétations possibles, elles s'orientent ainsi *structurellement* vers la recherche d'une forme d'ambiguïté et d'indétermination. La poétique de l'œuvre ouverte est ainsi inséparable d'une certaine forme de préparation : l'artiste dispose des potentialités destinées à être actualisées par un agent, autre que lui — le « performeur » de l'œuvre. Même si Umberto Eco fait ici référence exclusivement à des agents humains, là où nous nous concentrerons, dans le prochain chapitre, sur les performances d'agents *matériels* (machines, matériaux...), la notion de notation ouverte s'inscrit ainsi en résonance avec certaines idées développées dans *L'œuvre ouverte*. La dernière partie de notre thèse nous conduira, par ailleurs, à nous intéresser explicitement à la question des performances du public, à travers l'examen d'une notion de production participative.

productive caractérisée par une stricte séparation pratique entre conception et fabrication<sup>77</sup>.

Ces précisions étant apportées, il convient malgré tout de noter que la perspective d'une remise en cause de l'organisation productive traditionnelle des modes de production numériques, autrement dit de la *linéarité* instituée entre les étapes de conception et de fabrication — au-delà d'une « simple » remise en cause des rapports hiérarchiques entre ces étapes —, doit pourtant constituer l'aboutissement logique de notre démarche. À partir du chapitre 8, nous serons en effet conduits à discuter l'idée d'une production en « temps-réel », remettant en cause non plus seulement la nature prescriptive, mais également le caractère temporellement linéaire de l'articulation entre conception et fabrication ; nous montrerons alors, en revenant sur les expériences présentées dans le chapitre 7, que seul l'horizon conceptuel et pratique d'une telle remise en cause permet d'opérer un véritable dépassement de la tendance hylémorphique traditionnellement dominante dans les discours et pratiques de la production numérique. S'il n'est pas question de nous livrer ici à un exposé anticipé de cet argument, l'évocation de ce développement à venir de notre exposé nous per-

---

77. Même les formes les plus « interactives » du processus file to factory, dont UNISURF constitue sans doute le premier exemple historique, continuent aujourd'hui la plupart du temps de dépendre d'un « point de non retour » au-delà duquel les spécifications manipulées interactivement par le concepteur deviennent *figées*, marquant ainsi, par définition, l'entrée dans une étape de « fabrication » de l'objet. En termes de flux de travail, cette étape correspond usuellement à la production d'une version « définitive » d'un fichier numérique, lequel cesse alors de constituer le support du travail de conception pour adopter un rôle purement notationnel. Cette remarque s'applique également à la plupart des situations productives associées à la notion d'« artisanat numérique ». Force est de reconnaître, en effet, que l'idée d'un artisanat numérique relevant d'une forme de production « autographique » correspond à une vision idéalisée des pratiques actuelles. S'il est vrai que le renforcement croissant des possibilités d'intégration CAO/FAO a, au cours des dernières décennies, contribué à démocratiser le « rapprochement » (en termes temporels) entre les étapes de conception et de fabrication, initialement réservé à des technologies industrielles (telles qu'UNISURF), les outils utilisés par les « makers » et les « artisans numériques » s'apparentent davantage, précisément, à des versions « miniaturisées » de ces technologies, plutôt qu'à des « extensions prothétiques des mains de l'artisan » (Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, *op. cit.*, p. 45, notre traduction). En d'autres termes, aussi « fluide » soient-ils, les processus de travail des « artisans numériques » contemporains maintiennent, la plupart du temps, une dimension « classiquement » notationnelle : les machines à commande numérique qu'ils mobilisent sont le plus souvent opérées à partir de représentations figées d'une géométrie, et non mises en œuvre dans un rapport direct avec le geste de l'« artisan ». Au-delà de cette remarque, l'idée même selon laquelle les technologies de production numérique pourraient opérer une « fusion » entre conception et fabrication se trouve plus fondamentalement mise en cause, comme le note Antoine Picon, par l'épaisseur des *médiations* techniques nécessaires à toute articulation entre hardware et software (Antoine Picon, « Architecture and the Virtual: Towards a New Materiality », *op. cit.*, p. 116) — une épaisseur entrant évidemment en contradiction avec l'engagement *direct* avec la matière que présuppose la notion même de régime autographique.

met de préciser un aspect supplémentaire et important de notre méthodologie de recherche, en donnant un sens à l'idée selon laquelle les expérimentations présentées dans le chapitre 7 constitueraient les « marqueurs » d'un état *intermédiaire* d'avancement de nos travaux.

Le concept de *prototype*, développé par Élie During<sup>78</sup>, permet de préciser cette idée. Directement inspirée du sens pris par le terme de « prototype » dans le domaine industriel, la notion de prototype est en effet introduite par Élie During pour qualifier, en art, un artefact rendant compte d'une étape spécifique de l'avancement d'un projet : c'est ainsi par sa capacité à montrer l'idée en cours de réalisation, et non par son éventuelle nature « technologique », que le prototype « artistique » (au sens d'Élie During) se rapproche conceptuellement du prototype industriel. Prenant la forme d'un diagramme, d'un schéma, d'un objet, le prototype artistique ne prétend pas constituer l'incarnation « définitive » d'une idée : tout en prenant une forme matérielle, il continue ainsi de fonctionner comme un *projet*, et s'avère intimement lié à l'existence d'une démarche de recherche, dont il permet de dresser un état des lieux à un instant *t*. Contrairement à la vision romantique d'une œuvre ambitionnant de se faire l'écho du flux continu, vital, de la créativité de l'artiste, le prototype se donne ainsi à voir, et à *lire*, comme une « coupe » opérée dans une activité de recherche. La propriété de lisibilité constitue, de fait, une qualité centrale de tout prototype, et un critère permettant d'identifier, ou non, la qualité « prototypique » d'une production artistique donnée. Dans une conférence donnée en 2006, Élie During note ainsi : « [j]e tiens à cette notion de coupe, parce que dans la notion de coupe il y a l'idée presque géologique (...) de strates. Et elles sont lisibles. C'est cela l'intérêt d'une coupe en géologie, on voit bien comment s'organisent (...) les plans d'un terrain. Par analogie, je dirais qu'un prototype, s'il propose bien une coupe, doit faire apparaître les différentes strates, les différentes questions qui animent une recherche ou un projet<sup>79</sup> ». En d'autres termes, tout prototype artistique constitue un objet *expérimental*, au sens scientifique du terme : il doit faire apparaître l'hypothèse de recherche explorée, et s'ouvrir à une « évaluation » permettant de déterminer, au-delà de ses qualités esthétiques propres en tant qu'artefact, sa capacité à vérifier ou invalider cette hypothèse.

Cette notion de prototype nous permet d'éclairer le statut « intermédiaire » que nous accordons, dans cette discussion méthodologique, aux artefacts pré-

---

78. Élie During, « Prototypes (pour en finir avec le romantisme) », *Les Cahiers d'Artes*, n° 3, 2007, p. 91-118.

79. Élie During, « Redéfinir le statut de l'œuvre d'art », enregistrement audio d'une conférence donnée à la Friche Belle la Belle de Mai, Marseille, 3 novembre 2016, 2006, en ligne : [https://www.alphabetville.org/article.php3?id\\_article=44](https://www.alphabetville.org/article.php3?id_article=44) (consulté le 16 juin 2017). Notre transcription.

sentés dans le chapitre 7. Ces artefacts nous permettent en effet de rendre compte d'une première hypothèse examinée lors du déroulement de cette thèse : l'idée selon laquelle, par la production de « notations ouvertes », l'organisation productive classique des modes de production numériques (caractérisée par la présence d'une séparation pratique entre conception et fabrication) pourrait être emmenée dans des « plages de comportements » impossibles à interpréter selon le point de vue hylémorphique traditionnel — point de vue qui, comme nous l'avons montré, s'est jusqu'à présent trouvé renforcé par la notion de production non standard. Les artefacts présentés dans le chapitre 7 peuvent ainsi être considérés comme « intermédiaires » au regard de l'ensemble de la recherche menée dans cette thèse, dans la mesure où l'hypothèse dont ils rendent compte — en tant que *prototypes* — occupe, elle-même, une position intermédiaire dans le développement de notre exposé. Il s'agira ensuite, dans les étapes ultérieures de notre argumentaire, de remettre en jeu cette première hypothèse, tant par le biais d'un retour conceptuel sur les expériences menées dans son cadre, que par le développement de nouvelles directions d'expérimentation pratique.

## Chapitre 7

# Expérimentations : notations ouvertes

### 7.1 *Gradient*

Ce chapitre va nous permettre de présenter les résultats d'une première série d'expériences réalisées dans ce cadre méthodologique, explorant la possibilité d'une expression libre d'agentivités matérielles au cours des phases de conception ou de fabrication. Le premier des trois projets que nous souhaitons ici discuter, *Gradient*, a été développé en 2014 à l'École nationale supérieure des Arts Décoratifs, au cours de notre première année de recherche doctorale. Ce projet exploite directement l'idée, annoncée dans la section 6.3, de conduire des processus « normés » de production numérique dans des plages de comportements impossibles à décrire en termes hylémorphiques : il s'agit ici plus spécifiquement d'user du processus de découpe laser<sup>1</sup> dans l'optique de provoquer l'expression émergente d'une forme d'agentivité matérielle d'habitude maîtrisée et « invisibilisée » dans son régime d'utilisation habituel, et permettre ainsi une production d'artefacts dotés d'une matérialité non réductible à la géométrie de l'information de commande de la machine. Ce projet s'inscrit ainsi pleinement dans la démarche « hacker » revendiquée au cours de la section précédente, comprise ici comme une activité visant à « détourner » des systèmes techniques existants de leurs fonctions usuelles. Il ne s'agit pas tant d'altérer le fonctionnement de la machine que de lui faire emprunter des « chemins de traverse » : notre approche cherche ainsi à développer de nouvelles possibilités expressives du procédé de découpe laser sans intervenir physiquement sur la machine elle-même, autrement dit, sans dévier à aucun moment de son fonctionnement « normal ».

Développé industriellement à partir de 1965<sup>2</sup>, le procédé de découpe laser utilise l'énergie d'un faisceau laser focalisé pour élever très fortement la température d'une zone réduite du matériau, jusqu'à provoquer la vaporisation de

---

1. Comme nous le verrons dans la suite de cette section, nous nous sommes intéressés plus spécifiquement au procédé de *gravure* laser, plutôt qu'à celui de découpe. Ces deux procédés s'avèrent cependant directement liés l'un à l'autre, et se trouvent pris en charge par les mêmes machines : nous nous référerons donc ici, par souci de simplicité, à la notion générique de « découpe laser ».

2. Joan Lisa Bromberg, *The Laser in America, 1950–1970*, Cambridge, MIT Press, 1991, p. 202.

celle-ci. Ce procédé est aujourd'hui largement répandu dans le monde industriel, ainsi que dans des contextes de production à plus petite échelle (écoles d'art, de design et d'architecture, agences, makerspaces). Il permet de travailler une large gamme de matériaux, comme les métaux (aluminium, acier inoxydable. . .), les cuirs et les textiles, les polymères (PMMA, acétate de cellulose), ou encore tous les papiers et cartons. La découpe laser s'utilise typiquement sur des matériaux conditionnés sous forme de plaques minces, bien qu'elle puisse également être mise en œuvre sur les surfaces d'objets « en volume ».

Comme toute machine à commande numérique, les découpeuses laser sont contrôlées à partir d'instructions codées spécifiant les trajectoires suivies par la tête de découpe (parcours d'outil). Ces trajectoires sont rarement spécifiées de manière directe par l'utilisateur : il est plus courant que celui-ci dessine le profil des objets à découper sur un logiciel de conception traditionnel (typiquement Illustrator ou AutoCAD), et s'en remette à une solution automatique (incluse dans le pilote de la machine) pour opérer la conversion de ces profils en instruction de pilotage du laser. Ces solutions de génération automatisée de parcours d'outils, basées sur les spécifications géométriques fournies par l'utilisateur, se sont largement imposées depuis l'introduction en 1959 de la première d'entre elle, le langage APT, présenté dans la section 3.2. Comme nous le notions alors, l'avantage d'une génération automatisée des instructions de commande par rapport à leur « écriture » manuelle réside non seulement dans le gain de productivité apporté par cette solution, mais également dans la possibilité de travailler ainsi des formes plus complexes, le logiciel se chargeant désormais d'incorporer à la génération de trajectoires un ensemble de contraintes géométriques et mécaniques liées aux propriétés de l'outil, du matériau et de la machine. La médiation opérée par les logiciels de génération de parcours d'outils permet en ce sens à l'utilisateur de se concentrer en priorité sur la conception géométrique de l'objet, plutôt que sur la programmation de la machine : dans la plupart des cas, l'utilisateur fait alors l'expérience d'une forme de traduction directe « du fichier à l'usine ».

Plus encore que dans les procédés de fraisage numérique, cette idée d'un passage direct de la forme à sa réalisation matérielle se fait particulièrement sensible dans le cas de la découpe laser : le procédé utilisé apparaît en effet plus « propre » que le fraisage, dans le sens où les quantités de matériau retirées s'avèrent infimes (liées à l'épaisseur du faisceau laser) et où celles-ci, vaporisées, sont automatiquement retirées de la zone de travail ; par ailleurs, là où les procédés de fraisage numérique nécessitent typiquement la réalisation d'au moins deux passes d'usinage distinctes (ébauche et finition), la découpe laser produit « en une fois » un objet conforme à la géométrie spécifiée.

Cette immédiateté technique du lien entre la forme et sa réalisation matérielle, constatée dans la plupart des cas d'utilisation « normale » de la découpe laser, nous a incité à imaginer un usage de ce procédé jouant au contraire sur la

mise en œuvre d'une réponse émergente du matériau, induisant une autonomie relative de l'étape de fabrication par rapport à celle de conception.

La figure 7.1 présente l'un des artefacts obtenus au cours de la série d'expériences réalisées dans cette perspective. L'objet se présente sous la forme d'un panneau rectangulaire de  $30,5 \times 50,8$  cm sur une épaisseur d'1 cm, formé en apparence de deux surfaces nettement séparées par une frontière rectiligne : une bande métallique lisse et un aplat de couleur noire. Sur cette dernière partie, l'aspect de la matière n'est pas uniforme : une texture d'apparence organique s'étale à partir du bord externe du panneau, révélant des stries longitudinales agencées selon une progression régulière. Très denses près du bord du panneau, ces stries s'espacent progressivement jusqu'à se fondre, à proximité de la zone métallique, avec la teinte sombre du matériau. Cette teinte elle-même varie continûment : sombre à proximité des bords, elle s'éclaircit progressivement au centre de la plaque, ou plus exactement semble révéler par transparence une couleur brunâtre que l'on devine, également, dans les surfaces calcinées du coin supérieur droit.

En s'approchant de l'objet (figure 7.2), on remarque qu'il se compose de deux éléments : une plaque d'épaisseur fine est collée sur une planche de contreplaqué bouleau de 9 mm d'épaisseur. Ce constat peut dès lors conduire à formuler une première hypothèse quant à l'origine de la surface sombre visible sur le dessus du panneau : la couleur brune qui semble s'y révéler par endroits, et par transparence, ne serait-elle pas celle du bois lui-même, rendu plus ou moins visible par l'action du laser ? En d'autres termes, cette surface sombre ne serait-elle pas obtenue par la calcination du panneau, plus ou moins prononcée selon les zones considérées ? Cette idée semble corroborée par l'aspect organique de la texture observée dans la zone sombre, dont les stries rappellent le veinage naturel du bois. L'examen rapproché de la plaque invalide cependant cette hypothèse : la surface sombre et la zone métallique appartiennent toutes deux à la même plaque de fine épaisseur, collée sur le contreplaqué. Une conclusion s'impose alors : ces deux surfaces représentent deux états de traitement distincts d'un même matériau métallique, et la planche de contreplaqué n'est là que pour rigidifier l'ensemble — et introduire, à dessein, une tension esthétique dont nous venons de nous faire l'écho dans notre discussion des différentes interprétations possibles de l'origine de l'objet.

La figure 7.3 révèle l'origine de la texture formée sur la face supérieure de l'objet, en présentant le détail de son processus de fabrication : une plaque d'aluminium<sup>3</sup> est gravée dans sa longueur par une découpeuse laser, suivant une série de mouvements longitudinaux, progressant d'un bord à l'autre de la

---

3. Nous avons utilisé un type d'aluminium spécifique, commercialisé sous le nom d'AlumaMark (<https://alumamark.com>, consulté le 12 mai 2017), spécifiquement traité afin de pouvoir être gravé à l'aide du type de découpeuse laser à laquelle nous avons accès (laser CO<sub>2</sub>).

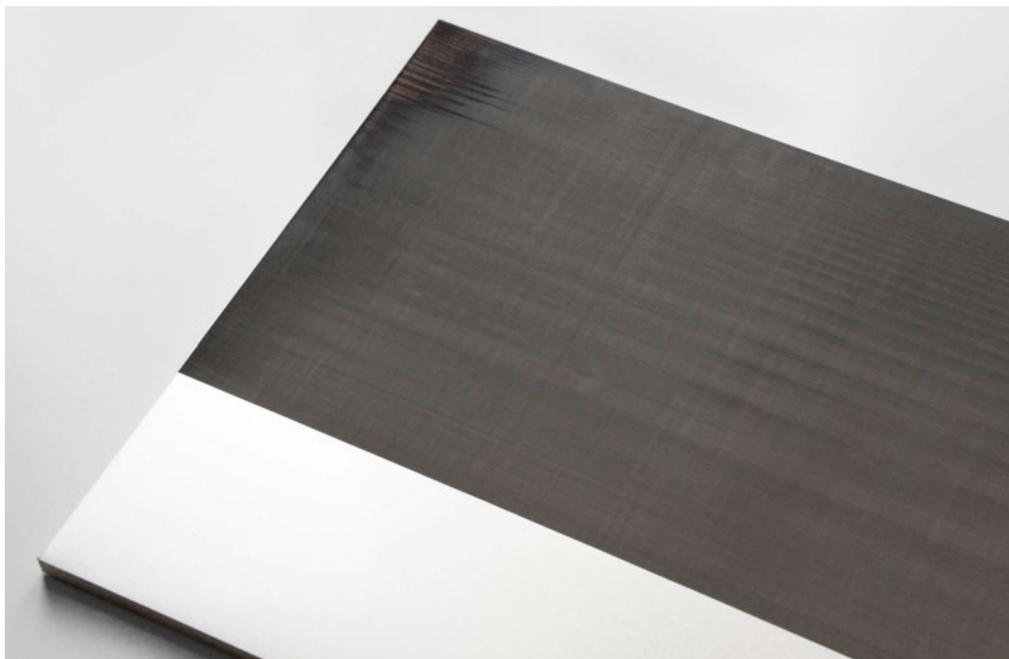


Fig. 7.1 — *Gradient.*

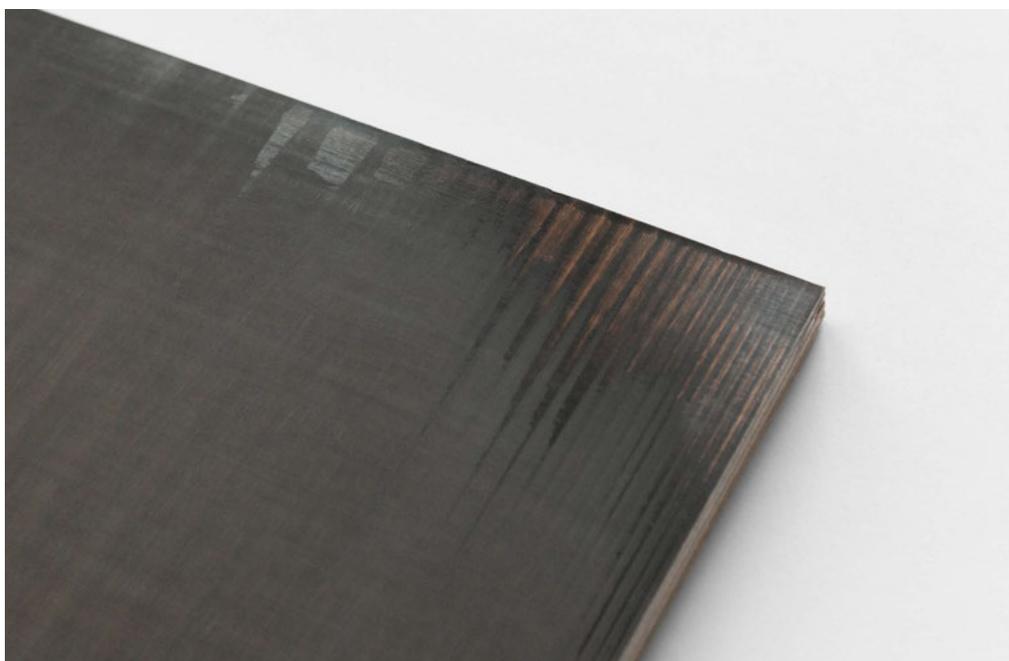


Fig. 7.2 — *Gradient.*

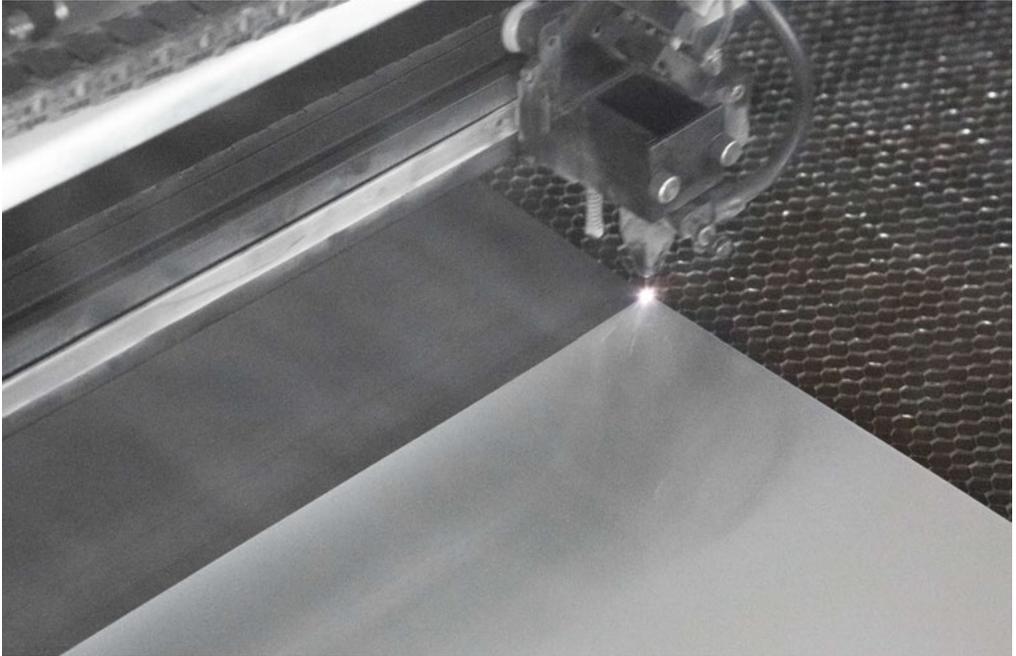


Fig. 7.3 — Détail du processus de fabrication.

plaque. De manière usuelle, l'expression « gravure laser » fait référence à une utilisation de la machine à une plus faible puissance d'émission du faisceau, permettant effectivement de graver des motifs, des images ou des lettrages à la surface d'objets, sans « traverser » cette surface. Les opérations de gravure visent ainsi par nature à produire des géométries « pleines », là où le procédé de découpe s'attache uniquement à suivre les contours des formes à produire, dans l'objectif de permettre leur séparation du reste du matériau. Pour prendre en charge les besoins spécifiques de la gravure, les découpeuses laser proposent usuellement un mode d'opération « par balayage » : ce mode substitue au suivi des contours un mouvement de balayage « ligne par ligne » des formes spécifiées, destiné à les couvrir dans leur ensemble, détails intérieurs compris.

Au cours de nos recherches, nous nous sommes intéressés à ce mode de fonctionnement en balayage pour sa capacité à travailler continûment la surface du matériau : là où le passage du faisceau le long d'un contour à découper possède, en chaque point de la trajectoire, un caractère « ponctuel », la gravure par balayage prend en effet la forme d'une opération maintenue dans le temps, progressant par une série d'incrémentes minimales au sein de la surface à usiner. Cette compréhension du balayage comme opération continue rejoignait, à notre sens, la notion simondonienne de *modulation*, et la vision d'une « mise en variation continue de la matière » reprise par Gilles Deleuze dans sa discussion du concept d'objectile : dans la mesure où l'action du faisceau laser sur le matériau se comprend ici, dans le sens le plus strict, comme un

*apport d'énergie*, le balayage induit en effet le renouvellement permanent d'un rapport énergétique entre forme et matière, une caractéristique centrale de la notion de modulation, soulignée dans la section 4.5. Jouer de cette dimension énergétique nous semblait dès lors crucial afin de développer une approche du procédé de gravure laser produisant des résultats impossibles à décrire en termes hylémorphiques, dans la mesure où, comme remarqué dans les sections 5.2 et 5.3, l'hylémorphisme peut précisément se comprendre comme l'oubli des conditions énergétiques présidant à toute opération de prise de forme. L'enjeu résidait ainsi pour nous dans la possibilité de *moduler* la répartition de l'énergie apportée par le laser de sorte à induire l'expression continue d'un comportement matériel émergent, autrement dit, d'être capables de nous doter de la *forme* adéquate à la réalisation de cette modulation<sup>4</sup>. Comme nous allons le voir à présent, cet objectif implique de revisiter la notion même de forme telle qu'elle est intuitivement comprise dans le cadre d'un procédé de fabrication numérique comme la gravure laser : la forme modulatrice dont nous souhaitons nous doter à présent n'est plus le donné géométrique et prescriptif recherché par la vision traditionnelle de la conception, mais une pure *trajectoire*, spécifiée par le concepteur afin d'induire un profil particulier de « répartition de l'énergie » au contact d'une matière active, envisagée dans ses possibilités d'expression autonome.

Traditionnellement, le processus de balayage est réservé à la gravure de petites surfaces, comme celles d'un logotype doté de formes « pleines » qu'il s'agirait de reproduire sur un objet (figure 7.4). Dans d'autres cas d'utilisation, le balayage est utilisé pour graver une image sur un matériau : pour ce faire, la puissance du laser est modifiée en cours de balayage, de manière proportionnelle aux niveaux de gris présents sur l'image. L'image est alors parcourue et gravée ligne par ligne, ses zones les plus sombres correspondant à l'utilisation de la puissance de gravure la plus élevée. Dans chacun de ces cas, les instructions de contrôle correspondant au comportement de balayage sont conditionnées à l'objectif de réaliser « fidèlement » une forme prédéfinie. Par contraste, nous souhaitons concevoir un comportement de balayage susceptible d'induire des effets matériels émergents, non spécifiés dans le détail de l'information de commande transmise à la machine. Pour ce faire, nous nous sommes orientés vers le dessin de géométries très simples, que nous avons ensuite fournies au pilote de la découpeuse laser non pas pour les voir se réaliser à l'identique, mais afin de provoquer le calcul de parcours d'outils adaptés à

---

4. Comme nous l'avons montré dans la section 5.4, tout processus d'individuation peut, selon Simondon, être compris comme une opération de modulation dans laquelle la forme correspondrait à l'élément modulateur : « la matière est ce qui véhicule [l'énergie] et la forme ce qui module la répartition de cette même énergie » (Gilbert Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 46).

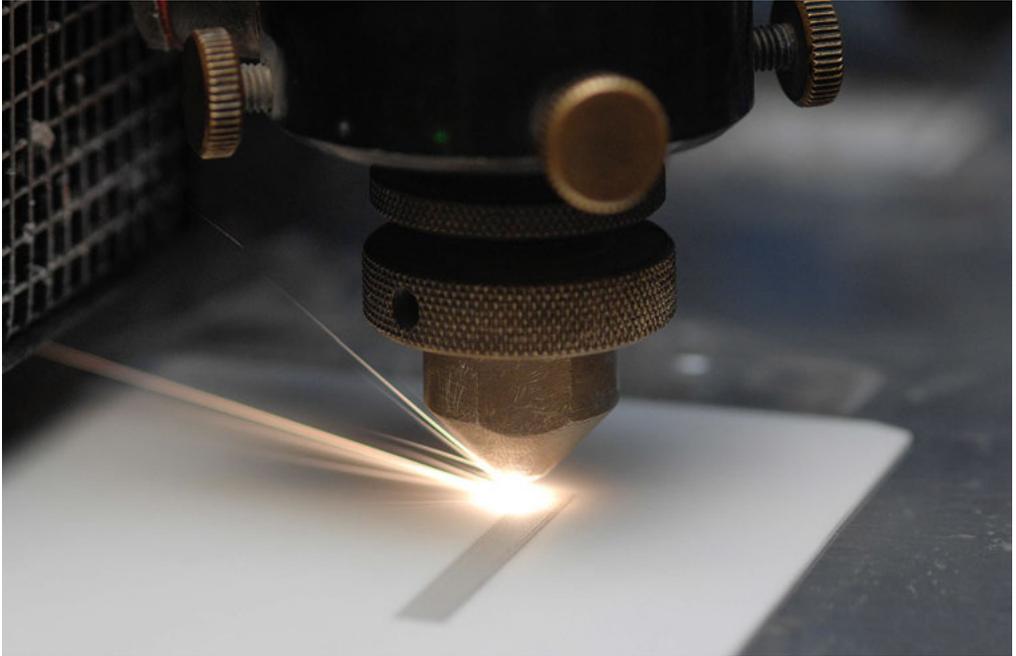


Fig. 7.4 — Gravure laser d'un logotype doté de formes pleines (source : <http://www.diepolishingindia.in/laserEtching.html>).

notre projet d'une mise en œuvre d'un comportement de balayage apparenté à une modulation. Cette approche visait à « contraindre » la procédure de génération automatique de parcours d'outils à produire le type de trajectoires que nous recherchions, à partir d'une géométrie conçue de manière adéquate : il s'agissait ainsi d'une manière « détournée » de spécifier les trajectoires suivies par la machine<sup>5</sup>.

La figure 7.5 présente les formes utilisées pour générer les trajectoires d'usinage : affichées, en vue isométrique, à la verticale des textures matérielles obtenues, elles se composent d'une série de rectangles découpant une partie de la surface du matériau en quatre zones longitudinales de même largeur. La simplicité du vocabulaire géométrique ici adopté relevait avant tout d'une stratégie *pratique* : il s'agissait de se placer dans un cadre suffisamment simple pour que le comportement du pilote de la machine puisse être anticipé depuis le moment même de l'étape de conception, dans la perspective d'obtenir le type de trajectoires d'usinage recherché. Traitées par le pilote de génération automatique des trajectoires d'usinage, ces zones donnent en l'occurrence lieu à un

---

5. Une méthode plus robuste, et plus satisfaisante d'un point de vue conceptuel, consisterait à écrire *directement* les instructions de pilotage de la machine, sans passer par la production d'une géométrie « intermédiaire » : nous mettrons notamment à profit ce type d'approche dans notre projet *Unspecified Clay*, présenté dans le chapitre 9.

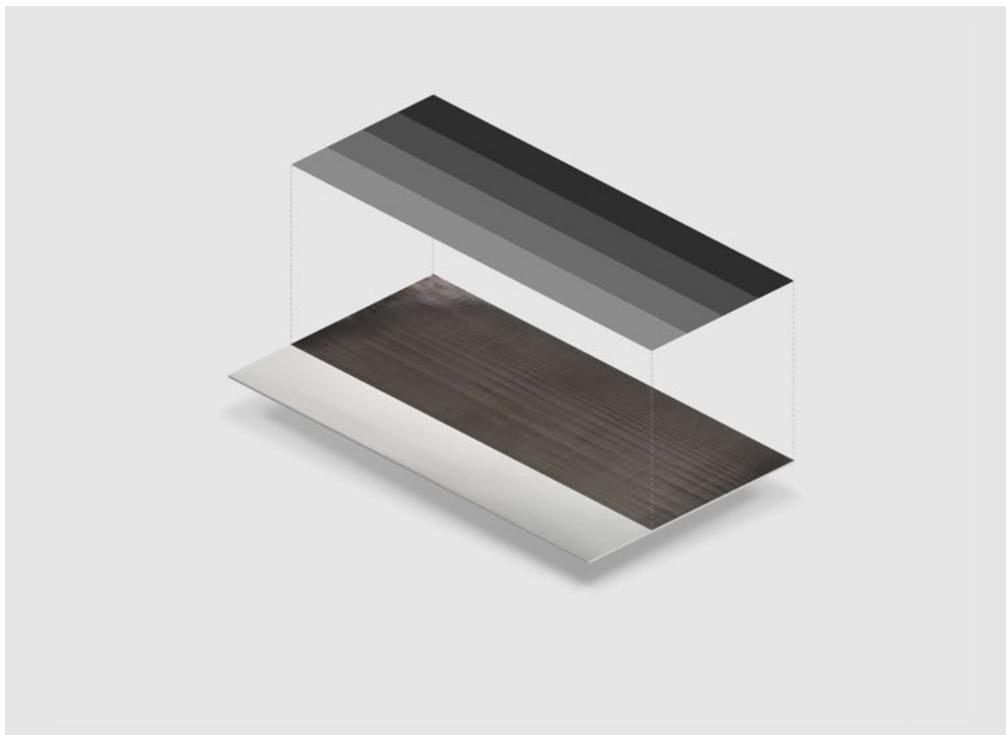


Fig. 7.5 — Formes utilisées pour la génération de parcours d’outils et textures matérielles obtenues.

mouvement de balayage longitudinal, décalé progressivement de sorte à couvrir environ 65 % de la largeur de la plaque. Les niveaux de gris utilisés pour colorer ces rectangles<sup>6</sup> permettent de préciser la puissance d’activation du laser dans les zones de gravure correspondantes : maintenue constante au sein d’une zone donnée, la puissance de gravure décroît ainsi « par paliers » à partir de la zone correspondant au rectangle le plus foncé, première à être traitée lors du processus d’usinage.

Cette image appelle plusieurs remarques. Premièrement, nous pouvons constater que la surface gravée a été choisie pour n’occuper qu’une partie de la plaque, de sorte à laisser visible, dans la zone gardée vierge, l’état original du matériau. Cette décision résultait essentiellement de la volonté de ménager, au sein de chaque objet, une lisibilité du processus de production à l’œuvre, que nous pouvons ici rapporter directement à nos discussions précédentes rela-

---

6. Sur la plupart des découpeuses laser, le déclenchement du mode d’opération par balayage est associé à la spécification d’une couleur de *fond* (intérieur) dans les formes vectorielles dessinées par le concepteur, là où le *contour* de ces formes est interprété par le laser comme l’indication d’une opération de suivi des traits. En accord avec cette convention, les formes présentées ici ont été dotées d’une géométrie pleine.

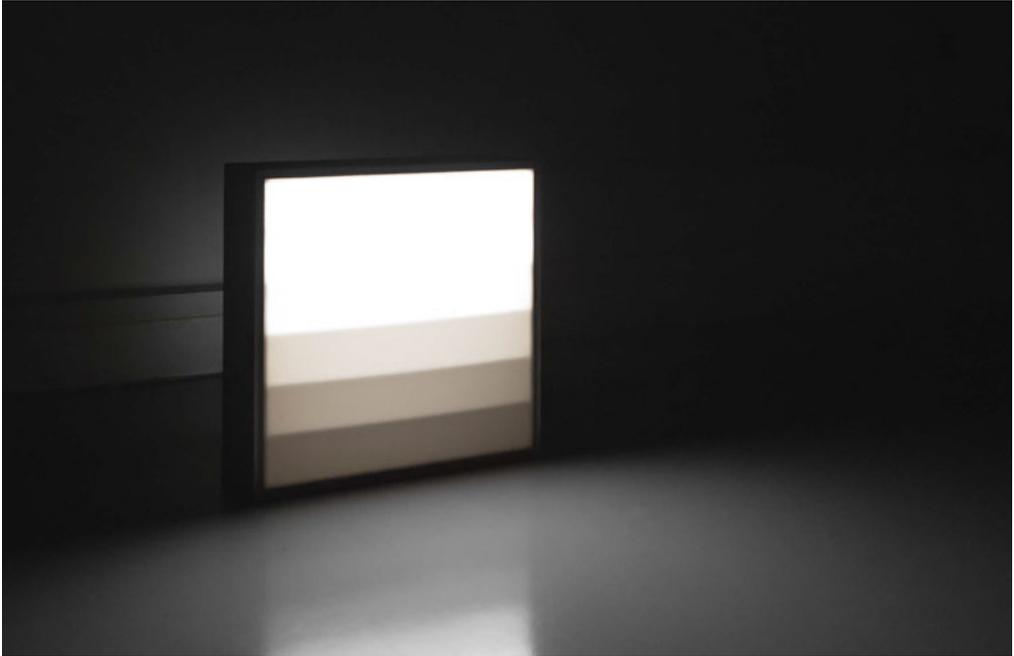
tives au concept de *prototype* : envisagés comme des prototypes, c'est-à-dire des « coupes » dans une recherche portant sur le développement d'une approche non hylémorphique de la production numérique, les artefacts que nous produisons se devaient *a minima* de rendre compte de leur origine numérique, donnant ainsi à voir l'une des « coordonnées » du problème auquel ils cherchaient à répondre. En ce sens, si les effets matériels émergents que nous cherchions à atteindre sur la partie gravée devaient logiquement constituer le point central des artefacts produits, ces effets devaient pouvoir à tout moment être identifiés comme le résultat d'un mode de production numérique. Cet impératif ne traduisait en aucun cas une volonté didactique, mais s'avérait à notre sens central dans la dimension esthétique des objets proposés : nous pensions que leur ambiguïté, leur capacité à induire, par leur matérialité, une hésitation du spectateur quant à leur origine technique (hésitation que nous avons cherché à communiquer, ci-dessus, dans le format adopté pour notre première présentation de ces artefacts), devait constituer un point central de leur qualité artistique. Le choix de procéder à une gravure partielle de la plaque possédait dès lors une fonction stratégique : en ménageant l'existence d'une séparation nette, chirurgicale et sans épaisseur entre la partie usinée de l'objet et sa partie laissée vierge, cette décision permettait ainsi d'introduire un indice du processus de production technologique à l'œuvre, en tension forte avec l'aspect organique adopté par l'objet sur l'essentiel de sa surface.

Deuxièmement, en nous concentrant sur la partie effectivement gravée de l'objet, nous constatons le contraste évident entre la géométrie nette des formes numériques communiquées à la machine, et la nature continue de la texture matérielle produite. Cette remarque révèle la nature émergente des effets matériels induits par les parcours d'outils suivis par la machine : là où nous pouvions nous attendre à obtenir des zones de gravure nettement séparées, et homogènes par leur teinte, nous obtenons une texture continûment variée, où l'ajustement progressif de la puissance de gravure du laser ne se lit pas tant dans la production d'un dégradé régulier de teintes (auquel aurions pu nous attendre *a priori*, mais que nous n'observons ici pas réellement) que dans la présence d'un accroissement progressif de l'espacement des stries longitudinales parcourant la surface. Nous obtenons dans tous les cas un *gradient* continu de propriétés matérielles à partir de la mise en œuvre de trajectoires d'usinage agencées selon une géométrie régulière — un résultat proprement impossible à décrire en termes hylémorphiques, mais compréhensible à la lumière de la nature hautement *énergétique* du processus de modulation de la matière induit par ces trajectoires. *Gradient* constitue ainsi une première incarnation de notre idée de notations « ouvertes » (identifiées, ici, aux trajectoires d'usinage), produites par le concepteur non plus afin d'encadrer et de préciser en détails l'issue de la fabrication, mais dans l'optique d'agencer les conditions énergétiques permettant la production émergente de structures matérielles.

## 7.2 *Two*

Bien que les tracés numériques développés dans le cadre du projet *Gradient*, présentés dans la figure 7.5, n'aient pas été initialement conçus pour leurs qualités formelles propres, mais pour leur capacité à induire un type particulier de trajectoires d'usinage, la comparaison de leur géométrie nette avec l'aspect organique des textures matérielles obtenues permet d'apprécier la nature non hylémorphique du processus de production mis en œuvre. Les tracés de conception utilisés dans *Gradient* prennent en effet une signification nouvelle au regard des résultats matériels produits par la machine : ils composent pour ainsi dire une figure de *référence* du point de vue hylémorphique, donnant à voir les structures géométriques « que nous aurions dû obtenir » si le matériau s'était contenté de recevoir passivement la forme inscrite par le laser. En parallèle de notre préoccupation d'une génération directe des trajectoires d'usinage suivies par la machine, il est ainsi possible d'envisager le processus de conception mobilisé dans *Gradient* comme visant à disposer les conditions d'une mise à l'épreuve expérimentale du schéma hylémorphique, en « testant » si le processus de fabrication induit à partir de la forme fournie peut effectivement s'apprécier sous l'angle de ce schéma. Le choix de nous orienter vers un tracé numérique « simple » (les quatre rectangles en niveaux de gris), d'abord adopté en tant que stratégie *pratique* permettant de spécifier « explicitement » les trajectoires d'usinage, se trouve donc simultanément investi d'une portée conceptuelle : l'impossibilité d'une interprétation du mode de production mis en œuvre en termes hylémorphiques apparaît en effet d'autant plus nette que la forme spécifiée lors de l'étape de conception présente un caractère simple, évident, géométrique. En d'autres termes, les tracés numériques visibles sur la figure 7.5 ne sauraient s'interpréter en tant que pures solutions « utilitaires » de génération de trajectoires d'usinage : leur aspect visuel propre contribue également à souligner, par effet de contraste, l'agentivité matérielle mise en œuvre dans le moment même de l'étape de fabrication, et l'impossibilité de résumer cette dernière à la simple « réalisation » d'une géométrie précisée *a priori*.

Notre projet *Two*, également développé en 2014, s'inscrit dans la continuité de cette approche. Le procédé exploré est ici celui de la production numérique d'une image lumineuse en mouvement, formée sur un écran en Plexiglas installé sur la face avant d'un petit caisson de bois parallélépipédique, d'une dimension de 44,6 × 44,6 cm pour une profondeur de 16 cm (figure 7.6). Développé spécifiquement pour ce projet, ce caisson constitue un dispositif lumineux disposant de six sources de lumière LED indépendantes, produisant une image composée de six bandes lumineuses horizontales, d'intensité variable. À l'instar de *Gradient*, le processus de production de cette image procède de la spécification préalable d'une géométrie simple et régulière, convertie, en vue

Fig. 7.6 — *Two*.

de sa « matérialisation », en instructions de pilotage d'un dispositif numérique. Plus précisément, un logiciel personnalisé permet ici de générer, en temps-réel, des images composées de six rectangles horizontaux, dont les niveaux de gris sont ensuite traduits en six valeurs d'intensité lumineuse, communiquées aux sources de lumière LED installées dans le caisson. L'image produite par le logiciel n'est ainsi pas simplement « affichée » sur un écran traditionnel, mais « fabriquée », rectangle par rectangle, par la projection de lumière blanche, à différentes intensités, sur la face avant en Plexiglas du caisson. Nous nous référons ici, à dessein, à la notion de *fabrication* : comme nous allons le voir à présent, l'image lumineuse restituée par le dispositif se caractérise par sa *matérialité*, installant une tension avec son origine géométrique sous-jacente (l'image lumineuse produite par le logiciel), en vertu de laquelle *Two* se rapporte, à notre sens, à la direction de recherche déjà explorée par le projet *Gradient*.

La figure 7.7 présente l'un des tracés en niveaux de gris générés par le logiciel, ainsi qu'une photographie de l'image correspondante produite par le dispositif lumineux. Bien qu'il soit aisément possible d'établir un lien entre ces deux images, la photographie de l'image lumineuse ne se caractérise pas simplement par sa reproduction de l'agencement des zones lumineuses visibles sur l'image numérique, ou encore de leurs intensité respectives : elle révèle également l'apparition d'un ensemble d'effets visuels émergents, liés aux caractéristiques physiques de la propagation de la lumière, et de son interaction avec les éléments matériels employés dans la construction du dispositif. La première

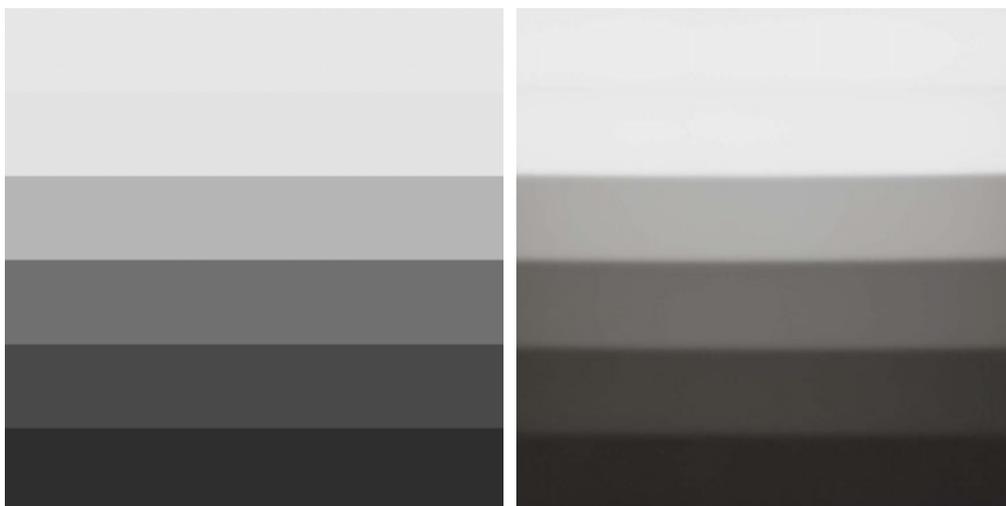


Fig. 7.7 — Tracé en niveaux de gris généré par le logiciel (à gauche) et image correspondante produite par le dispositif lumineux (à droite).

remarque que nous pouvons apporter pour qualifier ces effets tient à la nature « douce » des transitions entre les zones lumineuses, rompant avec la rigidité formelle affichée par l'image numérique. Là où, sur l'image produite par le logiciel, les transitions entre les rectangles sont nettement dessinées, les formes visibles sur l'image lumineuse adoptent des contours moins nets : nous passons désormais *continûment* d'une zone lumineuse à l'autre (même si l'étendue spatiale de cette transition reste modérée en regard de l'espace occupé « en propre » par chaque zone). Examinant plus en détails l'image lumineuse, nous pouvons également noter que l'éclairage de chacune de ces zones ne présente pas un caractère uniforme : une diminution légère d'intensité peut être observée sur les bords de chaque zone, analogue aux effets de vignettage créés par certaines optiques photographiques. Enfin, la coloration des zones lumineuses s'avère différente de celle observée sur l'image numérique : là où l'image logicielle est purement composée de niveaux de gris, l'image « matérielle » produite par le dispositif lumineux se caractérise par la présence latente d'une teinte plus « chaude », entre le jaune et l'orange, particulièrement visible dans les trois zones les plus sombres.

Ces différents effets visuels s'avèrent directement liés à la réalisation matérielle du caisson lumineux, permettant la « fabrication » de l'image décrite ci-dessus. L'enjeu principal de la conception de ce caisson résidait dans la capacité à produire une image indiquant l'existence d'une composition géométrique sous-jacente, tout en exhibant une matérialité irréductible à l'ordre rigoureux de cette composition. En d'autres termes, ce dispositif devait permettre la mise en regard du donné pur, géométrique de la forme utilisée pour « guider » la fabrication, avec la matérialité émergente de l'artefact lumineux produit.

Comme *Gradient*, *Two* ambitionnait ainsi de proposer un scénario de production impossible à décrire en termes hylémorphiques : prenant le contre-pied des écrans haute résolution contemporains, cherchant à contrôler l'apparence des images affichées à une échelle spatiale inférieure au pouvoir de résolution de l'œil, le dispositif numérique réalisé implémente ainsi volontairement les conditions d'une transformation émergente de l'image numérique transmise, dans le moment même de sa « fabrication ».

Pour répondre au programme de conception énoncé ci-dessus, nous avons cherché à mettre en place les conditions matérielle de production d'une image « géométrique » à partir de sources de lumière pure, réglables en intensité. En choisissant de « matérialiser » l'image générée par le logiciel à partir de sources lumineuses indépendantes, plutôt qu'à travers les pixels d'un écran, nous nous attendions ainsi à voir apparaître une tension entre la « mise en forme » de la lumière ainsi opérée, et les effets visuels émergents produits par la matérialité des solutions de conception retenues. En conséquence, nous nous sommes orientés vers l'utilisation de sources de type LED, dont nous apprécions la qualité lumineuse, ainsi que d'un système de « structuration » de la lumière émise, basé sur la division du caisson en six « compartiments » indépendants, destinés à accueillir chacun une source LED.

La figure 7.8 propose une représentation schématique du caisson finalisé, et la figure 7.9 en précise la composition interne à l'aide d'une vue en éclaté. Une partie centrale en bois, portant cinq caches en Plexiglas blanc translucide délimitant les six compartiments lumineux, vient accueillir un écran frontal en Plexiglas, sur lequel se formera l'image, ainsi qu'une partie arrière amovible portant les sources lumineuses à proprement parler. Six barres de LED, montées sur des équerres de fixation imprimées en 3D, viennent ainsi se positionner au milieu de chaque compartiment, à une distance suffisante de l'écran frontal en Plexiglas pour masquer la trace lumineuse individuelle de chaque LED. Les caches en Plexiglas délimitant chacun des six compartiments permettent de guider la lumière émise par chaque barre de LEDs vers une zone horizontale spécifique de l'écran frontal, afin de créer individuellement chacune des six composantes de l'image. Réalisés dans le même matériau diffusant que l'écran frontal (Plexiglas blanc), ces caches laissent cependant « déborder » une partie de la lumière émise par chaque barre de LEDs vers les compartiments voisins, contribuant à créer l'effet de « transition continue » entre les zones lumineuses décrit précédemment. Les parties centrales et arrières du caisson ont quant à elles été réalisées à partir d'un contreplaqué trois plis épiciéa, dont la mise en œuvre a volontairement été laissée brute (sans peinture) pour exploiter la possibilité d'une « coloration » de la lumière blanche des LEDs par la teinte claire du bois.

Notre projet de ménager l'expression d'effets visuels émergents dans le moment de la « fabrication » de l'image générée par le logiciel a pu ainsi, tout



Fig. 7.8 — Représentation schématique du caisson fermé.

d’abord, trouver à se réaliser dans le choix des matériaux (Plexiglas translucide, bois brut) employés dans la construction du dispositif. De manière centrale, une seconde approche mise en œuvre pour réaliser ce projet a consisté dans le choix même de donner à voir une image en *mouvement* : comme précisé plus haut, l’image numérique contrôlant l’intensité des LEDs n’est en effet pas statique, mais générée en temps-réel par un programme personnalisé, exécuté sur un ordinateur situé en dehors du caisson. L’intensité des sources lumineuses se trouve par conséquent conduite à varier continûment, au rythme de l’évolution d’une instruction de contrôle numérique émise par le logiciel. Ce comportement dynamique s’apparente ainsi à une opération de *modulation*<sup>7</sup>, dans le sens où le développement continu d’une forme (l’image numérique produite par le logiciel) se traduit par la mise en variation continue d’une « matière lumineuse » — un terme qu’il ne nous semble pas abusif d’employer ici au vu de la matérialité de l’image lumineuse créée par la dispositif, qu’il nous est au

---

7. Il est à ce titre parlant que le procédé électronique que nous utilisons ici pour moduler l’intensité des sources lumineuses LED porte le nom de PWM, pour Pulse Width Modulation (ou modulation de largeur d’impulsions). Pour plus de détails sur ce procédé, voir par exemple : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation\\_de\\_largeur\\_d%27impulsion](https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_de_largeur_d%27impulsion) (consulté le 14 mai 2017).



Fig. 7.9 — Représentation schématique de la composition interne du caisson.

reste donné d'apprécier dans la matière même de l'écran frontal en Plexiglas. À l'instar du projet *Gradient*, les instructions de contrôle générées par le logiciel peuvent donc ici être comprises comme visant à générer des *trajectoires* susceptibles d'une réalisation matérielle émergente, à condition de nous autoriser à parler de « trajectoire » pour décrire la courbe d'évolution temporelle de l'intensité lumineuse des LEDs, même si ces sources ne sont animées d'aucun mouvement physique.

L'opération de modulation induite par la variation continue des images produites par le logiciel ne peut ici s'apprécier que dans son déroulement même : par contraste avec le procédé de gravure mis en œuvre dans le projet *Gradient*, la mise en variation continue de la « matière lumineuse » ne se traduit, ici, par la production d'aucune trace physique pérenne. Les effets « matériels » produits dans *Two* doivent ainsi s'apprécier « en mouvement », dans l'instant de leur apparition et de leur transformation renouvelées. Cette possibilité d'une expérience dynamique du comportement modulateur mis en œuvre dans le dispositif se conjugue, pour le spectateur, avec le constat qu'une même structure fixe (les six bandes lumineuses horizontales) régit l'ensemble des mouvements observés. Le spectateur assiste alors à une négociation toujours reconduite entre l'ordre géométrique originaire de l'image et sa réalisation maté-

rielle émergente, à un rapport de forces dont l'observation dynamique révèle des tensions dont il s'avère malheureusement impossible de rendre compte sur le support imprimé de ce document<sup>8</sup>. Un effet produit par le dispositif, non visible sur la figure 7.7, tient par exemple à l'existence d'un effet d'éclairage des zones lumineuses « par sympathie » : une zone maintenue à un niveau de gris constant sur l'image numérique peut ainsi être amenée à changer d'aspect sur le dispositif matériel, si les zones voisines varient en intensité.

Cet effet, appréciable par l'évolution dynamique des zones lumineuses et lié à la translucence des « caches » en Plexiglas utilisés dans la construction du dispositif, est rendu particulièrement sensible par la nature du principe génératif programmé dans le logiciel : celui-ci a en effet été étudié pour conduire l'image numérique (et par conséquent, les instructions de contrôle des LEDs) à évoluer par « couches », en conservant l'aspect de certaines zones pendant que d'autres se trouvent mises à jour. Plus spécifiquement, le système génératif que nous avons conçu répondait à l'impératif de doter l'image numérique d'une capacité d'évolution émergente, tout en conservant une structuration d'ensemble caractérisée par une progression croissante des intensités lumineuses à partir du bas de l'image : ce scénario a pu être réalisé par l'implémentation d'une procédure dérivant l'intensité lumineuse de chaque zone à partir du calcul de différentes quantités statistiques issues d'une même simulation, une méthode permettant de garantir la production d'une image structurée, et induisant effectivement le comportement d'évolution par « couches » décrit ci-dessus. Cette solution, basant le calcul des intensités lumineuses sur les propriétés émergentes d'un système dynamique, répondait à l'impératif d'éviter toute évolution trop directement aléatoire des intensités lumineuses : nous cherchions en effet à produire une image qui, quoi qu'issue à tout moment d'un processus émergent, puisse évoluer de façon suffisamment régulière pour inspirer la perception d'un ordre géométrique rigoureux.

De manière concrète, la solution implémentée se base sur une simulation de type « multi-agents » : ce type de procédures numériques vise à évaluer le comportement de systèmes complexes composés d'un grand nombre d'entités autonomes, susceptibles d'interagir entre elles ou avec l'environnement dans lequel elles se trouvent plongées. La caractéristique principale de tels systèmes réside dans leur capacité à exhiber des formes émergentes de structuration, non prévisibles à partir des règles encodées explicitement dans le système : ces règles précisent en effet typiquement la nature des différents comportements accessibles à chaque agent, et n'introduisent aucune consigne directe visant à guider l'évolution du système vers une forme de structuration prédéfinie. Uti-

---

8. Une documentation vidéo du dispositif est disponible à l'adresse suivante : <http://www.ianislallemand.com/projects/design/two> (consulté le 19 septembre 2017).

lisés dans des contextes de « simulation, d'optimisation ou de prise de décision, à chaque fois que de nombreuses entités interagissent à partir d'un ensemble de règles spécifiques<sup>9</sup> », les systèmes multi-agents permettent typiquement de *rechercher* des solutions à des problèmes dont la complexité rend impossible toute tentative de résolution analytique. Historiquement, ces systèmes se sont essentiellement développés dans le domaine de l'intelligence artificielle à partir de la fin des années 80, où ils ont alors été expérimentés en tant que nouveaux paradigmes d'une intelligence « ne possédant pas d'équivalent humain<sup>10</sup> » : les systèmes multi-agents sont ainsi souvent associés à la notion d'une « intelligence en essaim » (*swarm intelligence*), inspirée de la capacité de certains systèmes naturels vivants (essaims d'abeilles, nuée d'étourneaux...) à développer des comportements collectifs structurés à partir des comportements élémentaires et « aveugles » (dans le sens où ils sont réalisés sans connaissance « globale » de l'état du système) de chaque individu.

Le système développé pour *Two* se base sur un type de système multi-agents introduit en 1987 par Craig W. Reynolds pour simuler les phénomènes d'agrégation observés chez certaines espèces animales, et plus précisément la formation de nuées d'oiseaux<sup>11</sup>. L'algorithme proposé par Craig W. Reynolds décrit le mouvement collectif d'agents nommés « boids » (un néologisme pour *bird-oid*) à partir de règles individuelles de comportement, que nous préciserons plus en détails dans la section 9.3, à l'occasion de la discussion de notre projet *Unspecified Clay*. Pour l'heure, nous pouvons simplement souligner que cet algorithme permet d'observer, sous certaines conditions, la formation spontanée de « nuées » d'agents à partir d'une population initialement répartie de manière aléatoire (figure 7.10) ; au cours du temps, ces nuées peuvent être amenées à se disperser, s'accroître, ou fusionner avec des nuées voisines. En termes statistiques, la simulation se caractérise donc, à tout moment, par une distribution structurée des positions et des vitesses des agents.

Pour extraire les valeurs des six intensités lumineuses nécessaires à la production de l'image transmise au dispositif d'éclairage, le logiciel développé pour *Two* procède à la construction d'une image intermédiaire en niveaux de gris (figure 7.11), formée par des contributions graphiques « individuelles » apportées par chaque agent. Cette première image est ensuite échantillonnée de sorte à produire une représentation « finale » (visible à gauche sur la figure 7.7), divisée en six bandes horizontales de même largeur, dont les valeurs de

---

9. Tobias Scwhinn et Achim Menges, « Fabrication Agency: Landesgartenschau Exhibition Hall », *Architectural Design*, vol. 85, n° 5, 2015, p. 94. Notre traduction.

10. John S. Gero, *Advances in Formal Design Methods for CAD*, Berlin, Springer, 1996, p. 1. Notre traduction.

11. Craig W. Reynolds, « Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model », *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 21, n° 4, 1987, p. 25-34.



Fig. 7.10 — Simulation multi-agents basée sur l'algorithme de Craig W. Reynolds.

gris fournissent les intensités de chacune des six sources lumineuses placées dans le caisson. Étant donné la nature systématique de cette opération, l'essentiel du travail de conception de l'algorithme a par conséquent résidé dans la construction de l'image intermédiaire à échantillonner.

Cette image intermédiaire se compose d'un ensemble de rectangles horizontaux, de hauteur variable, dessinés à partir du bas de la zone de tracé, sans recouvrement, de sorte qu'à un agent corresponde un rectangle. La vitesse des agents détermine l'ordre de dessin, ainsi que la teinte du rectangle ajouté : les rectangles situés en bas de la zone de tracé correspondent ainsi aux agents de plus faibles vitesses, et la teinte de chaque rectangle évolue entre le noir (correspondant à la vitesse minimale accessible au sein de la simulation), et le blanc (vitesse maximale). Ces règles permettent d'obtenir une image composée de strates d'intensité de gris croissantes, progressant à partir du bord inférieur de la zone de tracé. Le mouvement de cette image intermédiaire (et, par conséquent, de l'image échantillonnée finale) résulte essentiellement du mécanisme d'ajustement dynamique de la hauteur de chacun des rectangles. À chaque étape de la simulation, un algorithme attribue à chaque rectangle un certain pourcentage de la hauteur totale (en pixels) de la zone de tracé, de manière proportionnelle à la densité locale des agents au sein de la nuée : chaque rectangle recevra ainsi une hauteur d'autant plus importante que son agent « de référence » se trouvera éloigné de son plus proche voisin. Tout en



Fig. 7.11 — Image intermédiaire générée par le logiciel à partir des propriétés statistiques de la simulation multi-agents.

conservant une structure visuelle cohérente, l'image se trouve alors naturellement conduite à évoluer en fonction de la dynamique des effets d'agrégation induits par la simulation.

Cette description du processus de génération de l'image numérique fait apparaître l'influence de deux stratégies de conception principales. Une procédure d'échantillonnage se trouve tout d'abord mise en œuvre afin de « projeter » une image complexe, rendant compte finement de la structure statistique d'une simulation multi-agents, sur une représentation plus simple, de plus « basse dimension » : l'image finale, stratifiée en six valeurs de niveaux de gris, est ainsi calculée à partir d'une première image intermédiaire générée par le logiciel, d'aspect plus « continu ». Développée dans le cadre de ce projet, cette procédure d'échantillonnage nous paraît pouvoir constituer une véritable approche généralisable pour la conception de comportements génératifs destinés à l'activation de dispositifs matriciels, composés d'un nombre fini d'éléments d'éclairage ou de moteurs. Au lieu d'envisager la programmation de tels systèmes en se plaçant directement au niveau de leur nombre final de degrés de liberté (comme les six sources lumineuses indépendantes de *Two*), notre expérience montre ainsi qu'il peut être pertinent, dans certain cas, de travailler dans un premier temps dans un espace doté d'un plus grand nombre de degrés de liberté, facilitant la programmation de comportements émergents. Dans le cadre de *Two*, il s'avérait ainsi plus simple de dériver le comportement

de l'image finale par échantillonnage d'une image intermédiaire « continue », construite à partir de la dynamique d'une simulation multi-agents, que de chercher à programmer directement ce comportement sur chacun des six degrés de liberté finaux du dispositif.

Une seconde stratégie mise en œuvre dans *Two* réside dans le choix de concevoir un logiciel générant des images géométriques élémentaires, traduites en instructions de contrôle d'un dispositif numérique. Par leur simplicité, ces images accentuent en effet le contraste entre une compréhension abstraite, géométrique de la notion de forme, et la richesse des effets matériels induits dans le cours de l'opération de « fabrication » de l'image lumineuse. *Two* s'inscrit ainsi, en ce sens, dans le prolongement de *Gradient*, et nous pouvons d'ailleurs remarquer que ces deux projets adoptent un vocabulaire visuel proche sur le plan des tracés numériques qu'ils mettent en œuvre. Réalisés dans une même période de nos recherches, *Two* et *Gradient* peuvent en ce sens être considérés comme deux moments complémentaires de mise au point d'une même méthodologie, visant à explorer la possibilité de schémas productifs non hylémorphiques à travers la spécification des comportements de machines de fabrication, plutôt que la géométrie même des artefacts à produire. La démarche de « simplification formelle » adoptée dans chacun de ces deux projets se détache alors comme une approche générique, constituant une première modalité d'implémentation de notre idée de notations « ouvertes ».

### 7.3 *Computational Ruins*

L'approche de conception mise en œuvre dans *Two* et *Gradient* nous a permis de développer une vision active de l'étape de fabrication, désormais comprise comme la réalisation émergente d'une forme d'agentivité matérielle plutôt que la reproduction passive d'un donné géométrique fixé *a priori*. Le projet que nous allons à présent discuter, *Computational Ruins*, prolonge cette volonté de remise en cause de la hiérarchie traditionnelle entre conception et fabrication sous l'angle d'une nouvelle direction pratique : par contraste avec l'approche de « simplification formelle » développée dans le cadre des projets *Two* et *Gradient*, nous allons en effet considérer, à présent, des notations adoptant à dessein une complexité formelle supérieure, afin d'explorer une nouvelle modalité d'expression de comportements matériels émergents lors de l'étape de fabrication. Là où ces comportements se trouvaient mis en œuvre, dans *Two* et *Gradient*, à travers l'action de machines à commande numérique, nous envisageons ici un scénario où l'étape de fabrication numérique joue un rôle *préparatoire*, rendant possible l'expression de comportement matériels au cours d'une phase ultérieure de la fabrication.

Développé en 2015, *Computational Ruins* explore en effet l'idée d'une utilisation de moules à béton, imprimés en 3D, dans le cadre d'un procédé de

moulage donnant lieu à une production de structures matérielles émergentes. Nous avons ici cherché, sur la base d'une technique intuitivement interprétable en termes hylémorphiques (le moulage), à développer un procédé produisant des artefacts impossibles à envisager selon ce point de vue. Il ne nous intéressait pas de procéder à la réalisation de moulages « défectueux », où l'impression hylémorphique de la forme dans la matière se serait trouvée mise en défaut par une mauvaise réalisation du geste technique : nous souhaitions au contraire imaginer un scénario où un geste technique *bien réalisé* donnerait lieu à un comportement absolument non hylémorphique, dans le sens où le résultat produit par ce geste ne se laisserait pas interpréter comme la rencontre d'une forme « pure » (le moule) avec une matière « brute ».

Bien entendu, le processus de moulage le plus « standard » ne saurait lui-même réellement s'interpréter en termes hylémorphiques : l'hylémorphisme, comme nous l'avons noté dans la section 5.2, procède pour Simondon d'une confusion entre les notions *abstraites* de forme « pure » et de matière « brute », et la forme et la matière « réelles », c'est-à-dire *préparées*, intervenant dans l'opération technique. Sur la base de cette critique, nous nous sommes ainsi intéressés à la possibilité d'« exagérer » la dimension préparée du moule, de sorte à rendre sensible, avec plus d'évidence que dans un processus de moulage traditionnel, l'inadéquation du point de vue hylémorphique à rendre compte du caractère *énergétique* de la rencontre entre moule et matériau.

Nous avons ainsi cherché à doter les moules d'un comportement dynamique, destiné à s'exprimer dans l'opération de moulage, et nous sommes plus spécifiquement intéressés, à ce titre, au moment du *démoulage*. Si le démoulage correspond traditionnellement à l'instant de « confirmation » du point de vue hylémorphique, révélant l'impression en négatif de la forme du moule dans la matière, peut-on imaginer qu'il participe, au contraire, d'une remise en cause du rôle du moule en tant que forme, en produisant un artefact dont la matérialité serait irréductible à toute compréhension « géométrique » du moule ? Pour explorer cette perspective, nous nous sommes intéressés à l'idée d'une étape de démoulage *activant* un comportement mécanique préparé lors de la conception du moule, dont les effets s'avèreraient suffisamment radicaux pour induire une remise en cause de la « forme » même du moule, entendue dans l'acceptation géométrique du terme.

Plus précisément, nous avons cherché à développer des moules dotés d'une capacité de brisure potentielle et localisée, susceptible de se réaliser sous l'action des forces impliquées dans l'opération de démoulage : nous avons ainsi imaginé que cette opération, au lieu de révéler l'empreinte fidèle du moule, puisse se traduire par la production soudaine, irréversible, d'un artefact composé de portions nues de béton et de résidus fracturés du moule, « piégés » dans la matière. Un objectif central de notre projet résidait dans l'obtention d'un processus *contrôlé* : il ne s'agissait pas, comme nous le précisions plus haut, de

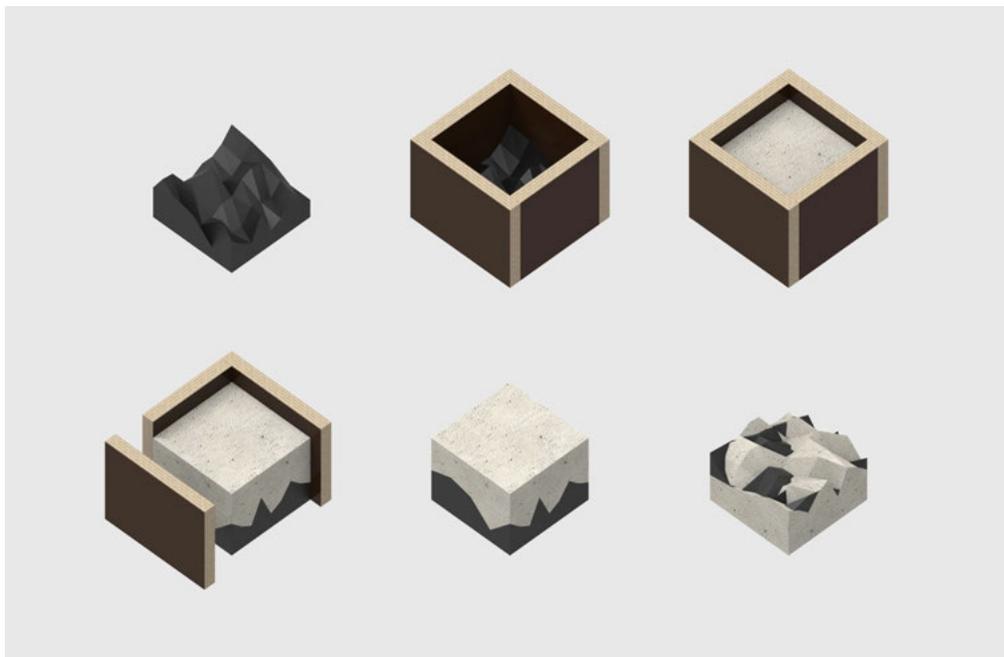


Fig. 7.12 — Schéma des étapes successives de l'opération de moulage.

« mal » réaliser le geste technique de moulage, mais d'envisager le comportement de fracturation recherché comme la conséquence directe de la *conception* des moules, et non des particularités du geste technique de l'opérateur. Bien entendu, il n'était pas question de chercher à contrôler la manière dont cette fracturation trouverait à s'exprimer lors du démoulage : l'enjeu résidait plutôt dans la mise au point d'un processus de conception qui, de manière systématique, disposerait dans la structure des moules la possibilité d'une expression future de comportements matériels émergents. L'objectif d'une disposition *localisée* de cette possibilité expressive, permettant d'obtenir un comportement de brisure sélective, revêtait en ce sens une dimension stratégique : il s'agissait ici de rendre sensible, par la production d'artefacts relevant d'une forme de « dégradation structurée », la dimension programmatique du processus de production à l'œuvre.

La figure 7.12 schématise les étapes de l'opération de moulage finalement mise en œuvre. Placé dans un coffrage en contreplaqué, le moule (en noir) est couvert de béton frais : après séchage, une pièce composite est obtenue, formée du moule en PLA et d'une masse de béton solidifié, mise en forme par les parois du coffrage (figure 7.13). Les deux parties de cette pièce sont ensuite séparées en force (figure 7.14). Le moule se brise alors en certaines parties de sa surface, produisant un objet doté d'une matérialité « hybride » (figures 7.15 et 7.16), mêlant les textures brutes du béton à la présence de structures filaires déposées par le procédé d'impression 3D.



Fig. 7.13 — Vue du volume composite obtenu après séchage du béton.



Fig. 7.14 — Séparation des deux parties de la pièce obtenue après séchage du béton.



Fig. 7.15 — Artefact obtenu au terme de l'opération de démoulage.



Fig. 7.16 — Vue zénithale de l'artefact obtenu après démoulage.

La partie résiduelle du moule, issue de sa rupture partielle, est présentée sur la figure 7.17 : nettement lisible, l'effet de brisure sélective se manifeste ici dans la présence simultanée de surfaces externes laissées intactes, et de parties fracturées, « mises à nu » lors du démoulage. Les surfaces marquées A et B, intactes, correspondent ainsi aux zones de béton nues visibles sur la figure 7.16 ; les parties fracturées, visibles sur le reste de la pièce, s'avèrent quant à elles complémentaires des portions du moule piégées dans le béton. Ces zones fracturées permettent d'apprécier la structure *interne* du moule : schématisée sur la figure 7.18, cette dernière se compose d'une matrice de cellules triangulaires, remplies par des motifs alvéolaires hexagonaux de densité variable. Afin de préparer mécaniquement les conditions d'une brisure sélective du moule, nous avons en effet cherché à doter cet élément technique d'une structure interne *inhomogène*, disposant ainsi plusieurs « zones de fragilité » susceptibles d'être activées lors de l'opération de démoulage, sous l'effet des efforts mécaniques ressentis. La forte adhérence du béton au plastique utilisé pour l'impression du moule induit en effet, lors du démoulage, de fortes contraintes mécaniques : la brisure du moule, conséquence possible de ces efforts, pourra ainsi être encouragée ou prévenue au niveau local en adaptant la densité, et donc la résistance, des structures alvéolaires internes — une structuration peu dense correspondant, bien entendu, à une résistance mécanique plus faible. Afin de permettre l'exploitation de ce principe, le processus de conception mis en œuvre devait donc permettre de spécifier non seulement l'aspect extérieur des moules, mais également la configuration de leur structure interne.

Cet impératif de disposer d'une méthode de réalisation de structures internes personnalisées nous a conduit à nous orienter vers un procédé de fabrication additive par dépôt de matière fondue. Ce procédé consiste à extruder, à l'état fondu, un matériau thermoplastique à travers une buse, afin de prendre en charge la fabrication d'objets par ajout de matière en couches successives : produites « de bas en haut », les pièces ainsi réalisées peuvent être dotées de structures internes spécifiques, avant d'être « fermées » par l'ajout de couches définissant leurs surfaces supérieures. Les logiciels d'impression 3D « grand public », comme le logiciel MakerBot Print<sup>12</sup> que nous avons ici été amenés à utiliser (en combinaison avec une imprimante MakerBot Replicator 2), sont programmés pour mettre en œuvre un tel scénario de fabrication : ces logiciels traitent en effet la géométrie fournie par le concepteur (sous la forme d'un fichier 3D) comme une enveloppe « creuse », dans laquelle des procédures algorithmiques disposent par défaut une structure de « remplissage » (*infill*) régulière, typiquement formée de cellules hexagonales ou carrées, au moment de calculer les trajectoires suivies par la buse d'extrusion de la machine. Si de tels

---

12. <https://www.makerbot.com/print> (consulté le 13 juin 2017).

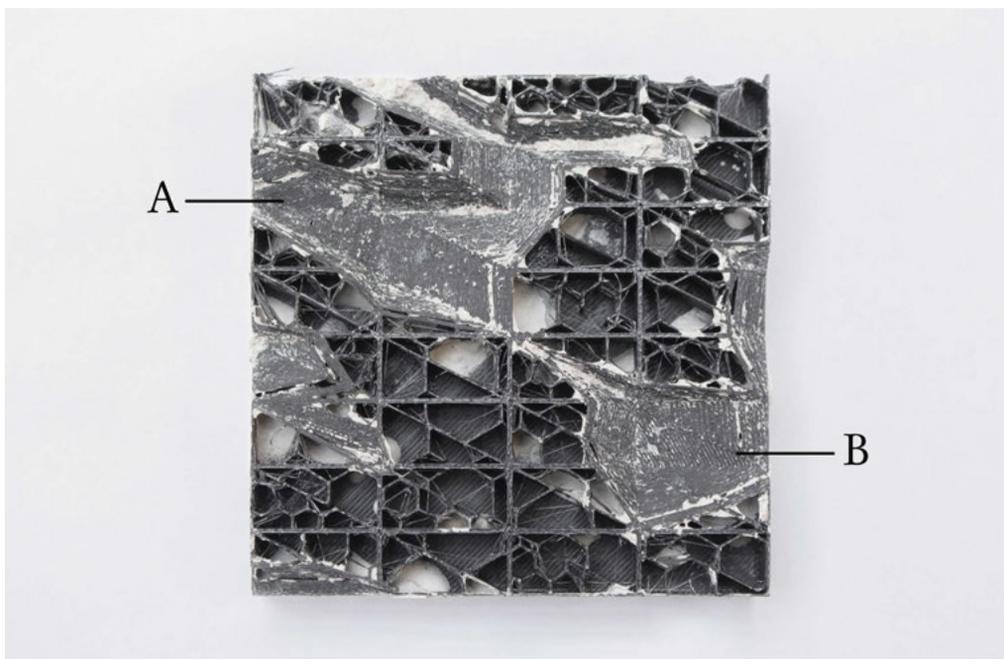


Fig. 7.17 — Partie résiduelle du moule. A et B : surfaces non fracturées lors du démoulage.

processus évoquent dans leur principe celui que nous souhaitons mettre en œuvre dans notre projet, les logiciels d'impression qui les implémentent présentent l'inconvénient de n'offrir, en dehors d'un réglage permettant d'ajuster la valeur du « pourcentage de remplissage » désiré de la pièce, aucune possibilité d'ajustement précis de la géométrie des structures internes générées. En particulier, les structures internes ainsi produites présentent typiquement un caractère *homogène* (figure 7.19), visant à doter les pièces imprimées d'une résistance mécanique identique en tout point : bien que constituant un choix adéquat dans le cadre de scénarios de fabrication « classiques », ces structures s'avèrent inadaptées au type de pièces que nous souhaitons ici produire, destinées à présenter, au contraire, des propriétés mécaniques spatialement inhomogènes.

Nous avons ainsi été conduits à développer une méthode permettant de contourner le comportement par défaut du logiciel MakerBot Print, afin d'être en mesure de fabriquer des objets dotés de structures internes variables. Notre approche consiste à fournir au logiciel d'impression une représentation géométrique *intégrale* des pièces à produire, incluant non seulement la spécification de leur forme extérieure, mais aussi le détail de l'ensemble des structures internes dont nous souhaitons les doter. Sous certaines conditions, la procédure automatique de génération de trajectoires du logiciel n'a alors d'autre choix que de suivre la structure interne spécifiée. Nous cherchons donc ici, au sens strict,

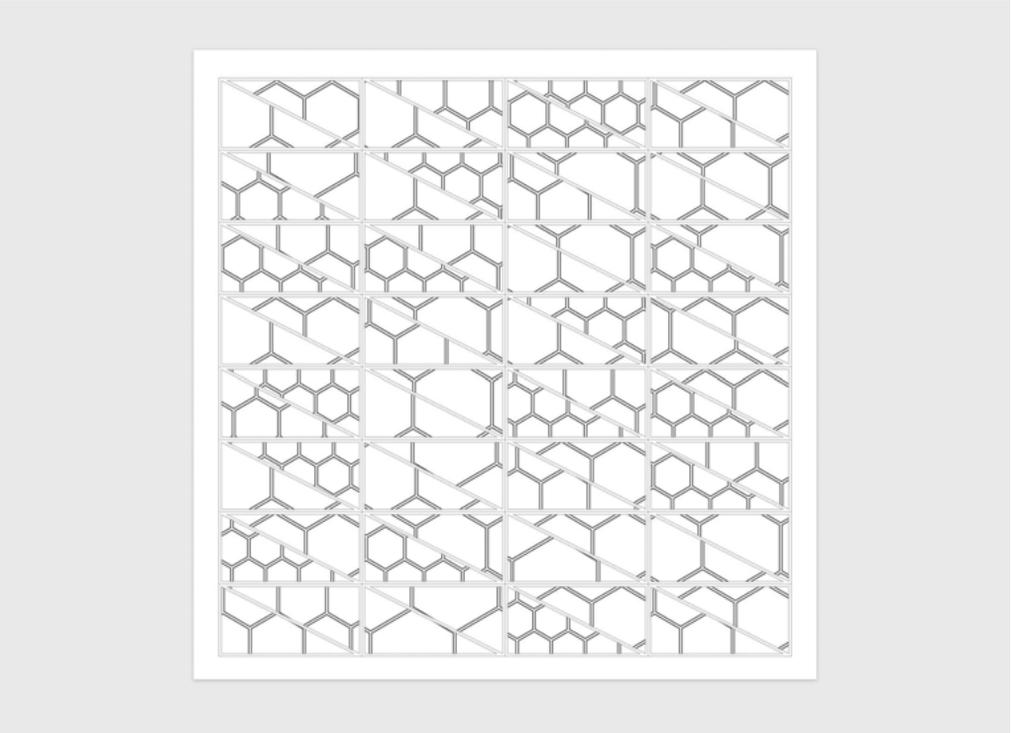


Fig. 7.18 — Représentation schématique de la structure interne du moule imprimé en PLA.

à « forcer » le comportement par défaut du logiciel à prendre en charge nos objectifs de fabrication, à travers la conception de fichiers numériques dotés de propriétés adéquates. Cette approche, assimilable à une forme de hacking, rappelle la procédure « détournée » de génération des trajectoires d'usinage déjà mise en œuvre dans *Gradient*, tout en s'en distinguant par la complexité formelle supérieure des géométries devant ici être fournies à la machine afin d'obtenir les trajectoires désirées. Pour contraindre le logiciel d'impression à générer des trajectoires de déposition à même de réaliser les structures internes que nous souhaitons obtenir, nous devons ainsi spécifier ces structures *en volume*, sous forme de représentations surfaciques (BREPs) : cette approche nous permet alors de contraindre le logiciel d'impression à traiter les structures internes comme des éléments géométriques « normaux », produisant ainsi des trajectoires d'impression précisément « alignées » aux contours de ces structures. Par ailleurs, afin d'éviter que le logiciel ne génère automatiquement des motifs de « remplissage » supplémentaires à l'intérieur de ces contours, il nous est apparu nécessaire de contrôler en tout point l'épaisseur des « parois » des structures alvéolaires internes. Il s'agit en effet de faire en sorte que le suivi des contours de ces parois par la buse d'extrusion réalise déjà l'épaisseur totale désirée, prévenant ainsi l'ajout ultérieur de motifs de remplissage. Nous utilisons

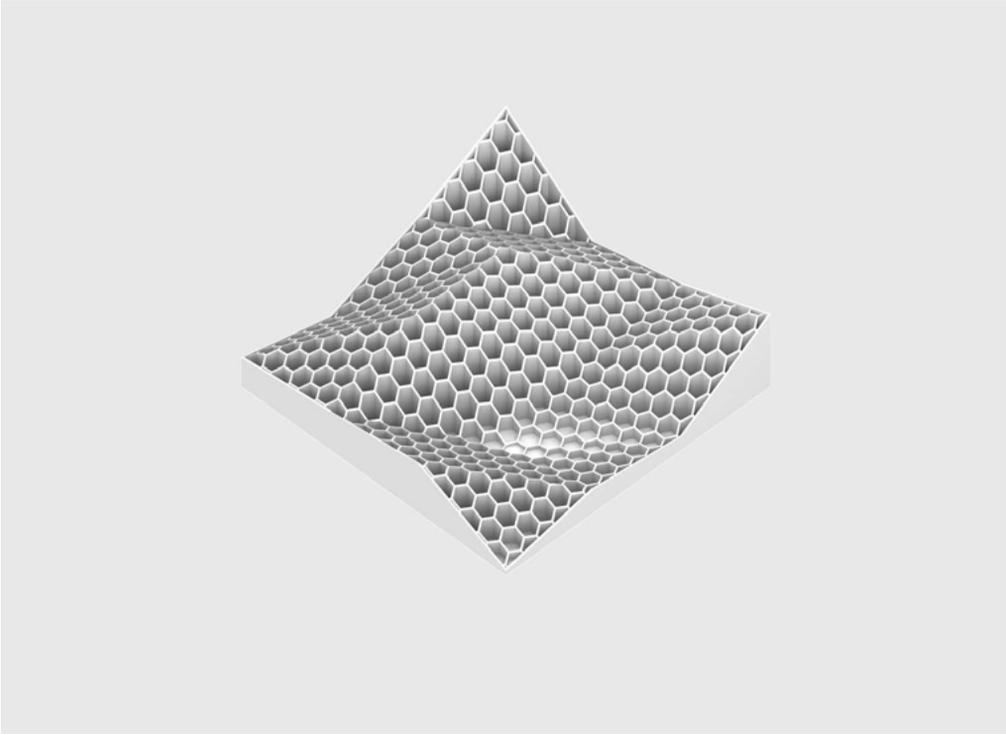


Fig. 7.19 — Structure hexagonale régulière générée par un logiciel d'impression (la surface supérieure de la pièce a ici été omise).

à cet effet, pour chaque paroi, une épaisseur correspondant à une ou deux « largeurs d'extrusion<sup>13</sup> » : la procédure automatique de génération de structures de remplissage du logiciel d'impression se trouve alors conduite à ignorer l'espace intérieur des parois, considéré comme nul au vu de l'« encombrement » physique attendu de la matière plastique déposée.

La figure 7.20 schématise l'algorithme développé pour implémenter notre approche de spécification de structures internes variables. Le volume intérieur du moule à fabriquer est tout d'abord divisé en cellules triangulaires de mêmes dimensions, sur la base d'une grille rectangulaire (étape I). Un modèle paramétrique de structures hexagonales est ensuite instancié au sein de chaque cellule, et configuré de sorte à produire un remplissage doté de la densité locale souhaitée (spécifiée par le diamètre des hexagones générant le motif de remplissage) : en permettant l'ajustement individuel des structures internes créées pour chaque cellule, cette étape de génération permet ainsi d'obtenir une densité de remplissage variable à l'échelle de la pièce (étape II). La géométrie in-

13. Définie comme la largeur du dépôt filaire réalisé par l'imprimante, cette grandeur a ici été fixée à 0,4 mm.

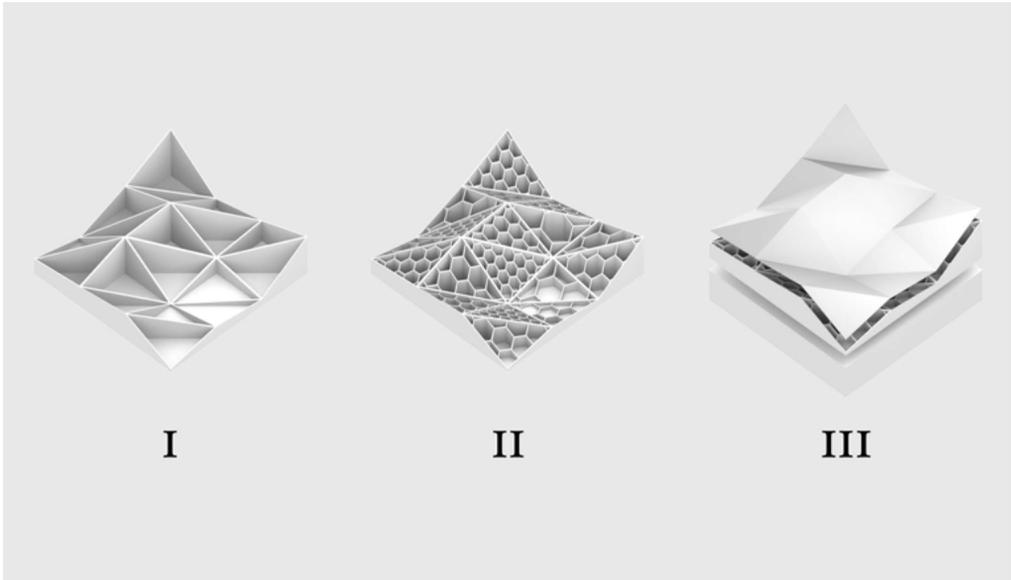


Fig. 7.20 — Schéma du processus de génération de structures internes variables : (I) division du volume interne en cellules triangulaires, (II) génération d'un motif de remplissage inhomogène, (III) fermeture de la pièce et ajout d'un volume densément rempli à sa base.

terne finalement obtenue, couverte par l'ajout d'une surface supérieure de 0,4 mm d'épaisseur, est ensuite placée sur un volume parallélépipédique de 12 mm d'épaisseur (étape III). Traité de manière conventionnelle par le logiciel d'impression, ce volume provoque la déposition, à la base du moule imprimé, d'un « premier niveau » de plastique rempli d'un motif hexagonal dense et homogène, généré par défaut par le logiciel. Dotée d'une résistance mécanique élevée, cette « base » est destinée à fournir une zone d'insertion au levier utilisé lors de l'opération de démoulage (figure 7.14).

Afin de faciliter la mise à l'épreuve des différentes variations possibles de la méthode décrite ci-dessus, nous nous sommes orientés vers son implémentation sous forme de script<sup>14</sup> dans l'environnement Grasshopper<sup>15</sup>, conçu pour le logiciel de modélisation Rhinoceros. Développé par David Rutten, Grasshopper se présente sous la forme d'un environnement de « programmation visuelle » : en informatique, cette notion renvoie à la possibilité de spécifier un programme par la manipulation d'éléments graphiques, représentant des entités telles que les opérations réalisées par le programme ou ses structures de données ; l'approche de la programmation visuelle contraste ainsi avec le mode traditionnel d'écriture *textuelle* des programmes. Chaque script Grasshopper est conçu et visualisé à travers un graphe en deux dimensions, dont les nœuds, représentant des opérations, sont liés par des « câbles » indiquant le chemin de propagation des données. Très répandu dans le domaine de l'architecture, et dans une moindre mesure dans celui du design, Grasshopper permet de concevoir, de manière relativement simple, des procédures génératives contrôlées par un ensemble de « paramètres<sup>16</sup> » de haut niveau, offrant la possibilité d'une production variable de formes<sup>17</sup>.

---

14. La pratique du scripting peut être définie comme la rédaction d'une série d'instructions « de haut niveau » permettant de piloter un logiciel ou un système d'exploitation. Dans le champ de la production numérique, le scripting pourra, par exemple, être utilisé pour accéder de manière programmatique aux fonctionnalités d'un logiciel de modélisation 3D, comme Maya ou 3ds Max. Le code ainsi écrit sera toujours exécuté au sein de l'environnement du logiciel de modélisation : on préférera donc utiliser l'appellation de « script » plutôt que celle de programme, laquelle renvoie plutôt à l'idée d'un code exécutable de manière autonome. Pour permettre l'écriture de scripts, les logiciels hôtes doivent fournir une API (interface de programmation applicative, ou *Application Programming Interface*), permettant d'accéder à tout ou une partie de leurs fonctionnalités. Au sens large, une API est un ensemble normalisé de « points d'entrée » permettant d'accéder aux fonctionnalités d'un logiciel depuis l'« extérieur », par exemple par l'intermédiaire de requêtes HTTP, ou d'une bibliothèque logicielle. Dans le cas d'un logiciel de modélisation 3D, l'API permettra par exemple d'accéder aux diverses primitives offertes par le logiciel (surfaces NURBS, maillages...), ou de réaliser des opérations géométriques (calcul d'intersections, lofting...).

15. <http://www.grasshopper3d.com> (consulté le 14 juin 2017).

16. Nous employons ici le terme de paramètre dans son sens informatique le plus général, pour désigner une variable de « haut niveau » spécifiant, par sa valeur, l'un des aspects du fonctionnement d'un script ou d'un programme.

17. La présence ubiquitaire, dans les scripts Grasshopper, d'éléments d'interface graphique (cursors) permettant d'ajuster des paramètres de haut niveau, n'implique pas que la variabilité mis en œuvre par ces scripts soit de *type* paramétrique, dans le sens précis donné à cette notion dans la section 4.2. Il s'avère en effet possible d'implémenter de nombreuses procédures de conception *implicites* dans l'environnement Grasshopper, comme des systèmes multi-agents, dont les différents paramètres peuvent être contrôlés interactivement par des éléments d'interface graphique.

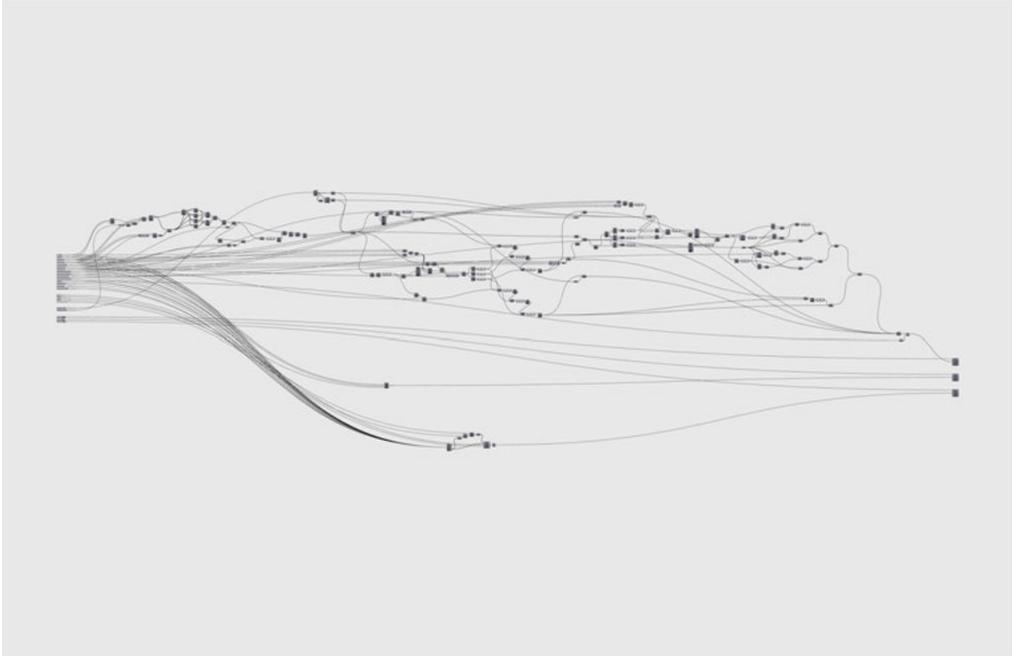


Fig. 7.21 — Vue d'ensemble de la définition Grasshopper développée.

La figure 7.21 montre une vue d'ensemble de la « définition<sup>18</sup> » Grasshopper implémentant l'algorithme schématisé sur la figure 7.20, et la figure 7.22 présente le détail de l'un des groupes de curseurs constitué dans cette définition, permettant l'ajustement de ses principaux paramètres. Outre l'ensemble des paramètres relatifs au dimensionnement du moule, les différentes densités des structures internes à produire dans chaque cellule constituent les principales informations à renseigner pour permettre l'exécution de notre programme. Une première approche permettant de fournir ces données consisterait à indiquer, de manière explicite, une liste de valeurs renseignant la densité « cible » à atteindre dans chaque cellule triangulaire du moule. Cette approche pourrait s'avérer particulièrement intéressante dans des scénarios visant à contrôler précisément la répartition des propriétés mécaniques au sein du moule<sup>19</sup> ; dans nos expériences, cependant, nous étions moins préoccupés de la distribution exacte de ces propriétés que du degré général de variation de résistance mécanique at-

18. Nom usuellement donné aux scripts Grasshopper.

19. Nous pouvons, plus largement, imaginer étendre notre méthode de génération de structures internes variables à des situations productives plus appliquées : cette approche pourrait ainsi s'avérer intéressante dans le cadre de problèmes d'optimisation structurelle, visant (à l'inverse du scénario envisagé dans *Computational Ruins*) à accroître la solidité de pièces mécaniques, en augmentant la densité de leur structuration interne dans les zones soumises aux contraintes les plus importantes.

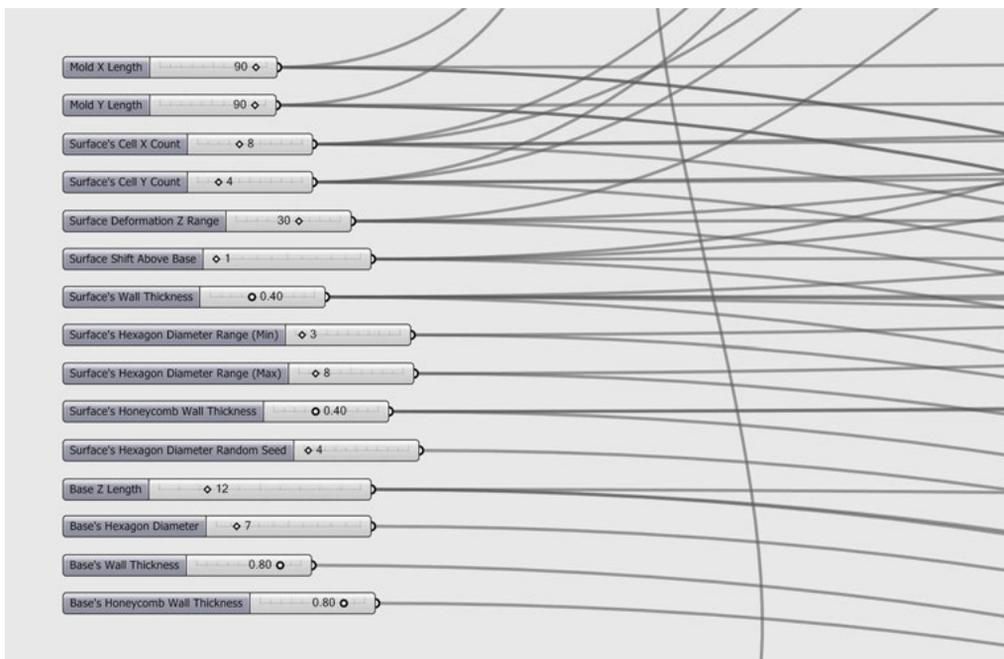


Fig. 7.22 — Vue rapprochée des principaux paramètres exposés par la définition Grashopper.

teint au sein d'une pièce donnée. En conséquence, nous avons ici adopté une approche basée sur une génération aléatoire de densités cibles, sélectionnées, pour chaque cellule, à l'intérieur d'une plage de valeurs prédéfinie (réglable par les paramètres Surface's Hexagon Diameter Range (Min) et Surface's Hexagon Diameter Range (Max)). L'artefact présenté sur la figure 7.15, d'une dimension de  $90 \times 90$  mm, a ainsi été obtenu à partir de structures internes de diamètre hexagonal variant entre 3 et 8 mm, réparties en 64 cellules triangulaires (construites à partir d'une grille de base de  $8 \times 4$  rectangles).

Comme nous venons de le voir ci-dessus, notre projet d'une conception du comportement dynamique de moules, destiné à produire des effets de brisure sélective, a pu être réalisé par la mobilisation d'une technique de conception « avancée » (le scripting), ainsi qu'un usage alternatif du procédé d'impression 3D par dépôt de matière fondue. Liée à l'enjeu conceptuel d'une remise en cause de la vision du moulage comme opération hylémorphique, ces techniques nous intéressaient également, sur le plan artistique, par la perspective de pouvoir créer des artefacts au sein desquels la puissance de formalisation offerte par le calcul numérique trouverait à s'exprimer dans la production d'une matérialité « rugueuse », rompant avec l'esthétique « lisse » emblématique de la production numérique non standard.

Les artefacts que nous obtenons ici rappellent, en un sens, certaines idées introduites par Greg Lynn dans *Animate Form*, relatives à la vision d'une

forme développée par la sédimentation progressive de flux et de champs de forces : emprisonnant certaines parties du moule, et révélant le détail de sa structure interne, les objets produits dans le cadre de *Computational Ruins* exposent les différentes strates accumulées de leur processus de production, mises en présence par les forces impliquées dans l'opération de démoulage. Mais l'idée de sédimentation possédait avant tout, chez Greg Lynn, une dimension *topologique* : comme nous l'avons vu, la notion même de multi-type procède fondamentalement d'une *spatialisation* de l'inscription temporelle des forces dans la forme. En conséquence, le processus de développement de la forme en réponse à ces forces n'est pas conçu comme irréversible, mais devient *instanciable* : il devient possible d'extraire plusieurs instantanés de la forme, en des « points clés » spécifiques de son développement. Cette vision conceptuelle, trouvant à se réaliser dans la pratique de Greg Lynn par l'utilisation de logiciels d'animation numérique, ne peut ici rendre compte de l'irréversibilité temporelle exprimée par nos artefacts. Au sein de notre projet, l'inscription des forces dans la forme s'exprime en effet non pas dans le déroulement d'opérations numériques simulées, mais dans l'action irréversible de processus matériels, où la notion de forme tend en réalité à se confondre avec celle de matériau.

La démarche de conception adoptée dans notre projet nous a de fait conduit à traiter le moule comme un véritable *matériau*, et non simplement comme une enveloppe géométrique. Cette approche remet fondamentalement en cause l'idée d'une séparation nette entre les pôles de la « forme » et de la « matière » dans l'opération de moulage : imprimés en 3D dans un matériau plastique (acide polylactique, ou PLA), les moules que nous avons produits sont certes réalisés, dans un premier temps, à partir de la donnée d'une forme géométrique ; mais leur comportement de brisure sélective, exprimé lors du démoulage, remet autant en cause l'intégrité de cette forme qu'elle n'engage les moules dans une négociation réciproque, à l'échelle du matériau, avec les propriétés mécaniques du béton solidifié. Contrairement à la vision non standard d'un passage direct du fichier à l'usine, il n'y a donc pas ici *une* forme qui serait préservée, par continuité, tout au long des étapes successives de conception et de fabrication : le moment du démoulage se traduit dans notre cas par une remise en cause radicale, irréversible, du rôle du moule en tant que forme. L'opération de démoulage, où le moule s'exprime en effet davantage par ses propriétés mécaniques de *matériau* préparé, que par sa capacité à façonner géométriquement le béton, débouche bien sur la production d'une forme, celle de l'artefact « final » lui-même : mais cette nouvelle forme n'est plus rattachée par aucun lien paramétrable à la forme numérique de départ. La possibilité d'un paramétrage complet de la matière, relevant d'une volonté d'extension totale du pouvoir d'action de la forme (c'est-à-dire, en réalité, du concepteur lui-même), se trouve ici mise à mal par la réalisation d'une simple opération de moulage : c'est ainsi paradoxalement en réinvestissant l'une des techniques

les plus schématiquement associées au point de vue hylémorphique que *Computational Ruins* nous permet de remettre en cause l'une des idées centrales du point de vue « non standard » sur la production numérique.

L'idée d'une forme opérant, dans l'instant même de sa fabrication, sa propre remise en cause — dans le sens où son contenu même en tant que forme se trouve remis en jeu, et non simplement transmis, sans altération, au réceptacle d'une matière passive —, s'avère profondément liée à la notion de « notation ouverte » que nous pu développer dans notre examen des projets *Two* et *Gradient* : dans ces projets, également, la forme communiquée aux machines de fabrication numérique ne se reproduit pas à l'identique dans la matière travaillée, mais induit un processus émergent de réalisation matérielle qui, simultanément, participe d'une remise en cause du donné géométrique « pur » de la forme de départ. La notion de notation ouverte, que nous avons introduite dans la section 6.3 afin de préciser l'idée d'une spécification du *comportement* des agents impliqués dans la fabrication, et non de la géométrie des objets à produire, peut ainsi être pleinement mobilisée pour caractériser les formes numériques produites dans *Computational Ruins*. Mais là où, dans *Two* et *Gradient*, les notations produites se réalisaient « immédiatement » sous une forme matérielle émergente à travers l'action de machines à commande numérique, la forme de chaque moule trouve ici au sens strict à se réaliser plus tardivement, dans le moment « final » de l'opération de démoulage. L'étape de fabrication numérique ne vise donc pas ici à réaliser directement les notations ouvertes spécifiées par le concepteur, mais à *préparer* (par la fabrication des moules) les conditions d'une réalisation future de ces notations au cours d'une opération productive ultérieure (le démoulage). En ce sens, l'activité de conception de notations ouvertes ne se comprend pas, ici, comme la spécifications « directe » de trajectoires d'usinage (même si nous avons effectivement adopté, lors de la fabrication de la structure interne des moules, une stratégie contraignant la machine à suivre les trajectoires d'impression désirées), mais comme une véritable activité de *conception d'un matériau*, préparant les conditions d'un comportement destiné à s'exprimer de manière autonome, dans une opération productive non nécessairement numérique. Dans son sens général, la notion de notation ouverte peut ainsi être envisagée comme une approche générique permettant de mettre en œuvre la méthodologie, annoncée dans la section 6.3, d'une conception envisagée comme disposition de « configurations d'agentivités », préparant les conditions d'une production émergente<sup>20</sup>.

---

20. L'importance acquise par cette notion de préparation, mise en évidence par notre analyse des projets *Gradient*, *Two* et *Computational Ruins*, confirme la possibilité de rapprocher l'idée de notation ouverte de certains aspects du livre *L'œuvre ouverte* d'Umberto Eco, comme nous le suggérons dans une note précédente ; mais il convient néanmoins de souligner que le rôle réservé à la notion d'indétermination dans nos projets semble dépasser, en portée, celui

---

envisagé par Eco dans sa poétique de l'œuvre ouverte. L'idée d'œuvre ouverte se déploie en effet, chez Eco, dans le cadre d'une vision centraliste de la paternité artistique : Eco précise ainsi que l'auteur d'une œuvre ouverte (ou plus spécifiquement, ici, d'une œuvre « en mouvement »), s'il offre bien une œuvre « à compléter », est « conscient du fait qu'une fois complétée l'œuvre en question sera toujours la sienne » (Umberto Eco, *The Open Work*, *op. cit.*, p. 19, notre traduction). Pour Eco, il n'y a ainsi pas d'ambiguïté dans le fait que « [l]'auteur est celui qui a fait la proposition initiale d'un ensemble de possibilités, organisées rationnellement, orientées, et accompagnées de spécifications précisant leur développement adéquat » (*Ibid.*, p. 19, notre traduction). En conséquence, comme le montre cette dernière citation, le degré d'indétermination recherché par les œuvres ouvertes ne doit jamais menacer la possibilité de lire, dans chacune des formes finalement prises par l'œuvre, la signature originale d'une individualité artistique. Par contraste, les projets présentés dans ce chapitre témoignent d'une volonté de limiter au maximum de tels gestes de signature, pour ménager une place accrue à l'expression d'effets matériels émergents et indéterminés : notre démarche de « simplification formelle », adoptée dans *Two* et *Gradient*, peut notamment être comprise dans cette perspective. Notre concept de notations ouvertes se rapproche ainsi sans doute davantage, en ce sens, de certaines méthodes expérimentées par John Cage pour « émanciper » les sons de l'intention du compositeur, et les révéler ainsi dans leur nature d'événements émergents. On pourra notamment se référer, sur ce sujet, à l'analyse récemment proposée par Emanuele Quinz de la notion d'*utilities*, dans le cadre d'un article consacré au happening *Musicircus* de 1967 : Emanuele Quinz, « Dissonances absolues. Stratégies musicales participatives : L'exemple de *Musicircus* de John Cage », *Oscillations*, n° 2, 2013, p. 37–47. Sur la question du rôle joué par l'indétermination dans le travail de John Cage, on pourra également consulter : John Cage, « Composition as Process », dans *Silence: Lectures and Writings*, 50<sup>th</sup> Anniversary Edition, Middletown, Wesleyan University Press, 2011, p. 18–56.



Quatrième partie

# **Production numérique maintenue**



## Chapitre 8

# La production numérique comme maintenance

### 8.1 De la stabilisation à la maintenance

Après avoir présenté, dans le chapitre 7, une première série d'expérimentations visant à explorer l'hypothèse d'une pratique « non hylémorphique » de la production numérique, nous allons à présent poursuivre notre réflexion en empruntant une direction déjà annoncée dans la section 6.3 : cette quatrième partie de notre exposé va ainsi nous permettre de développer l'idée d'une production en « temps-réel », remettant en cause la linéarité de l'articulation traditionnelle entre les étapes de conception et de fabrication au sein du processus productif.

Cet objectif prolonge l'approche méthodologique adoptée dans le chapitre 6 : nous nous inscrivons donc, à nouveau, dans la perspective d'une compréhension émergente de la notion de production, envisageant celle-ci comme un processus d'interaction réciproque entre un réseau d'agents, humains et matériels. Mais nous cherchons ici à porter jusqu'au bout les conséquences de cette idée : nous souhaitons ainsi opérer une remise en question des notions mêmes de conception et de fabrication, à la lueur d'une nouvelle compréhension émergente du régime productif.

Comme nous l'annoncions déjà à la fin du chapitre 6, les expériences présentées dans le chapitre 7, tout en proposant une remise en cause effective de la hiérarchie *conceptuelle* entre conception et fabrication, continuaient de s'inscrire dans le cadre d'une séparation *pratique* entre ces deux étapes. À plusieurs reprises, notre discussion de ces travaux nous a conduit à souligner le rôle stratégique joué par cette séparation pratique : dans le projet *Gradient*, par exemple, le tracé numérique en niveaux de gris, arrêté au terme de l'étape de conception, joue ainsi le rôle de figure de *référence* du point de vue hylémorphique ; sa géométrie nette renvoie à l'image que nous « aurions dû » obtenir, si la gravure de la plaque d'aluminium s'était effectivement apparentée à la réception passive d'une forme par la matière. Dans cette perspective, le maintien d'une séparation pratique entre conception et fabrication peut être compris comme une stratégie *incitant* à développer un point de vue hylémorphique, pour mieux démontrer l'incapacité de celui-ci à saisir la matérialité émergente des résultats obtenus.

Compris ainsi, les travaux présentés dans le chapitre 7 relèvent d'une forme de démarche *rhétorique* : ils entendent en effet pointer certaines fissures dans la doctrine hylémorphique à partir d'une position initialement *interne* à celle-ci, ménagée en instaurant une séparation pratique entre conception et fabrication. Par certains aspects, l'approche suivie par ces travaux consiste donc à chercher à ce que la conception ne se réalise pas « bien » dans la fabrication (« ce que j'obtiens n'est pas ce que j'avais prévu, comme prévu ») : les formes d'agentivité matérielle exprimées dans ce cadre se trouvent ainsi, logiquement, conduites à intervenir dans la perspective d'une dégradation des formes « pures » prévues par la conception. Les artefacts obtenus renvoient alors inévitablement à la notion d'*erreur*, même si celle-ci, comme nous l'avons vu à travers les arguments présentés dans le chapitre 7 (dont cette notion se trouve absente), ne constitue pas le « point d'origine » conceptuel et pratique de nos projets<sup>1</sup>.

Cette résurgence de la notion d'erreur signale une limitation des approches présentées dans le chapitre 7 : leur mise en œuvre de comportements matériels émergents se trouve ainsi toujours engagée dans un rapport comparatiste à la notion de forme « pure ». L'intérêt ne porte pas tant sur la matérialité émergente des artefacts produits que sur la capacité de ces objets à constituer un pôle opposé au modèle géométrique de la forme, offrant le constat d'une insoumission de la fabrication à la conception. La forme géométrique « pure » continue ainsi de jouer ici un rôle fondamental, non plus il est vrai comme opérateur prescriptif, mais comme référent nécessaire au fonctionnement rhétorique de l'expérience<sup>2</sup>.

Cette remarque nous permet de clarifier ce qui constitue, à notre sens, la limitation conceptuelle principale des approches explorées dans le chapitre 7. L'orientation comparatiste et rhétorique de ces expériences s'impose en effet comme conséquence d'un rapport *linéaire* entre les étapes pratiques de conception et de fabrication, plutôt que comme effet de la seule séparation entre ces étapes. D'une part, c'est en vertu de la directionnalité hiérarchique de l'articulation conception-fabrication que la notion même de forme « pure », toujours mobilisée par l'approche comparatiste, peut se stabiliser : la forme « pure » n'existe que si elle est *fixée* par une étape de conception originaire, « imperméable » à toute étape ultérieure du processus productif. D'autre part, l'idée même d'un fonctionnement rhétorique suppose l'enchaînement linéaire, orienté en vue d'obtenir un effet, des différentes étapes composant le « discours » du projet. L'orientation rhétorique des expériences présentées dans le

---

1. Comme expliqué dans la section 7.3, nous avons ainsi cherché, dans le cadre de *Computational Ruins*, à préparer de manière *systématique* le comportement de fracturation recherché.

2. Comme nous l'avons souligné dans notre discussion des projets *Gradient* et *Two* (sections 7.1 et 7.2) nous avons d'ailleurs été amenés à « épurer » considérablement les formes « fabriquées » afin d'accroître leur efficacité rhétorique.

chapitre 7 repose ainsi sur un enchaînement linéaire des étapes de conception et de fabrication, perçues comme moments d'une argumentation visant à « exposer » la dégradation de la forme pure lors de sa matérialisation. Comme tout exposé, ce processus adopte une direction unique, permettant l'énoncé successif d'arguments en vue d'arriver à une conclusion finale. L'écart constaté entre la structure matérielle obtenue et la forme pure de départ marque donc à la fois la fin de la production, mais également de la portée conceptuelle de l'expérience : la doctrine hylémorphique est remise en cause dans un cas particulier, mais la notion de forme pure reste inaltérée, car elle s'avère nécessaire à l'argumentaire suivi.

Cette analyse des approches explorées dans le chapitre 7 suggère de chercher à dépasser l'idée d'une articulation linéaire entre conception et fabrication, et nous permet de préciser notre objectif d'investir une forme de production en « temps-réel ». Par la notion de « temps-réel », nous nous référons ici à l'idée d'un mode de production substituant, à la *directionnalité temporelle* imposée par l'articulation linéaire traditionnelle entre conception et fabrication, un régime *maintenu* et *réiproque* d'interactions entre agents, de sorte qu'il soit possible, par exemple, d'envisager qu'un agent impliqué dans une étape de « fabrication » influence un agent de « conception » — jusqu'au point où, peut-être, la notion même d'une séparation *stricte* entre conception et fabrication pourra être remise en cause. Cette idée pose ainsi les bases d'une forme d'organisation alternative du processus productif. Plutôt qu'une ligne, signalant une direction temporelle unique, et marquant la progression inéluctable de la forme pure vers son instanciation matérielle, c'est à présent la figure d'un *réseau* qui doit nous permettre de visualiser l'ensemble des interactions entre agents : ces relations productives sont ici « mises à plat », dessinant une carte de rapports réciproques, non hiérarchiques, et non soumis à la directivité d'une « flèche du temps » imposée *a priori* par le concepteur. Au schéma d'une articulation temporelle linéaire, le mode d'organisation d'une production en « temps-réel » substitue ainsi un ensemble de temporalités autonomes (celles des interactions entre agents), *maintenues* au cours du processus productif.

L'une des principales conséquences de cette organisation réside dans la possibilité d'une expression continue de la variabilité des modes de production numériques, dans une logique compatible avec l'idée simondonienne de modulation : il s'agit ici donc d'imaginer des scénarios de production où cette variabilité contribuerait à produire les conditions d'un développement continu de la forme et de la matière, là où la production non standard, comme nous l'avons vu dans la section 5.5, résultait seulement d'une mise en variation de la matière à partir d'une forme *stabilisée*, extraite d'un modèle paramétrique. De manière fondamentale, notre idée d'une production en « temps-réel » peut ainsi se comprendre comme le *passage d'une logique de la stabilisation vers une logique de la maintenance* : nous nous référons donc préférentiellement, à

compter de la prochaine section, à l'idée d'une production *maintenue* afin de qualifier le type de régime productif que nous cherchons ici à investir.

## 8.2 Enjeux pratiques de la maintenance

Notre idée d'une transition vers un régime de production maintenue appelle à examiner conceptuellement la notion même de *maintenance*. Avant de proposer, dans la section 8.3, une compréhension de cette notion liée aux préoccupations spécifiques de cette thèse, il convient tout d'abord de discuter des usages et des questions usuellement associés au terme de « maintenance » dans plusieurs champs de la production numérique, pertinents par rapport à notre approche. Les paragraphes ci-dessous visent ainsi à préparer notre future conceptualisation de la notion de maintenance, et à inscrire celle-ci dans un dialogue productif avec la problématique générale de « la maintenance » dans le champ de la production numérique.

Le verbe « maintenir » désigne le fait de « [f]aire rester quelqu'un, quelque chose dans une position, une situation données », ou « [f]aire en sorte que quelqu'un /quelque chose reste dans un état déterminé<sup>3</sup> ». Construit à partir du latin *manus*, « main », et *tenere*, « tenir », le terme « maintenir » garde ainsi, dans son sens général, un lien avec l'idée de « tenir avec la main ». Comprise comme l'« action de maintenir<sup>4</sup> », la maintenance désigne donc une action réalisée *sur* quelque chose ou quelqu'un afin de le faire rester dans un état « déterminé ». Dans un sens plus précis, le terme « maintenance » renvoie également à la notion d'*entretien*, désignant alors « l'action de maintenir en état de fonctionner<sup>5</sup> » un objet technique. Cette signification semble héritée du domaine militaire, et plus particulièrement de l'usage de l'anglais *maintenance* dans l'armée américaine au cours de la Seconde Guerre Mondiale. En 1953, le français adopte ainsi la signification « maintien des effectifs et du matériel d'une troupe au combat à leur niveau normal » : en introduisant l'idée d'un maintien du « matériel », cette définition annonce la généralisation d'une compréhension de la maintenance comme opération *technique*, avec laquelle nous sommes aujourd'hui familiers (« maintenance informatique », « maintenance réseau »...). Il convient enfin de remarquer que le terme maintenance possédait, au XII<sup>e</sup> siècle, le sens de « protection, soutien » : comme nous le verrons, ce sens revêt aujourd'hui une signification particulière dans le domaine de l'art, plus spécifiquement par rapport à la question de l'exposition.

---

3. [Anon.], « Maintenance », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/maintenance> (consulté le 17 janvier 2017).

4. *Ibid.*

5. *Ibid.*

Dans le sens « d'opération technique » que nous venons d'identifier ci-dessus, la maintenance constitue un enjeu crucial pour tout système se devant de « fonctionner » dans la durée. La maintenance concerne donc, de fait, un vaste ensemble de contextes dans le champ de la production numérique. En architecture, on pourra par exemple penser à la nécessité de réaliser des « opérations de maintenance » sur l'un des sous-systèmes techniques d'un édifice, comme son système de climatisation ou sa façade. Ceci nous conduit immédiatement à faire une première remarque. N'y a-t-il pas contradiction à associer, comme nous l'avons fait jusqu'ici, la notion de maintenance au champ de la *production*? Ne peut-on pas *précisément* séparer la production de la maintenance, sur la base d'une opposition entre la « prise de forme » et l'action visant à conserver cette « forme » (celle de l'édifice, dans notre exemple) dans un état déterminé?

Comme l'a récemment montré Hilary Sample dans son ouvrage *Maintenance Architecture*<sup>6</sup>, consacré à la problématique de la maintenance dans le contexte architectural, la définition de la maintenance comme un processus *externe* à la production de l'édifice, en apparence intuitive, s'avère en pratique difficile à établir nettement. Sample cite ainsi l'exemple du Alcoa Building (aujourd'hui Regional Enterprise Tower), conçu à Pittsburgh en 1953 par Wallace Harrison et Max Abramovitz, et montre comment la question du *nettoyage* de la façade (une composante essentielle de la maintenance architecturale) a été intégrée à la conception de l'édifice — autrement dit, à l'une des étapes de sa production. Les fenêtres du Alcoa Building (figure 8.1) ont ainsi été conçues dès l'origine pour pivoter, afin de permettre leur nettoyage depuis l'intérieur de l'édifice. Cependant, pour Hilary Sample, ce choix relève peut-être moins d'une préoccupation pour la sécurité des futurs « agents de maintenance » que d'une volonté de rendre invisible leur travail, afin de préserver la stabilité de l'image renvoyée par l'édifice<sup>7</sup>. Les enjeux techniques de la maintenance sont donc ici intégrés à la conception, mais cette prise en charge semble également relever d'une volonté de ne pas laisser la maintenance « contaminer » l'identité symbolique de l'édifice, ce qui rétablit, de fait, une stricte séparation (pratique et symbolique) entre production et maintenance. Pourtant, un niveau supérieur de complexité s'ajoute encore en remarquant que, ce faisant, l'édifice *maintient* sa stabilité en tant qu'image culturelle. Les liens entre maintenance et production s'avèrent donc ici complexes et témoignent d'un recouvrement d'enjeux d'ordre technique, logistique, économique, symbolique et politique.

La mise en œuvre de relations complexes entre production et maintenance semble aujourd'hui vouée à se généraliser, avec l'investissement croissant des

---

6. Hilary Sample, *Maintenance Architecture*, Cambridge, MIT Press, 2016.

7. *Ibid.*, p. 52.

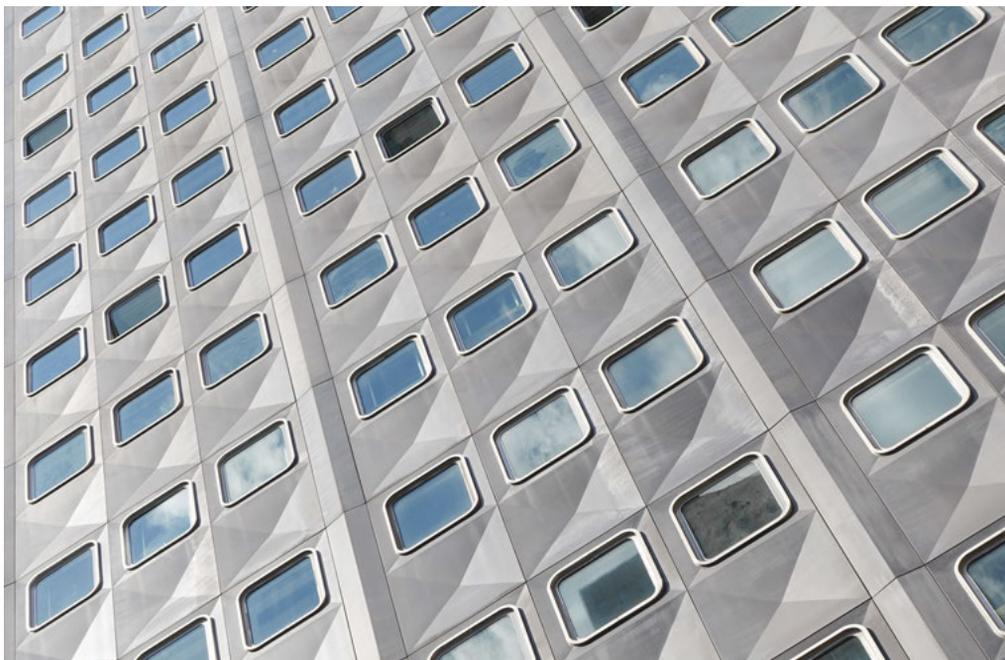


Fig. 8.1 — Détail de la façade du Alcoa Building (source : <https://www.flickr.com/photos/carlosliza/28073360381>, modifiée).

questions liées à la performance dans les processus de conception. Ainsi, la problématique d'une intégration des enjeux du nettoyage à la conception s'avère aujourd'hui réactualisée par l'utilisation de verres « fonctionnels », et notamment des verres auto-nettoyants, conçus pour prendre en charge certains aspects des opérations de maintenance des édifices. Sur un autre plan, le cas d'édifices ou d'environnements « réactifs », intégrant des éléments mécaniques mobiles ou des surfaces d'affichage dynamiques, repose la question de la définition des limites de la phase de production d'un édifice, ce qui remet de fait en cause la séparation intuitive entre production et maintenance. Des éléments tels que la surface triangulée d'Aegis Hyposurface de dECOi<sup>8</sup> (figure 8.2), la façade lumineuse du FRAC Centre de Jakob + MacFarlane<sup>9</sup>, investie par Electronic Shadow (figure 8.3), ou les moucharabihs mécaniques de l'Institut du monde arabe à Paris par Jean Nouvel<sup>10</sup> (figure 8.4), relèvent en effet d'une forme de *production*, en mettant en œuvre une capacité de modification dynamique de la structure de l'édifice qu'ils équipent. La production, dès lors, ne s'arrête pas à la « stabilisation » d'une structure unique, mais devient production de struc-

8. <http://www.decoi-architects.org/2011/10/hyposurface> (consulté le 19 avril 2017).

9. <http://www.jakobmacfarlane.com/fr/project/frac-centre> (consulté le 19 avril 2017).

10. <http://www.jeannouvel.com/fr/desktop/home/#/fr/desktop/projet/paris-france-arab-world-institut1> (consulté le 19 avril 2017).



Fig. 8.2 — Test des différents modules d'Aegis Hyposurface. Le dispositif est usuellement présenté en position verticale, à la manière d'une façade (source : <http://fluxwurx.com/installation/?p=194>).

tures dans le « temps-réel » de l'usage de l'édifice. Cet exemple nous ramène ainsi à l'idée suggérée à la fin de la section précédente, opposant la notion de maintenance à la vision d'une production comprise comme un processus linéaire de « stabilisation ». Les composants architecturaux « réactifs », dépassant *littéralement* l'état de formes « stabilisées », viennent ainsi appuyer l'idée d'une opposition conceptuelle entre maintenance et stabilisation, que nous avons commencé à mettre en place dans la section précédente, tout en relevant d'enjeux concrets sur le plan *pratique*. Car ces dispositifs, souvent complexes, requièrent de fait une maintenance fréquente, comme en témoignent les moucharabiehs de l'Institut du monde arabe, tombés en panne après cinq années d'utilisation<sup>11</sup>, et dont de nouvelles versions ont récemment été installées dans le cadre du projet de rénovation de l'Institut<sup>12</sup>.

11. Hubert d'Erceville, « Vent de fraîcheur sur l'Institut du monde arabe », *Le Moniteur*, 5 août 2016, en ligne : <http://www.lemoniteur.fr/articles/vent-de-fraicheur-sur-l-institut-du-monde-arabe-32803774> (consulté le 20 avril 2017).

12. Sur l'étude technique réalisée dans le cadre de la rénovation des moucharabiehs, voir notamment : [Anon.], « Institut du Monde Arabe : Rénovation des Moucharabiehs (interview de Loic Durand — Spectat) », avril 2015, en ligne :

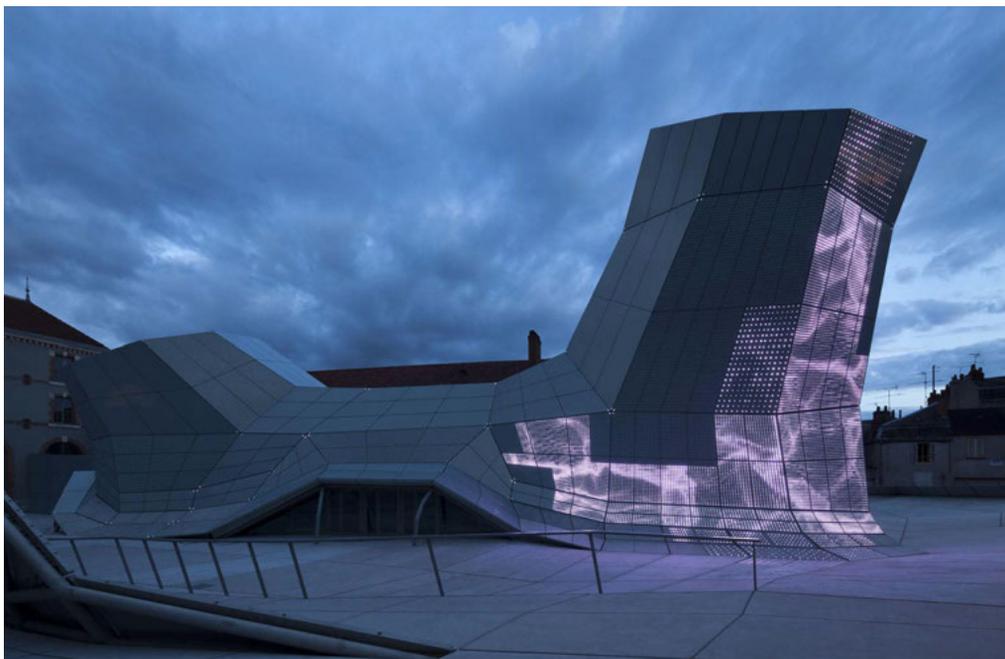


Fig. 8.3 — FRAC Centre : détail de la façade conçue par Electronic Shadow (source : <http://www.archdaily.com/424754/the-turbulences-frac-centre-jakob-macfarlane-architects>).

Ces exemples s'inscrivent de manière générale dans le cadre de la problématique du « cycle de vie » d'un édifice, mêlant notamment des enjeux juridiques, techniques, économiques et écologiques. À l'heure d'une complexification des relations entre ces enjeux, la maintenance ne saurait ainsi être considérée comme une préoccupation secondaire, et semble amenée à occuper une place de plus en plus importante dans les processus de production. La généralisation des technologies de modélisation des données du bâtiment (BIM) signale peut-être à ce titre la possibilité d'une prise en compte accrue des questions de maintenance dans les flux de travail numériques : comme nous l'avons noté, le BIM permet la prise en charge d'informations relatives non seulement à la construction d'un édifice, mais également à son entretien, voire à sa démolition. Cependant, si la gestion des questions *techniques* liées à la maintenance semble nécessairement vouée à se développer, la dimension *esthétique* ne saurait pour autant être considérée comme secondaire. Le travail de Gordon Matta-Clark est ainsi cité par Hilary Sample pour sa capacité à replacer les questions de l'endurance et de la transformation au cœur des enjeux esthétiques de l'ar-

---

<http://www.alto-ingenierie.fr/articles-newsletter/institut-du-monde-arabe-renovation-des-moucharabiehs-interview-de-loic-durand-spectat> (consulté le 20 avril 2017).

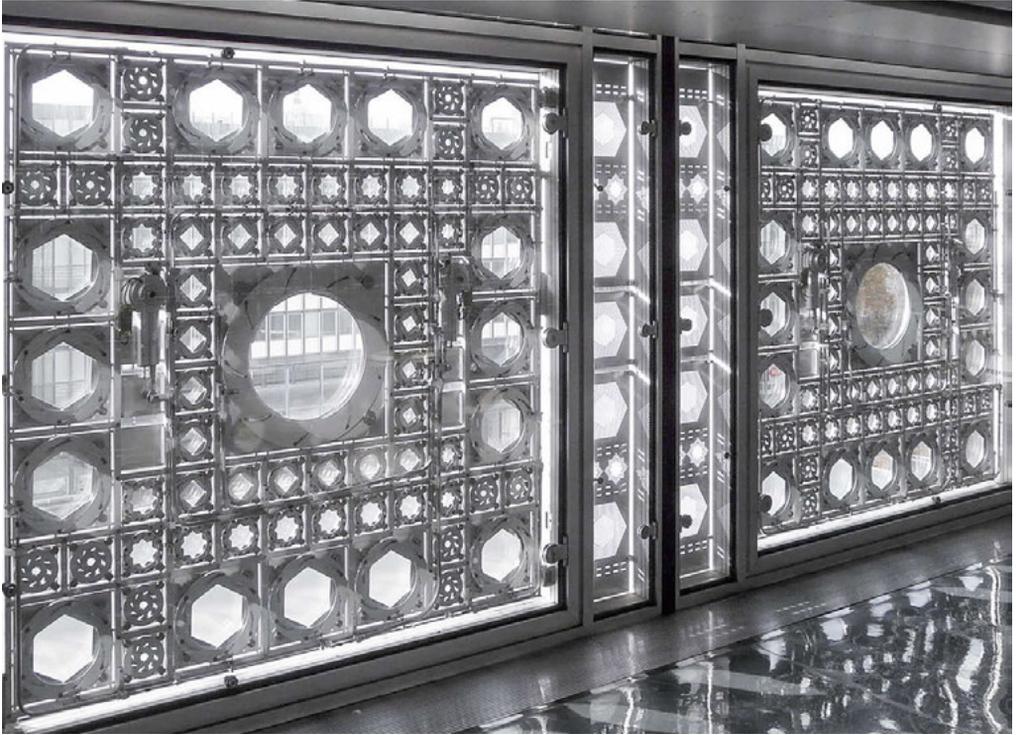


Fig. 8.4 — Détail des moucharabiehs de l'Institut du monde arabe (source : <http://www.archdaily.com/162101/ad-classics-institut-du-monde-arabe-jean-nouvel>).

chitecture<sup>13</sup>. Mais il convient ici de remarquer qu'en vertu de la nature même de l'intervention artistique réalisée, les enjeux esthétiques de la maintenance sont alors, de fait, examinés *postérieurement* au processus de production des édifices (dont Matta-Clark n'est pas l'architecte). Ceci nous conduit donc à poser la question suivante : pourrait-on au contraire imaginer que les enjeux esthétiques liés à la maintenance soient pris en charge au moment même de la production des édifices, dans un mouvement complémentaire à la négociation des enjeux techniques posés par la problématique du « cycle de vie » ?

Cette question d'un investissement esthétique des enjeux de la maintenance s'avère également cruciale pour le champ artistique. Traditionnellement, la maintenance d'une œuvre renvoie à une action réalisée *sur* l'œuvre, par un agent considéré comme *externe* à l'œuvre : elle prend ainsi typiquement la forme d'une intervention technique, ou de l'entretien de certains éléments matériels précis (comme la batterie d'un appareil qu'il s'agirait de recharger périodiquement), par le personnel du lieu d'exposition. Classiquement, il est donc du ressort de l'équipe organisant l'exposition d'une œuvre d'en assurer

13. Hilary Sample, *Maintenance Architecture*, *op. cit.*, p. 95.

la maintenance — autrement dit, de « prendre soin » de l'œuvre, ce que traduit peut-être l'étymologie commune des mots anglais « cure » et « curator ». Cette compréhension traditionnelle de la question de la maintenance, qui nous ramène à la signification historique de la maintenance comme « protection, soutien », est cependant mise en difficulté dans le cas d'œuvres exposant *littéralement* des situations productives : production de vidéo ou d'images (sur écran ou projetées), de sons, mais aussi production de structures *matérielles*, par l'intermédiaire d'une capacité de reconfiguration dynamique de la structure même de l'œuvre, ou d'une production d'artefacts (impressions 2D ou 3D, usinages...).

Il convient de souligner que nous nous référons, ici, à la mise en œuvre concrète, en « temps-réel » et « en exposition », d'un processus productif — et non à sa *représentation* par l'exposition d'artefacts « stabilisés », obtenus dans un temps antérieur à l'exposition. En cohérence avec notre description antérieure des relations de production comme interactions au sein d'un réseau d'agents, humains ou non-humains, nous qualifierons ici d'*œuvres interactives* ces situations productives « en exposition » — en précisant, toutefois, que si toute œuvre interactive peut être définie comme le lieu de processus d'interaction, nous n'imposons pas, au niveau de cette définition générale, que ces interactions relèvent des logiques *émergentes* qui nous intéressent en priorité dans cette thèse<sup>14</sup>.

Si de nombreuses œuvres interactives s'inscrivent dans la perspective d'une production de son ou d'images « sur écran », l'idée d'une production « en exposition » de structures *matérielles* ne saurait pour autant être considérée comme une curiosité. Outre le cas des sculptures ou des environnements « réactifs », c'est-à-dire d'œuvres qui, à l'instar d'Aegis Hyposurface<sup>15</sup>, se dotent au cours de l'exposition d'une capacité de reconfiguration structurelle, nous pouvons présenter ici quelques exemples d'œuvres relevant d'une production en temps-

---

14. La définition ici proposée d'« œuvre interactive » se trouve ainsi dotée du degré de généralité nécessaire à la description d'un ensemble de réalisations artistiques existantes, que celles-ci mettent en œuvre ou non des formes émergentes d'interaction entre les agents qu'elles mobilisent. Il convient également de souligner que cette définition est indépendante de tout critère de *participation active* du public. Ainsi, une simulation numérique de type multi-agents — comme celle utilisée dans notre projet *Two*, discuté dans le chapitre 7 —, exécutée en temps-réel et produisant des images affichées sur un écran, constituera pour nous une œuvre interactive, fondée sur l'interaction d'un ensemble d'agents computationnels. Néanmoins, les œuvres impliquant physiquement le public constituent de toute évidence une catégorie importante d'œuvres interactives, à laquelle nous consacrerons la dernière partie de cette thèse.

15. Bien que nous ayons précédemment qualifié Aegis Hyposurface de projet architectural, il convient ici de remarquer que de nombreux environnements architecturaux réactifs s'avèrent, de fait, réservés aux contextes de foires ou d'expositions muséales.

réel d'artefacts, par l'intermédiaire d'opérations techniques adaptées du monde industriel.

L'installation *The Sculpture Factory*<sup>16</sup>, conçue par Davide Quagliola (connu sous le pseudonyme Quayola) en 2016 (figure 8.5), donne par exemple à voir l'usinage « en direct » de blocs de polystyrène par un bras robotisé, produisant une série de répliques « inachevées » de la figure centrale du groupe du Laocoon — dans le sens où seules certaines parties de chaque bloc sont effectivement travaillées, laissant apparaître une portion toujours différente de la statue originale. Le robot reste actif pendant toute la durée de l'exposition, et ne s'interrompt que pour permettre au personnel de procéder au remplacement des blocs une fois ceux-ci usinés. Les répliques produites sont ensuite exposées dans un espace attenant à la zone de travail du robot, où sont également stockés les blocs « bruts » en attente de traitement.

Abstraction faite de sa complexité technique, *The Sculpture Factory* prolonge bien évidemment une longue lignée de « machines à faire de l'art », parmi lesquelles nous pouvons mentionner, entre autres exemples possibles, les machines à dessiner *Méta-Matics*<sup>17</sup>, conçues par Jean Tinguely entre 1959 et 1960 (figure 8.6). Plus récemment, et dans un lien plus direct avec l'idée d'une mise en œuvre « en exposition » de processus de production industriels, nous pouvons également citer ici les œuvres de l'artiste Roxy Paine, qui constituent pour nous des références intéressantes par leur attention apportée au comportement *émergent* des matières utilisées — ce qui les rapproche davantage des préoccupations explorées dans cette thèse que le procédé *file to factory* démontré par Quayola. L'installation *SCUMAK (Auto Sculpture Maker)*<sup>18</sup> (figure 8.7), déclinée en deux versions (en 1998 et 2000), se compose ainsi d'une unité de production de structures plastiques de forme libre, produites par extrusion de polyéthylène basse densité. Chaque objet produit est obtenu, sur une période de plusieurs heures, par une succession de phases d'extrusion et de refroidissement, permettant aux masses de polyéthylène déposées de progresser dans leur ensemble vers une structuration verticale, tout en maintenant, pendant chaque phase d'extrusion, la possibilité d'une libre expression des capacités morphogénétiques du matériau. Un tapis roulant permet d'emporter les pièces terminées hors de la zone de travail, préparant ainsi automatiquement la machine à la production d'une nouvelle « sculpture<sup>19</sup> ».

16. <https://www.quayola.com/sculpture-factory> (consulté le 20 avril 2017).

17. Voir notamment la notice de l'exemplaire acquis par le Musée national d'art moderne : <https://www.centrepompidou.fr/cpv/resource/cAnpg6p/rKxB6dK> (consulté le 20 avril 2017).

18. <https://www.youtube.com/watch?v=JxyPuDiXQaY> (consulté le 20 avril 2017).

19. Incidemment, le dispositif mis en œuvre dans *SCUMAK* n'est pas sans rappeler la célèbre installation *Cloaka* de Wim Delvoye, déclinée en plusieurs versions à partir de 2000, et reproduisant de manière mécanique le fonctionnement de l'appareil digestif humain —



Fig. 8.5 — Quayola, *The Sculpture Factory*, 2016 (source : <https://www.aec.at/feature/en/festival2016>).

Par leur investissement central d'une dimension productive, de telles œuvres provoquent une incidence accrue des problématiques liées à la maintenance sur leurs modalités de conception et d'exposition. Elles entraînent ainsi, d'une part, un redoublement des problématiques *techniques* relatives à la maintenance, dans la mesure où elles relèvent fréquemment de mécanismes complexes qui se doivent de fonctionner dans la durée, et souvent de manière autonome, au cours d'une exposition<sup>20</sup>. D'autre part, et de manière plus fondamentale, ces œuvres contribuent à remettre en question la séparation traditionnellement assumée entre production et exposition<sup>21</sup>, et signalent ainsi

---

gestion, digestion et excrétion. Voir notamment : [http://we-make-money-not-art.com/wim\\_delvoye\\_cloaca\\_20002007](http://we-make-money-not-art.com/wim_delvoye_cloaca_20002007) (consulté le 19 avril 2017).

20. La maintenance technique (dans le sens d'entretien) d'une œuvre concerne évidemment d'autres contextes, comme ceux de la démonstration ou de la performance. Cependant, la situation d'exposition s'avère particulièrement complexe dans la mesure où les durées impliquées sont en général plus importantes que dans ces autres cadres : typiquement de l'ordre de plusieurs semaines à plusieurs mois pour une exposition, contre quelques minutes ou quelques heures pour une performance ou une démonstration.

21. L'exposition *Design Ex Machina*, organisée en 2015 sous le commissariat de Sophie Fétro, fournit l'exemple d'un projet récent examinant, par la monstration conjointe de dispositifs (machines) de production et des artefacts qu'ils permettent de produire, l'hypothèse d'une « relation de réciprocité entre les moyens de production (*ce qui produit*) et les formes qui

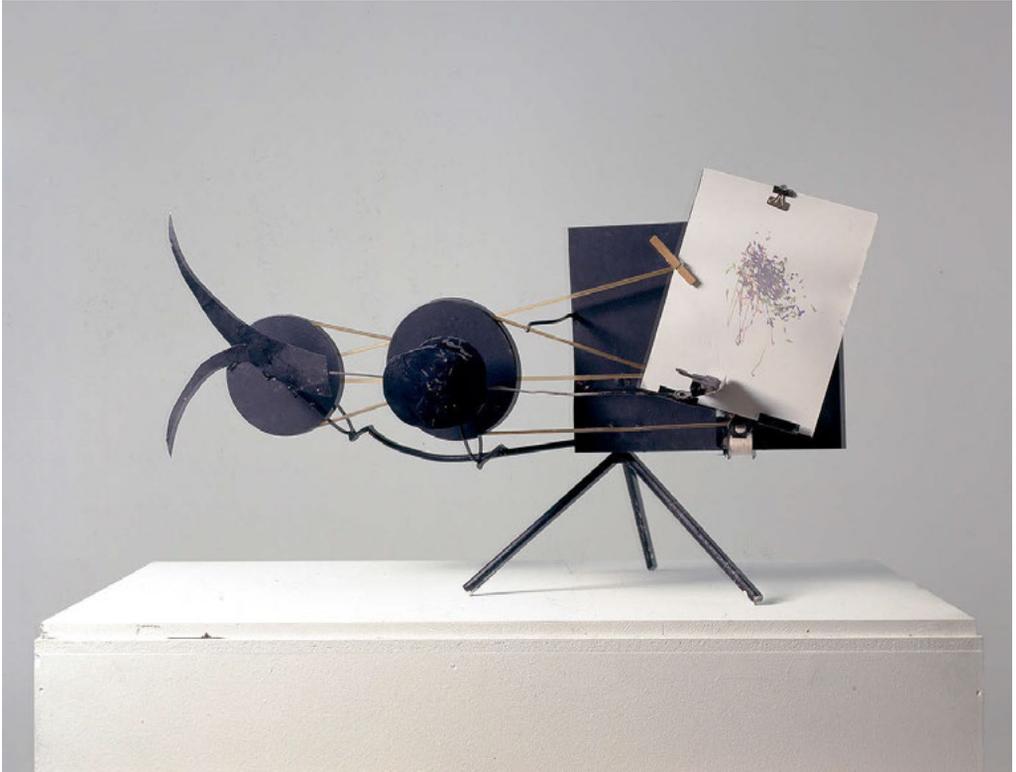


Fig. 8.6 — Jean-Tinguely, *Méta-Matic n° 6*, 1959 (source : <https://tageswoche.ch/gesellschaft/wie-aus-jeannot-wieder-der-kuenstler-tinguely-wird>).

l'avènement d'une véritable problématique *esthétique* de la maintenance. Lorsqu'elle est comprise comme une étape distincte de la production, la maintenance d'une œuvre ne constitue pas, à proprement parler, un enjeu pour son concepteur : elle est perçue comme une pure opération technique, liée à la nécessité d'« entretenir » l'œuvre. Au-delà de la volonté, le plus souvent bien réelle, de concevoir une œuvre « fiable » techniquement<sup>22</sup>, le concepteur ne se préoccupe usuellement de cette forme de maintenance qu'à travers la réalisation d'une « fiche de maintenance » à destination du personnel du lieu d'exposition, précisant les opérations à réaliser pour « faire fonctionner » l'œuvre. Mais, lorsque l'activité d'une œuvre s'avère tributaire d'*interactions* réalisées par un ensemble d'agents autonomes et susceptibles, notamment, d'impliquer le public, la question de « maintenir l'œuvre en fonctionnement » ne peut s'abor-

---

en découlent (*ce qui est produit*) » (Sophie Fétro, *Design ex machina!*, livret d'exposition (Paris, galerie Michel Journiac, 29 septembre – 23 octobre 2015), 2015, p. 1, italiques dans le texte).

22. Sauf, bien entendu, si la destruction de l'œuvre se trouve elle-même intégrée au propos artistique : nous pouvons ici penser, par exemple, à la machine « auto-destructrice » de Jean Tinguely, *Homage to New York* (1960).



Fig. 8.7 — Roxy Paine, *SCUMAK n° 2*, 2000 (source : <http://roxypaine.com/machines>).

der sous un angle purement technique : il ne s'agit en effet pas simplement, dans ce contexte, d'entretenir le fonctionnement mécanique ou électronique de l'œuvre, mais de maintenir un processus *interne* à l'œuvre — une préoccupation qui, si elle peut impliquer des solutions techniques, relève avant tout d'un enjeu esthétique. Tel est précisément le cas des œuvres que nous avons qualifiées ici d'interactives. Pour s'assurer qu'une œuvre interactive « fonctionnera » bien, son concepteur n'a en effet d'autre choix que de se « projeter », depuis la phase de « production », dans le contexte de sa future maintenance *en exposition*. Brouillant les frontières entre les champs de la production et de la maintenance, les œuvres interactives conduisent ainsi les concepteurs à une prise en compte accrue des enjeux, esthétique et technique, relatif à la problématique de maintenir l'œuvre *en activité*. Comme nous le verrons par la suite, la conception d'une œuvre interactive, de ce fait, se comprend dès lors dans une large partie sous l'angle d'une *conception de processus de maintenance*.

### 8.3 Autopoïèse et auto-maintenance

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, la synthèse des enjeux posés, en pratique, par la question de la maintenance dans divers champs de la production numérique, s'interprète ainsi sous l'angle du critère de la *maintenance en activité* d'un système — une activité que nous pouvons interpréter, sur les plans esthétique et technique, comme l'exercice prolongé d'interactions entre un ensemble d'agents internes au système, autonomes mais responsables de son « fonctionnement » d'ensemble. Lorsqu'une œuvre, ou un édifice, cessent de se présenter sous la forme de structures stabilisées, mais remettent perpétuellement en jeu, dans le « temps-réel » de leurs usages, la production de structures matérielles (par l'intégration d'éléments « réactifs » ou la mise en œuvre de réelles situations de production d'artefacts), la maintenance ne saurait, de fait, être considérée comme une opération ancillaire, destinée à préserver l'« état de choses » arrêté par la production : elle décrit plutôt les conditions mêmes d'exercice de cette production, comprise, désormais, comme une production *maintenue* dans le « temps-réel » de l'usage. Le recouvrement des notions de production et d'usage annonce ainsi la maintenance comme une condition essentielle à la « vitalité » interne du système.

Cette notion de vitalité peut être directement mise en regard avec la conclusion à laquelle nous parvenions à la fin de la section 8.1, annonçant notre objectif d'une remise en cause d'une vision linéaire de la production par le passage d'une logique de stabilisation à une logique de maintenance. Cette opposition entre stabilisation et maintenance rappelle, en effet, la distinction établie par Simondon entre les schémas d'individuation physique et vitale. La maintenance renvoie ainsi directement à l'image d'un processus d'individuation *vitale*, évoluant d'état métastable en état métastable, là où l'idée de stabilisation se rapporte plutôt au schéma d'individuation *physique*, dans la mesure où celui-ci décrit précisément un processus de stabilisation énergétique : la trajectoire suivie par le système en cours d'individuation prend la forme d'une résolution unique et définitive de l'état métastable initial, actant la fin du processus productif.

Ces remarques suggèrent d'approfondir le rapprochement entre la problématique de la maintenance et les propriétés des systèmes vivants. Afin d'explorer cette intuition, nous nous intéresserons ici spécifiquement à la notion biologique d'*autopoïèse*, initialement introduite par Humberto Maturana et Francisco Varela dans leur ouvrage *De máquinas y seres vivos: Una caracterización de la organización biológica*<sup>23</sup>, publié en 1973, et présentée pour la première fois

---

23. Humberto R. Maturana et Francisco G. Varela, *De máquinas y seres vivos: Una caracterización de la organización biológica*, Santiago, Editorial Universitaria, 1973.

en langue anglaise dans l'article *Autopoiesis: The Organization of Living Systems, its Characterization and a Model*<sup>24</sup> (1974), suivi de l'ouvrage *Autopoiesis and Cognition*<sup>25</sup> (1980).

La notion d'autopoïèse mobilise en effet précisément la notion de maintenance afin de conceptualiser la *qualité constitutive* des organismes vivants. Pour Maturana et Varela, un organisme vivant constitue ainsi une « machine autopoïétique », définie de la manière suivante :

« a machine organized (defined as a unity) as a network of processes of production (transformation and destruction) of components which: (i) through their interactions and transformations continuously regenerate and realize the network of processes (relations) that produced them; and (ii) constitute it (the machine) as a concrete unity in space in which they (the components) exist by specifying the topological domain of its realization as such a network<sup>26</sup>. »

Il est intéressant de noter que Maturana et Varela se réfèrent à la notion de machine afin de décrire les qualités d'organismes vivants. En attendant de justifier ce choix plus en détails, ce que nous ferons dans la section 8.5, nous admettrons pour l'instant la possibilité de remplacer le terme « machine » par celui d'« organisme » dans la définition donnée ci-dessus. La théorie de l'autopoïèse se base en effet sur l'idée selon laquelle les organismes vivants peuvent être considérés comme des machines, ce que souligne le titre du premier chapitre consacré à l'autopoïèse dans l'ouvrage de Maturana et Varela : *On Machines, Living and Otherwise*<sup>27</sup>. La notion de machine, prise dans son sens général, joue donc ici un rôle central. Pour Maturana et Varela, les machines sont définies comme des *unités* (systèmes) constituées de *composants*. Ces composants prennent part à des processus internes d'interaction et de transformation, définis par des *relations* internes au système. Pour Maturana et Varela, ces relations constituent les propriétés constitutives de la machine : toute machine est définie fondamentalement en tant qu'unité par le réseau d'interactions et de transformations auquel participent ses composants, et non par la nature matérielle individuelle de ceux-ci.

---

24. Francisco G. Varela, Humberto R. Maturana et Ricardo Uribe, « Autopoiesis: The Organization of Living Systems, Its Characterization and a Model », *Biosystems*, vol. 5, n° 4, 1974, p. 187-196.

25. Humberto R. Maturana et Francisco J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Boston, D. Reidel Publishing Company, 1980.

26. *Ibid.*, p. 78-79.

27. *Ibid.*, p. 77-84.

Pour préciser cette distinction entre les propriétés constitutives de la machine en tant que système et les propriétés dérivées de sa réalisation matérielle (ou « concrète »), Maturana et Varela introduisent les notions d'*organisation* et de *structure*. L'organisation de la machine est constituée des *relations* entre ses composants, de la « dynamique des interactions et transformations<sup>28</sup> » internes que le système subit tout en restant lui-même. La structure renvoie quant à elle à la réalité concrète (matérielle) des composants qui, à un instant donné de la « vie » de la machine, réalisent cette organisation. En vertu de ces notions, la *définition* d'une machine nous apparaît donc comme le seul fait de son organisation, et non de sa structure : pour Maturana et Varela, la machine se comprend donc bien avant tout comme une « unité organisée ». Dans cette perspective, les auteurs précisent ainsi que, si la structure d'une machine peut évoluer au cours de son existence, son organisation doit rester invariante, sans quoi la machine serait remise en cause dans sa définition même. Cette propriété joue un rôle central dans le cas des machines *autopoïétiques*, c'est-à-dire vivantes.

Les machines autopoïétiques, dont la cellule biologique constitue, pour Maturana et Varela, l'exemple prototypique<sup>29</sup>, sont en effet concernées par des processus de renouvellement (remplacement) *internes* de leurs composants, autrement dit, de leur structure. Ce « renouvellement incessant de composants dans un contexte de perturbations continues, et de compensation de ces perturbations<sup>30</sup> » se traduit par le *maintien de l'organisation de la machine vivante* : à tout moment, la machine autopoïétique se maintient donc elle-même en tant qu'unité et, ce faisant, se maintient *en vie*. Cette remarque nous conduit à énoncer l'idée centrale de la théorie de l'autopoïèse. Pour Maturana et Varela, la spécificité de la machine vivante (ou autopoïétique) réside dans l'existence d'un couplage *interne et circulaire* entre organisation et structure, posant à la fois l'organisation comme condition de production de la structure, et la production de cette structure comme condition de maintenance de l'organisation. La machine autopoïétique est ainsi organisée de sorte à se maintenir *elle-même*, en produisant de manière interne des composants qui, à la fois, lui permettent de se réaliser « concrètement » (matériellement) dans l'espace, et régénèrent le « réseau de relations » constitutif de sa propre organisation, c'est-à-dire de son unité en tant que machine. La notion d'autopoïèse définit ainsi l'organisation spécifique au vivant comme un réseau de processus de *production* internes, orienté vers sa propre maintenance. Cette régénération interne des processus

---

28. *Ibid.*, p. 77. Notre traduction.

29. Francisco G. Varela, Humberto R. Maturana et Ricardo Uribe, « Autopoiesis: The Organization of Living Systems, Its Characterization and a Model », *op. cit.*, p. 188.

30. Humberto R. Maturana et Francisco J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, *op. cit.*, p. 79. Notre traduction.

productifs nécessaires à la vie de l'organisme justifie le terme d'« autopoïèse », désignant littéralement le fait de se « produire soi-même » (du grec *auto*, « soi-même », et *poiësis*, « production, création »).

Cette première introduction de la notion d'autopoïèse permet de préciser un aspect important de la pensée de Maturana et Varela. Notre discussion précédente a en effet introduit l'idée d'un rapport « hiérarchique » entre organisation et structure, précisant que seule l'organisation s'avèrait constitutive d'une machine donnée. En d'autres termes, il s'avère possible de *définir* une machine à partir de son organisation seule, indépendamment de la réalité matérielle de ses composants. Sur la base de critères purement organisationnels, nous pouvons ainsi identifier, abstraitement, des *types* de machines, auxquels pourront ensuite être rattachées des entités matérielles spécifiques. Cette perspective traduit, par exemple, le fait que notre compréhension de la notion de cellule eucaryote n'est pas liée à la réalité concrète d'une cellule particulière, mais rend compte de l'existence d'un « schéma » d'organisation commun à un ensemble de cellules, que nous pouvons, dès lors, définir comme eucaryotes. Cependant, cette relation hiérarchique entre organisation et structure ne se manifeste, au sens strict, que sur le plan de l'activité de *définition* opérée par un observateur « externe ». En se plaçant au niveau de l'*existence* concrète d'une machine autopoïétique particulière, les notions d'organisation et de structure se trouvent prises dans une relation circulaire, l'une ne pouvant véritablement exister sans l'autre.

Si la donnée de l'organisation permet bien, en effet, de définir le « type » d'une machine autopoïétique concrète, cette définition s'avère temporellement et conceptuellement secondaire par rapport à la constitution autopoïétique de cette machine par elle-même, dans une logique circulaire et émergente générant la structure à partir de l'organisation, et l'organisation à partir de la structure. L'organisation autopoïétique n'est en effet pas simplement « réalisée » dans une structure, mais se trouve, simultanément, « régénérée » par cette dernière : comme le soulignent Maturana et Varela, « une machine ne pourra être qualifiée d'autopoïétique que si les relations de production qui la définissent sont continûment régénérées par les composants issus de leur propre production<sup>31</sup> ». La notion d'autopoïèse est donc fondamentalement liée à la *matérialité* des processus de production, et ne dégrade donc pas le rôle de la structure par rapport à celui de l'organisation dans une logique essentialiste. Il serait donc faux de comprendre la notion de « réalisation » d'une organisation dans une structure, fréquemment utilisée par Maturana et Varela, comme traduisant l'idée selon laquelle l'organisation pré-existerait à la structure. Un organisme autopoïétique concret se produit *lui-même* en tant qu'organisation :

---

31. *Ibid.*, p. 79. Notre traduction.

il serait donc erroné de comprendre la notion de *réalisation* comme l'« instantiation » matérielle d'un « type » idéal, c'est-à-dire d'une organisation donnée *a priori*. Si l'organisation peut être érigée en type, c'est bien *a posteriori*, par l'action d'un observateur, une fois la « topologie » de l'organisme produite par le processus autopoïétique.

Un second point à préciser afin de clarifier les liens entre organisation et structure tient à la nature *processuelle* de l'organisation. L'organisation est en effet comprise par Maturana et Varela comme un réseau de *processus de production* : aussi, dans l'autopoïèse, la *maintenance* de l'organisation signifie la maintenance des processus productifs permettant à l'organisme de continuer à se constituer lui-même. La structure, quant à elle, ne peut être maintenue, car c'est justement dans la « consommation » des composants matériels de cette structure que certains des processus fondamentaux de l'organisme peuvent se régénérer. En traduisant le maintien des processus constituant le « réseau de production » de l'organisme, l'autopoïèse traduit donc la capacité de l'organisme à maintenir par lui-même la stabilité de son organisation, en « organisant » un renouvellement constant des composants matériels qui réalisent cette dernière. L'autopoïèse rend donc fondamentalement compte de la propriété d'*auto-maintenance* constitutive de l'organisation vivante.

Le concept d'autopoïèse nous permet donc de préciser notre compréhension de la notion de maintenance, et plus précisément les termes de son opposition à l'idée de stabilisation, introduite à la fin de la section 8.1. Comme nous l'avions alors noté, le passage de la stabilisation à la maintenance accompagne l'abandon d'une vision de la production définie par une articulation linéaire entre conception et fabrication, au profit de l'idée d'un régime d'interactions émergentes et maintenues au sein d'un réseau d'agents. En notant qu'un tel réseau correspond exactement à l'idée d'organisation introduite par Maturana et Varela, nous pouvons donc, tout d'abord, réinterpréter le passage de la stabilisation à la maintenance comme l'avènement d'une pensée de la production basée sur la notion d'*organisation*, plutôt que l'opposition hylémorphique entre forme et matière — une idée que nous avons déjà explorée dans la section 6.3, où nous défendions l'adoption d'une méthodologie pratique basée sur la disposition de « configurations d'agentivités » matérielles, autrement dit, sur la constitution d'organisations susceptibles de donner lieu à des interactions émergentes. La formalisation de la notion d'organisation apparaît donc comme le premier bénéfice apporté par notre discussion de la notion d'autopoïèse.

D'autre part, la théorie autopoïétique nous permet de proposer une conceptualisation de la notion de maintenance en tant que processus visant à assurer la *stabilité de l'organisation productive*. Cette compréhension de la maintenance déplace donc la question de la stabilisation plutôt qu'elle ne la supprime : si l'articulation linéaire entre conception et fabrication visait la sta-

bilisation *énergétique* du processus productif, autrement dit, la résolution définitive de ses tensions dans une structure matérielle, la maintenance, comprise au prisme de l'idée d'autopoïese, exprime l'idée d'une « stabilisation d'un état de tension », compris comme la condition principale de « vitalité » du système productif. Cette idée n'est pas contradictoire : elle renvoie directement à la théorie simondonienne de l'individuation *vitale*, décrivant la vie comme la maintenance renouvelée d'un état de tension énergétique, prenant la forme d'une série de transitions entre différents « paliers » métastables. De même que le processus d'individuation vitale d'un organisme donne lieu, au cours de chaque transition entre ces différents paliers, à la production de structures, un régime de production maintenue ne cherche pas à se stabiliser définitivement dans une production matérielle *unique* : le processus de stabilisation de relations productives dans lequel il se trouve engagé se doit, pour permettre la « régénération » de ces relations, de les réaliser continûment sous la forme d'une production renouvelée de structures.

Cohérente avec la théorie simondonienne de l'individuation, la notion d'autopoïese nous apporte ainsi un élément conceptuel supplémentaire, en établissant un lien de *causalité circulaire*<sup>32</sup> entre la production de structures matérielles et la régénération des conditions de tension énergétique permettant cette production. Comme nous l'avons noté plus haut, la théorie autopoïétique pose en effet, d'une part, l'organisation comme condition de production de la structure, et d'autre part la production de cette structure comme condition de maintenance de l'organisation : la production de structures se trouve donc prise dans le processus même de maintenance de l'organisation productive. Cette propriété s'avère fondamentale : l'autopoïese définit la maintenance comme un processus *interne* au système, comme une *auto*-maintenance. La circularité du lien entre organisation et structure matérielle signale ainsi que la maintenance de l'organisme ne peut s'effectuer « de l'extérieur » : dans la théorie autopoïétique, la maintenance n'est pas simplement comprise comme une « condition de survie » de l'organisme, mais devient constitutive de sa « formation » même en tant qu'unité vivante.

Ces remarques nous permettent, à présent, de formaliser notre objectif d'une transition vers un régime de production maintenue, en introduisant une

---

32. Cette notion de causalité circulaire témoigne bien entendu d'une influence des idées cybernétiques sur la théorie de l'autopoïese. Dans la cybernétique, le concept de rétroaction s'interprète directement en termes de causalité circulaire : la première conférence Macy était ainsi annoncée par le titre *Feedback Mechanisms and Circular Causal Systems in Biological and Social Systems*. Le terme « cybernétique » lui-même, proposé par Wiener en 1947, ne sera ajouté au titre des conférences qu'en 1949, sur une suggestion de Heinz von Foerster (Jean-Pierre Dupuy, *The Mechanization of the Mind: On the Origins of Cognitive Science*, Cambridge – Princeton, MIT Press – Princeton University Press, 2009, p. 72–73).

notion d'*auto-maintenance*, inspirée de notre discussion de la théorie autopoïétique. Nous désignerons donc, par l'idée l'auto-maintenance, la capacité d'un système à *assurer lui-même la stabilité de ses relations de production constitutives, en produisant continûment, et de manière interne, des structures matérielles qui, tout en s'offrant individuellement comme réalisations de ces relations, régénèrent dynamiquement les conditions de tension énergétique nécessaires à leur maintenance*<sup>33</sup>.

#### 8.4 Vers une conception de processus de maintenance

Après avoir précisé notre idée générale d'une production maintenue par l'introduction de la notion d'auto-maintenance, nous pouvons à présent examiner les conséquences *pratiques* du cadre conceptuel dont nous venons de nous doter. Il s'agira ici, d'une part, d'examiner les modalités d'implémentation concrète de la notion d'auto-maintenance dans le cadre de notre propre pratique, et de montrer, d'autre part, comment cette notion peut nous permettre, comme suggéré dans la section 8.2, de prendre en charge simultanément les dimensions *esthétique* et *technique* de la question générale de « la maintenance » dans les champs de l'art et du design. Le cadre conceptuel mis en place dans ce

---

33. La notion d'autopoïèse implique non seulement que l'opération productive interne du système régénère circulairement ses relations de production, mais également qu'elle produise la réalité matérielle du système *dans son ensemble* — un critère que nous ne retenons pas pour notre notion d'auto-maintenance, ce qui nous permet d'appliquer cette dernière à une classe de systèmes plus large que celle des systèmes autopoïétiques. Au sens strict, les systèmes que nous considérons se rapprochent de la catégorie des systèmes *allopoïétiques* — définis par Maturana et Varela comme des « systèmes mécaniques dont l'organisation est telle qu'ils ne produisent pas les composants et les processus les réalisant en tant qu'unité, c'est-à-dire, par conséquent, des systèmes mécaniques distincts du produit de leur propre opération » (Francisco G. Varela, Humberto R. Maturana et Ricardo Uribe, « Autopoiesis: The Organization of Living Systems, Its Characterization and a Model », *op. cit.*, p. 188, notre traduction). Une œuvre fondée sur le principe d'une production continue d'artefacts « en exposition » ne saurait ainsi, au sens strict, être considérée comme autopoïétique, car certains des « composants » matériels qui la définissent en tant qu'« unité » — les moyens de production eux-mêmes — ne sont pas produits en son sein. Par exemple, dans l'installation *SCUMAK* de Roxy Paine, la machine produisant les structures plastiques, représentant indéniablement un composant central de l'œuvre, n'est évidemment pas produite par l'œuvre elle-même de manière autopoïétique, mais résulte d'un travail réalisé préalablement « en atelier ». Cette remarque nous permet de souligner que la notion d'auto-maintenance ne saurait en aucun cas être considérée comme une *application* de la théorie autopoïétique, bien qu'elle soit directement inspirée par le cadre conceptuel de cette dernière; notre proposition doit par conséquent être envisagée comme une idée indépendante des travaux de Maturana et Varela. Notons enfin, incidemment, qu'une œuvre telle que *SCUMAK* ne saurait non plus être considérée comme purement allopoïétique, dans la mesure où les produits de ses opérations, c'est-à-dire les structures plastiques produites par la machine, se trouvent intégrées à son propre système, car exposées dans le « périmètre » de son unité en tant qu'œuvre.

chapitre ne saurait ainsi être considéré comme purement théorique, mais vise au contraire à s'articuler directement à des enjeux pratiques, d'ordre particulier (liées à nos propres expériences) et générique. Comme l'ont montré nos discussions précédentes, l'intégration des enjeux liés à « la maintenance » constitue aujourd'hui une direction d'investigation privilégiée pour la recherche par la pratique en art et en design : il y a donc à notre sens un intérêt à formaliser des notions qui, à l'instar de notre idée d'auto-maintenance, préservent une certaine généralité conceptuelle tout en s'avérant suffisamment concrètes pour pouvoir jouer un rôle *générateur* au sein d'une pratique donnée.

Contrairement au point de vue traitant les questions liées à la maintenance comme secondaires par rapport à la production, la notion d'auto-maintenance nous incite désormais à concevoir la maintenance comme une propriété *interne* et *constitutive* des systèmes de production que nous considérons dans cette thèse. Tout en rejoignant l'idée pratique d'une « maintenance en activité » de ces systèmes, opérée par la stabilisation de leurs relations productives, la notion d'auto-maintenance signale ainsi un changement de point de vue, par lequel la maintenance ne constitue plus un enjeu extérieur au système, mais devient désormais, par construction, constitutive de l'unité même de ce dernier : la maintenance cesse ainsi d'être un *problème* pour être réinvestie en tant que *problématique*. La maintenance ne renvoie donc plus à une action réalisée *sur* le système, mais à une « vitalité » interne du système, à une action menée *par le système sur lui-même* : la production de structures matérielles ne doit plus être « entretenue » de l'extérieur, mais s'entretient elle-même, les relations productives ne tendant plus vers la stabilisation définitive des tensions, mais vers leur régénération circulaire dans l'acte de production même.

Les implications de cette internalisation des enjeux liés à la maintenance sont doubles. Cette approche est susceptible, d'une part, d'enrichir le traitement des questions *techniques* liées à la maintenance : en dotant les systèmes d'une capacité à s'auto-maintenir, peut-on concevoir des dispositifs plus robustes, plus résilients ? Peut-on développer un rapport plus *organique* à la maintenance, substituant à l'idée d'« entretien » une capacité de restructuration émergente du système, désormais envisagé comme un « organisme » ? L'internalisation de la problématique de la maintenance se rapporte, d'autre part, à la question *esthétique*. Cette question est tout particulièrement sensible dans le cas des œuvres interactives impliquant le public, que nous traiterons dans la cinquième partie de cette thèse. La notion d'auto-maintenance annonce en effet, dans ce contexte, la possibilité d'une *intégration du public au processus de maintenance de l'œuvre*, ôtant dès lors toute connotation « accidentelle » à la maintenance pour en faire une *opération constitutive de l'expérience esthétique*, donnant lieu à une véritable *esthétique de la maintenance*. La notion d'auto-maintenance constitue donc, à notre sens, un point d'articulation privilégié des points de vue technique et esthétique sur la maintenance — une idée que

nous continuerons à développer au cours de notre discussion des deux principaux projets réalisés durant cette thèse, *Unspecified Clay* et *Manœuvres*.

D'un point de vue pratique, la notion d'auto-maintenance nous permet également de préciser les formes possible de *mise en œuvre* d'un scénario de production maintenue, identifié comme principale perspective de nos recherches dans la section 8.1. Cette précision peut être opérée en revenant sur l'image d'une production en « temps-réel », que nous avons utilisée pour introduire l'idée de maintenance (par contraste avec la notion de stabilisation) dans cette même section. Le premier point à souligner est que notre compréhension de la notion de temps-réel ne recouvre pas le scénario de modalités productives « littéralement » en temps-réel, contrastant ainsi avec des projets qui, à l'instar de l'Artisan Électronique du studio Unfold<sup>34</sup>, entendent mettre en place une notion d'action « directe » sur la matière dans le cadre d'un processus de production numérique. Contrairement à ce type de démarches, associées à la notion d'« artisanat numérique » (et dont les connotations « autographiques » s'avèrent, à notre sens, paradoxales au regard des conditions techniques mêmes de la production numérique<sup>35</sup>), notre approche reconnaît et affirme la nécessité d'une phase de *conception* dans le cadre de toute production d'un artefact par des moyens numériques. La notion d'auto-maintenance ambitionne plutôt de repenser le *domaine* de cette étape de conception : il s'agit ici de ne plus considérer le champ d'action de la conception comme une zone temporellement distincte de la fabrication, délimitée par la production de notations agissant comme un jeu de références stabilisées, immuables (que ces références soient ensuite fidèlement suivies ou remises en cause, comme dans un projet tel que *Gradient*), mais comme un domaine étendu dans le « temps-réel » même de la réalisation matérielle de l'artefact, doté d'une certaine porosité par rapport aux événements prenant place lors de cette réalisation. Ce point de vue n'implique donc pas que le concepteur *lui-même* puisse « continuer de concevoir » pendant

---

34. <http://unfold.be/pages/l-artisan-electronique> (consulté le 21 septembre 2017).

35. Comme nous le remarquons à la fin de la section 6.3, tout mode de production numérique se présentant comme « autographique » ne pourra se défaire de l'épaisseur des médiations techniques destinées à s'interposer, quoi qu'il arrive, entre la main de l'« artisan numérique » et la matière. Au sens strict, tout outil utilisé par un artisan peut certes être qualifié de médiation ; mais les médiations spécifiques aux processus de production numériques se distinguent en ce sens que leur propre développement implique une phase de *conception*. Un concepteur travaillant avec un logiciel, une interface gestuelle ou un langage de programmation peut ainsi être considéré, selon un certain point de vue, comme l'*utilisateur* d'un scénario productif envisagé par un concepteur de plus « haut niveau » (les concepteurs du logiciel, de l'interface ou du langage). Toute production numérique suppose ainsi, en ce sens, une phase de conception préalable, ce qui met à mal l'idée même d'une production numérique « autographique ». Nous reviendrons sur cette articulation entre les positions du concepteur et de l'utilisateur au cours de la dernière partie de notre exposé, où nous l'examinerons dans le contexte de régimes de production ouverts à la participation du public.

l'intégralité du processus productif, mais pose comme condition centrale que le « produit » de sa conception s'avère capable d'évoluer « au contact » de la phase de fabrication, dans une logique d'interaction réciproque et maintenue avec les agents qui s'y trouvent impliqués.

Tout en affirmant la pertinence de la conception dans toute compréhension de la production numérique (par rapport à l'idée d'un retour vers des formes de pratiques « autographiques »), notre approche entend ainsi opérer une transformation profonde des enjeux mêmes de la notion de conception : non plus comprise comme l'étape de stabilisation d'une notation référente, la conception vise désormais à spécifier un *processus* susceptible d'évolution et d'adaptation dans le déroulement de la fabrication même ; c'est en s'inscrivant dans les temporalités propres de cette étape de fabrication, et non en restant confiné à une étape de planification antérieure à toute forme de réalisation matérielle, que ce processus pourra contribuer en « temps-réel » à l'opération productive. Envisagée de la sorte, la conception se comprend ainsi, fondamentalement, comme une activité de *conception de processus de maintenance*, destinée à préparer les conditions d'une production émergente et renouvelée de structures matérielles.

Comme nous le verrons par la suite, ces nouveaux enjeux de conception nous conduiront préférentiellement à adopter, dans le cadre de nos expériences, des méthodes relevant de la *programmation* : nous réaliserons ainsi, au sens littéral et figuré, une *implémentation*<sup>36</sup> du programme énoncé par notre concept d'auto-maintenance, précisant notre idée générale d'une production maintenue. Il ne s'agira pas simplement, ici, de faire usage de la programmation pour générer des formes, ou développer, à l'instar de notre projet *Computational Ruins*, des solutions permettant le pilotage « personnalisé » de machines à commande numérique : nos programmes viseront en priorité à mettre en place des procédures établissant un lien de « causalité circulaire » entre la production de structures matérielles et la régénération des relations nécessaires à cette production, posant les conditions de réalisation d'une forme d'auto-maintenance. Comme nous le verrons notamment dans nos discussions des projets *Unspecified Clay* et *Manœuvres*, les processus de maintenance que nous développerons viseront ainsi à doter nos dispositifs de comportements *adaptatifs*, afin de leur permettre de s'« auto-maintenir » au sein d'une situation productive émergente, dont la trajectoire évolutive sera nécessairement inconnue au moment

---

36. Le verbe « implémenter » renvoie, au sens général, à l'action d'« effectuer l'ensemble des opérations qui permettent de définir un projet et de le réaliser » ([Anon.], « Implémenter », *Académie française*, 7 février 2013, en ligne : <http://www.academie-francaise.fr/implémenter>, consulté le 6 février 2017). En informatique, « implémenter » désigne plus spécifiquement le fait de traduire un algorithme dans un langage de programmation spécifique, pour le réaliser sous forme de programme.

de la conception de ces processus. Autrement dit, si nos programmes seront bien « écrits en avance<sup>37</sup> » au cours d'une phase de conception, leur comportement ne sera pas déterminé *a priori* mais prendra forme (et sens) dans le « temps-réel » de la fabrication.

Il est intéressant, à ce titre, de rappeler la différence introduite par Edgard Morin entre programme et stratégie : « [l]a stratégie se définit par opposition au programme. Un programme constitue une séquence d'actions prédéterminées, qui ne peut s'accomplir que dans un environnement comportant très peu d'aléas ou désordres. La stratégie, elle, se fonde sur un examen des conditions à la fois déterminées, aléatoires, incertaines dans lesquelles va s'engager l'action en vue d'une finalité donnée. Le programme ne peut se modifier, il ne peut que s'arrêter en cas d'imprévu ou danger. La stratégie, elle, peut modifier le scénario d'actions prévues, en fonction des informations arrivant en cours de route, inventer de nouveaux scénarios<sup>38</sup> ». Autrement dit, là où les programmes peuvent être considérés comme « écrits en avance », les stratégies sont « des conduites inventives se modifiant selon les aléas et modifications de la situation<sup>39</sup> ». Pour Edgard Morin, la capacité d'élaborer des stratégies constitue l'une des distinctions les plus fondamentales entre les machines vivantes et les machines artificielles ; néanmoins, il est clair que les programmes *adaptatifs* que nous envisageons ici de développer ne sauraient être totalement réduits à l'idée d'un comportement écrit à l'avance. Sans évidemment présenter les mêmes capacités d'invention que les « machines vivantes », de tels programmes tendent en effet, comme nous le verrons notamment à travers notre projet *Unspecified Clay*, à faire preuve d'une certaine aptitude *stratégique*, dans la mesure où ils s'avèrent capables d'infléchir le cours de leurs actions en fonction de la configuration réellement constatée — et non anticipée *a priori* — des événements. En ce sens, si nous envisageons ici de réaliser, par la programmation, l'objectif d'une conception de processus de maintenance, il convient de souligner que ces processus ne prendront pas la forme, dans leur fonctionnement, de « programmes » au sens rigide du terme : ils s'actualiseront plutôt en « temps-réel » sous la forme de *stratégies de maintenance*, en ajustant, à tout moment, leurs opérations à la situation productive à laquelle ils se trouveront confrontés.

La conception de programmes capables de dépasser la logique d'une exécution rigide, pour s'orienter vers le développement, en temps-réel, de véritables « stratégies de maintenance », adaptées aux conditions matérielles de la situation, suppose que l'activité de programmation intègre dès le départ les caractéristiques liées au « hardware » des dispositifs de production dont elle vise

---

37. Comme le rappelle Samuel Bianchini, programmer signifie en effet d'abord « écrire à l'avance » (Samuel Bianchini, « .exp : De l'expérimental à l'expérimentable », *op. cit.*, p. 286).

38. Edgard Morin, *Science avec conscience*, Paris, Seuil, 1990, p. 205.

39. *Ibid.*, p. 102.

à définir les comportements : notre approche implique donc, comme nous le verrons à nouveau dans *Unspecified Clay* et *Manœuvres*, que nous concevions simultanément le code et le dispositif même destiné à l'accueillir. La démarche pratique exposée ici s'inscrit en ce sens résolument dans la perspective d'une *recherche instrumentale*, déjà discutée au cours du chapitre 6 : il ne s'agit pas tant d'« écrire du code » que de rassembler un ensemble d'acteurs, relevant autant du software que du hardware, au sein d'une organisation constitutive *programmée*. En privilégiant une compréhension *performative* du code comme « agent de maintenance », indépendante de son inscription sous forme de symboles numériques, cette approche prépare dès lors la possibilité d'une compréhension *étendue* de la notion de programmation, incluant, notamment, la possibilité d'une « programmation matérielle » : le chapitre 12, consacré au projet *Manœuvres*, sera ainsi pour nous l'occasion d'examiner une première forme de mise en œuvre pratique de ce type d'approche.

## 8.5 Machines et organismes

Ayant précisé notre compréhension de la problématique de la maintenance, il nous semble à présent important de revenir sur l'idée d'un rapprochement entre les notions de machine et d'organisme — présente, entre autres, dans notre projet de développer des modes de production dotés d'une forme de « vitalité » interne, et dans la théorie autopoïétique de Maturana et Varela, vers laquelle nous nous sommes tournés dans ce contexte. Nous allons ici explorer cette idée en nous intéressant à la cybernétique, une référence que nous serons amenés à mobiliser fréquemment dans la suite de notre propos.

Dans son acception classique, la cybernétique peut se définir, selon la célèbre formule introduite par Norbert Wiener dans son ouvrage *Cybernetics*, publié en 1948<sup>40</sup>, comme la science du « contrôle et de la communication dans l'animal et la machine ». Plus précisément, le livre de Norbert Wiener décrit la cybernétique comme la science étudiant les mécanismes de rétroaction (*feedback*) au sein de systèmes artificiels ou vivants, dans l'optique de découvrir des principes universels<sup>41</sup>. Héritée des dispositifs de contrôle électroniques, la no-

---

40. Nous renvoyons ici à la réédition parue en 1961 : Norbert Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Cambridge, MIT Press, 1961.

41. Le terme « cybernétique » provient du grec *kubernêtikê* (art de piloter, de gouverner), produisant également en français le mot « gouvernail » ([Anon.], « Cybernétique », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/cybernetique>, consulté le 1er février 2017). Selon Norbert Wiener, le choix du terme « cybernétique » est motivé par le fait que les gouvernails constituent « l'une des premières et meilleures formes de mécanismes de rétroaction » (Norbert Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, *op. cit.*, p. 12, notre traduction). L'anglais *governor*, emprunté au français « gouverneur » (littéralement : celui qui tient le gouvernail), joue également un rôle

tion de rétroaction signale initialement la capacité d'un système à renvoyer à ses flux d'entrée une information concernant l'écart entre ses objectifs et son état actuel, de façon à ajuster son action en conséquence<sup>42</sup>. La cybernétique se préoccupe plus précisément d'une rétroaction dite *négative*, visant à aligner de manière stable l'état du système sur le but à atteindre<sup>43</sup> : au cours de la Seconde Guerre Mondiale, cette forme de rétroaction est ainsi mise à profit pour développer des dispositifs de défense aérienne automatiques, capables d'ajuster continûment leur direction de tir à la position de la cible ; Norbert Wiener prendra lui-même part à ces recherches.

La naissance de la cybernétique à proprement parler est généralement associée à la publication, en 1943, d'un article de Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener et Julian Bigelow<sup>44</sup>, exploitant la notion de rétroaction pour expliquer les mécanismes nerveux impliqués dans l'activité motrice intentionnelle<sup>45</sup>. Tout en conservant une définition proche de son acception technique originale, le concept de rétroaction est ici posé pour la première fois comme un principe général, susceptible de s'appliquer indifféremment à des systèmes vivants ou artificiels : « les comportements de certaines machines et certaines réactions d'organismes vivants impliquent un mécanisme de rétroaction continu de la cible, qui modifie et oriente l'objet réalisant l'action<sup>46</sup> ». La cybernétique se constitue donc dès le départ comme un champ de recherche interdiscipli-

---

central dans le choix de Norbert Wiener. En anglais, *governor* peut en effet s'employer afin de signifier « [u]n dispositif destiné à réguler la vitesse d'une machine ou d'un véhicule en restreignant automatiquement le flux d'eau, d'air, de carburant, etc., lorsque la vitesse augmente, et en augmentant ce flux dans le cas contraire » ([Anon.], « Governor », *Oxford English Dictionary*, en ligne : <http://www.oed.com/view/Entry/80323>, consulté le 20 février 2017, notre traduction). Un tel dispositif, que nous qualifierions en français de « régulateur », constitue un exemple typique des mécanismes de rétroaction étudiés par la cybernétique : Wiener attribue ainsi un rôle précurseur à un article consacré en 1868 à ces questions par le physicien Maxwell (James Clerk Maxwell, « On Governors », *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 16, 1867, p. 270–283). Le terme « cybernétique » lui-même n'a cependant pas été introduit par Norbert Wiener, mais par André Ampère en 1834, qui l'emploie pour désigner « l'étude des moyens de gouvernement » ([Anon.], « Cybernétique », *op. cit.*).

42. Norbert Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, *op. cit.*, p. 6.

43. Par contraste, une rétroaction dite positive, *renforçant* le signal d'entrée, conduit généralement à un comportement instable, souvent exprimé sous forme d'oscillations. L'exemple le plus célèbre de rétroaction positive est sans doute l'effet *larsen*, obtenu lorsque le récepteur d'un circuit audio (comme un microphone) capte une portion suffisante du signal diffusé par l'émetteur (par exemple, un haut-parleur). Incidemment, l'effet larsen est couramment désigné en anglais par le terme générique de *feedback*, ce qui ignore la différence entre rétroaction positive et négative.

44. Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener et Julian Bigelow, « Behavior, purpose and teleology », *Philosophy of science*, vol. 10, n° 1, 1943, p. 18–24.

45. *Ibid.*, p. 20.

46. *Ibid.*, p. 20. Notre traduction.

naire, défini, avant même l'idée de rétroaction, par la volonté d'établir des *analogies* entre les organismes vivants et les machines.

La nature profondément interdisciplinaire de la cybernétique est tout particulièrement illustrée par la composition des fameuses conférences Macy, organisées de 1946 à 1953 à New York par Frank Fremont-Smith pour le compte de la Josiah Macy Foundation. Présidées par le neurophysiologiste Warren S. McCulloch, les conférences Macy réunissent des personnalités issues de champs aussi divers que les mathématiques et l'électronique (Norbert Wiener, Claude Shannon), l'anthropologie (Gregory Bateson, Margaret Mead), la physiologie (Arturo Rosenblueth), la logique (Walter Pitts), la psychiatrie (W. Ross Ashby) et l'informatique (John von Neumann, Julian Bigelow). Les actes de ces conférences, récemment réédités<sup>47</sup>, ont initialement été publiés à partir de 1949 sous la direction d'Heinz von Foerster. Privilégiant un mode d'échange informel, les conférences Macy sont l'occasion de préciser certains concepts clés de la cybernétiques, en les confrontant et en les appliquant aux problématiques spécifiques de différents domaines de recherche. Outre la notion de rétroaction, deux autres concepts centraux de la cybernétique méritent ici d'être présentés : ceux de *boîte noire* et d'*information*.

Dans l'approche cybernétique, la notion de « boîte noire » (*black box*) renvoie à un système étudié uniquement par l'intermédiaire de ses entrées et sorties, et dont le détail de la structure interne n'est pas connu. Formalisé notamment dans l'ouvrage publié par 1948 par Norbert Wiener<sup>48</sup>, le concept de boîte noire est introduit dès les premières lignes de l'article *Behavior, Purpose and Teleology* de Rosenblueth, Wiener et Bigelow. Dans cet article, les auteurs commencent en effet par définir une approche d'étude des phénomènes naturels qu'ils qualifient de « comportementaliste » (*behaviorist*), et opposent à une analyse « fonctionnelle ». L'approche comportementaliste « consiste en l'examen de la sortie de l'objet et des relations de cette sortie sur l'entrée<sup>49</sup> » ; comme les auteurs le notent ensuite, cette définition « omet la structure spécifique et l'organisation intrinsèque de l'objet<sup>50,51</sup> ». Par opposition à l'approche

---

47. Claus Pias (dir.), *Cybernetics: The Macy Conferences 1946–1953*, Chicago, Chicago University Press, 2016.

48. « J'entends par boîte noire un dispositif, tel qu'un réseau quadripôle doté de deux entrées et de deux sorties, qui réalise une opération bien définie sur les états présent et passé du potentiel d'entrée, mais dont la structure opératoire ne nous est pas nécessairement connue » (Norbert Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, *op. cit.*, p. 1, notre traduction).

49. Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener et Julian Bigelow, « Behavior, purpose and teleology », *op. cit.*, p. 18. Notre traduction.

50. *Ibid.*, p. 18. Notre traduction.

51. Les auteurs semblent ici établir une distinction entre structure et organisation, rappelant la position développée plus tard par Maturana et Varela.

fonctionnelle, cherchant à déterminer le fonctionnement « interne » du système étudié, l'approche comportementaliste adopte un point de vue *externe*, dans lequel nous retrouvons les bases du concept de boîte noire : elle se fonde en effet sur une « mise entre parenthèses » (*bracketing*) de l'organisation et de la structure du système pour se concentrer sur son « comportement », défini comme « tout modification d'un objet détectable de manière externe<sup>52</sup> » par la mesure de ses entrées et sorties.

Pour Rosenblueth, Wiener et Bigelow, l'approche comportementaliste constitue une méthode d'analyse universelle, « applicable tant aux machines qu'aux organismes vivants, indépendamment de la complexité de leur comportement<sup>53</sup> ». Introduit dans ce contexte, le concept de boîte noire rend donc compte de l'ambition unificatrice de la cybernétique, fondée sur une « approche réductionniste de la complexité<sup>54</sup> ». Les représentations diagrammatiques permises par les notions de boîte noire et de rétroaction, où les flux d'entrée / sortie entre différents sous-systèmes sont représentés de manière analogue aux connections d'un circuit électronique (figure 8.8), témoignent de la volonté d'adopter un formalisme commun pour la modélisation des systèmes artificiels et vivants, inspiré de l'ingénierie. Cependant, ce formalisme ne saurait à lui seul expliquer le succès de l'analogie cybernétique entre machines et organismes. Les notions de boîte noire et de rétroaction étaient en effet déjà en usage dans le champ de l'ingénierie depuis plusieurs années, sans être pour autant perçues comme les bases potentielles d'une compréhension unifiée du vivant et de l'artificiel : comme nous l'avons déjà noté, la notion de rétroaction était connue depuis le développement des premiers dispositifs de contrôle automatique au cours du XIX<sup>e</sup> siècle (comme ceux de certains navires) ; quant à la notion de boîte noire, W. Ross Ashby attribue son origine au domaine de l'ingénierie électrique<sup>55</sup>. Ces notions n'accéderont de fait à l'universalité caractéristique de l'approche cybernétique qu'en se mêlant de manière décisive à un troisième concept fondamental, celui d'*information*.

La cybernétique est en effet contemporaine des premières théories mathématiques de l'information, dont la plus célèbre est proposée par Claude Shannon en 1948<sup>56</sup>. Développée dans le cadre de recherches menées aux Bell Laboratories, la théorie proposée par Claude Shannon est directement appliquée à la problématique de la transmission de messages à travers des canaux de

52. *Ibid.*, p. 18. Notre traduction.

53. *Ibid.*, p. 22. Notre traduction.

54. Antoine Picon, *Culture numérique et architecture : Une introduction*, Bâle, Birkhäuser, 2010, p. 28.

55. W. Ross Ashby, *An Introduction to Cybernetics*, Londres, Chapman & Hall, 1956, p. 86.

56. Claude Shannon, « A Mathematical Theory of Communication », *Bell System Technical Journal*, vol. 27, 1948, p. 379-423, 623-656.

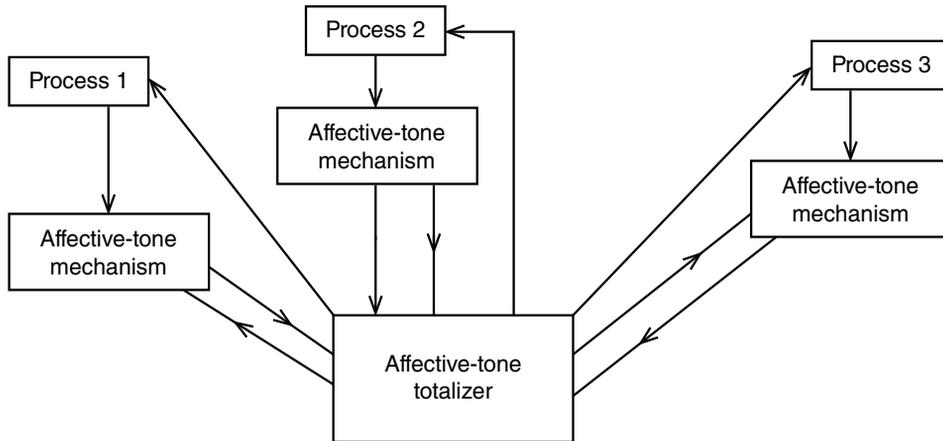


Fig. 8.8 — Diagramme cybernétique d'un processus de rétroaction impliqué dans le mécanisme du réflexe conditionnel chez l'animal (source : Norbert Wiener, *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Cambridge, MIT Press, 1961, adaptation de la figure 7, p. 128).

communication électroniques. Shannon fait le choix d'une construction purement statistique de l'information, laissant de côté toute référence sémantique afin d'obtenir une quantité extensive, possédant la même signification indépendamment de tout contexte<sup>57</sup>. Dans l'approche de Shannon, l'information est en réalité associée à la *source* d'émission d'un message, modélisée par une variable aléatoire dont les différentes valeurs représentent l'ensemble des messages transmissibles. L'information associée à la source (ou « entropie<sup>58</sup> ») se calcule alors à partir des seules *probabilités* de transmission de ces messages, indépendamment de leur valeur sémantique intrinsèque : pour un jeu de  $n$  messages potentiels de probabilités respectives  $p_i$ , l'information de la source se calcule alors selon la formule :

57. N. Katherine Hayes, *How We Became Posthuman: Virtual Bodies in Cybernetics, Literature, and Informatics*, Chicago, University of Chicago Press, 1999, p. 53.

58. Le rapprochement entre la notion d'information et celle d'entropie, issue de la physique, est initialement proposé par Shannon à partir du constat d'une similarité mathématique formelle entre sa définition et certaines formalisations statistiques de la thermodynamique (Claude Shannon, « A Mathematical Theory of Communication », *op. cit.*, p. 19). Ce rapprochement semble essentiellement faire figure de constat, et Shannon n'en propose pas d'autre interprétation que l'idée selon laquelle sa notion d'information représente l'*incertitude* associée à un message. Selon Pieter Adriaans, l'interprétation exacte du lien formel entre les définitions mathématiques de l'information et de l'entropie continue aujourd'hui de faire l'objet de controverses (Pieter Adriaans, « Information », *op. cit.*).

$$H = -K \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i,$$

où  $K$  représente une constante positive<sup>59</sup>. Quantité positive,  $H$  peut être interprétée comme une mesure de l'incertitude liée à la source : plus l'information d'une source est élevée, et plus l'incertitude sur le message que cette dernière est susceptible de transmettre sera grande. Même si, par sa nature non sémantique, l'information de Shannon s'avère distincte des compréhensions usuelles du concept d'information, cette interprétation correspond à une propriété intuitive : l'information potentiellement apportée par un message pourra être considérée comme d'autant plus importante que sa réception possède un caractère incertain. Une source émettant systématiquement le même message, avec une probabilité 1, sera ainsi associée à une information nulle, ce qui correspond en un sens à l'idée qu'une telle source, par sa nature entièrement prévisible, serait dotée d'un caractère « non informatif<sup>60</sup> ».

Cette définition non sémantique de l'information va jouer un rôle instrumental dans la construction des analogies cybernétiques entre systèmes artificiels et vivants. Suite au traitement mathématique proposé par Shannon, le concept d'information s'offre en effet à la cybernétique comme une quantité *universelle*, car non sémantique et dématérialisée (le traitement probabiliste proposé par Claude Shannon rend l'information indépendante du médium qui la transporte), constituant le candidat idéal pour une modélisation unifiée des flux d'entrée / sortie et de rétroaction dans l'animal et la machine : les représentations graphiques de ces flux sont d'ailleurs aujourd'hui connus sous le nom de « diagramme de flux de données » (*data flow diagrams*). Si la cybernétique n'a pas inventé les concepts de boîte noire et de rétroaction, elle est ainsi la première à les avoir interprétés en termes de processus de traitement et d'échange d'information : la notion d'information fournit donc en ce sens, comme noté plus haut, le lien manquant à une modélisation conjointe des organismes et des machines. L'investissement cybernétique de la notion d'information dépasse cependant la simple question de la modélisation : pour la plupart des cybernéticiens, l'information n'est pas perçue comme une abstraction venant « mettre entre parenthèses » la réalité de processus vivants ou artificiels complexes, à la manière de la notion de boîte noire, mais se trouve rapidement considérée comme la « substance » *objectivement échangée et transformée* par ces processus.

59. Claude Shannon, « A Mathematical Theory of Communication », *op. cit.*, p. 19.

60. Soulignons également que pour un nombre  $n$  de messages donné,  $H$  est maximale lorsque les probabilités  $p_i$  sont toutes égales. Ceci correspond de fait intuitivement, comme le note Shannon, à la situation la plus incertaine : il est donc cohérent que  $H$ , en tant que mesure de l'incertitude liée à la source, prenne alors sa valeur la plus élevée (*Ibid.*, p. 20).

En dépit des objections soulevées par Shannon lui-même face à l'application de sa théorie à d'autres contextes que celui de l'analyse des communications électroniques<sup>61</sup>, l'information se trouve donc rapidement érigée en clé de voûte du réseau d'analogies entre organismes et machines, renforçant les ambitions conceptuelles de la cybernétique. À partir du moment où l'information cesse d'être perçue comme une construction mathématique et devient une réalité objective, le modèle cybernétique lui-même quitte en effet le statut de simple abstraction utile à l'ingénieur, et contribue à la *construction* d'une vision de l'organisme comme machine cybernétique. L'objectivation de la notion d'information contribue donc à un processus conduisant à l'*identification* des organismes à leurs modèles artificiels<sup>62</sup>, dans une logique que N. Katherine Hayles qualifie de « revers platonicien » (*Platonic backhand*), désignant par là l'opération par laquelle une « abstraction simplificatrice », inférée à partir de la « multiplicité bruyante du monde », est posée comme la « forme originaire de cette multiplicité<sup>63</sup> ».

Ces remarques nous permettent dès lors de mieux saisir l'impact conceptuel du « principe d'analogie » cybernétique entre organismes et machines. Pour Evelyn Fox Keller, la cybernétique n'établit en effet pas tant une analogie qu'une *homologie*<sup>64</sup> entre le vivant et l'artificiel : pour les cybernéticiens, « les organismes étaient résolument des machines, et au moins certaines machines pouvaient être considérées comme des organismes<sup>65</sup> ». Le point de vue cybernétique induit donc une transformation *simultanée* des notions de machine et d'organisme : il ne se traduit pas seulement par une identification des organismes aux machines — une position théorique s'inscrivant, en soi, en filiation directe avec la thèse mécaniste de l'« animal-machine » de Descartes<sup>66</sup> —, mais par l'*invention* d'une nouvelle vision de la machine, dont les propriétés se rapprochent désormais du vivant. Ces deux mouvements théoriques se renforcent mutuellement : la cybernétique et la biologie se trouvent ainsi engagées, dès

---

61. N. Katherine Hayles, *How We Became Posthuman: Virtual Bodies in Cybernetics, Literature, and Informatics*, op. cit., p. 54.

62. *Ibid.*, p. 57.

63. *Ibid.*, p. 12. Notre traduction.

64. Si deux éléments analogues peuvent être « comparés sous certains rapports » ([Anon.], « Analogue », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/analogue>, consulté le 21 avril 2017), l'homologie désigne plus précisément une « correspondance de place, de forme, de fonction » ([Anon.], « Homologue », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/homologue>, consulté le 21 avril 2017).

65. Evelyn Fox Keller, « Organisms, Machines, and Thunderstorms: A History of Self-Organization, Part One », *Historical Studies in the Natural Sciences*, vol. 38, n° 1, 2008, p. 47. Notre traduction.

66. René Descartes, « Discours de la Méthode (5<sup>e</sup> partie) », dans *Descartes: Œuvres et lettres*, Paris, La Pléiade, 1953, p. 164–165.

le départ, dans un processus d'influence circulaire, dans lequel tout transfert de notions d'une discipline vers l'autre devient susceptible de provoquer, par retour d'influence, une réévaluation de ces notions dans le champ de leur discipline d'origine. Dès lors, le vivant ne s'est pas tant trouvé « mécanisé » par la cybernétique qu'il n'a contribué, dans un processus d'échange disciplinaire entre cybernétique et biologie, à l'émergence d'une nouvelle vision mécaniste redéfinissant les contours du vivant et de la machine. C'est notamment à la lueur de cette nouvelle vision mécaniste du vivant que Maturana et Varela peuvent, en 1972, adopter une position théorique fondée sur l'identification des organismes aux machines<sup>67</sup>.

---

67. S'il n'est pas question d'examiner en détails le contexte historique de la genèse de la notion d'autopoïèse, nous pouvons cependant souligner ici l'influence majeure exercée par les idées cybernétiques sur les travaux de Maturana et Varela. Une figure particulièrement importante, à ce titre, est celle d'Heinz von Foerster, dont le Biological Computer Laboratory, hébergé à l'université de l'Illinois, a accueilli à plusieurs reprises Maturana et Varela entre 1968 et 1970 (Francisco J. Varela, « The Early Days of Autopoiesis: Heinz and Chile », *Systems Research*, vol. 13, n° 3, 1996, p. 411). Une dizaine d'année avant ces visites, Maturana avait par ailleurs travaillé avec plusieurs figures centrales de la cybernétique (Warren S. McCulloch, Walter Pitts, Jerry Lettvin) sur une expérience relative au système visuel de la grenouille, publiée dans un article devenu, depuis, un classique de l'épistémologie constructiviste (Jerome Y. Lettvin, Humberto R. Maturana, Warren S. McCulloch et Walter H. Pitts, « What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain », *Proceedings of the Institute for Radio Engineers*, vol. 47, n° 11, 1959, p. 1940–1951).



## Chapitre 9

# *Unspecified Clay* : production rétroactive

### 9.1 Objectif et contexte de la recherche

*Unspecified Clay* est un projet de recherche actif depuis février 2016, que nous menons en collaboration avec le groupe Co-de-iT<sup>1</sup>. Fondé en 2009 par les architectes et chercheurs Alessio Erioli, Davide del Giudice et Andrea Graziano, Co-de-iT (Computational Design Italy) explore l'impact des pratiques computationnelles dans les champs de l'architecture, de l'ingénierie, du design et de l'artisanat, à travers une série d'activités de recherche, de création et d'enseignement. Au cours des dernières années, les actions réalisées par Co-de-iT ont par exemple pris la forme de missions de conseil et de développement de produits pour le secteur privé, d'interventions au sein d'ateliers et de formations, ou encore d'initiatives de développement de ressources logicielles, le plus distribuées diffusées selon des licences open source<sup>2</sup>. Le groupe poursuit par ailleurs ses propres intérêts de recherche à travers le développement de projets mobilisant des acteurs universitaires, industriels, ou issus des secteurs créatifs et de l'économie numérique. C'est dans le cadre de l'un de ces projets, inFORMed matter, que s'est développée notre collaboration.

Démarré en 2014, inFORMed matter s'organise autour d'une série d'expérimentations de production numérique, visant à questionner les hiérarchies traditionnelles entre conception et fabrication. Basées sur des matériaux comme les polymères thermoplastiques ou l'argile, ces expérimentations se caractérisent, dans leur ensemble, par leur volonté de ménager une large place à l'expression de comportements matériels émergents au moment de l'étape de fabrication. Elles cherchent ainsi à développer une vision de l'*in*-formation, c'est-à-dire de la prise de forme, dépassant l'idée d'une simple « matérialisation » de propriétés géométriques définies à l'avance : il s'agit désormais d'envisager la prise de forme comme un processus dynamique, résultant d'une rencontre entre les comportements de l'outil de fabrication, du code opérant son pilotage, et du matériau. Dans un texte de présentation consacré aux développements du projet liés à l'argile, l'équipe note ainsi :

---

1. <http://www.co-de-it.com> (consulté le 10 mai 2017).

2. Outre le site Internet du groupe, ces ressources sont notamment accessibles à l'adresse : <https://github.com/Co-de-iT> (consulté le 10 mai 2017).

« Our goal is to go beyond the current “replicational” state of prototyping (where physical prototypes are clones of their digital counterpart), by coding and embedding additional levels of information aimed at mapping and/or defining material features and behaviors as well as different deployment patterns from which physical and aesthetic properties arise<sup>3</sup>. »

Cette idée d'un dépassement d'une vision « répliqueuse » de la fabrication résonne bien évidemment avec l'approche que nous avons suivie dans cette thèse : c'est de fait tout d'abord au cours de nos recherches bibliographiques que nous avons pu prendre connaissance du projet inFORMed matter. Constatant la proximité entre nos propres recherches et les intérêts poursuivis par Co-de-iT, nous avons contacté puis rencontré Alessio Erioli et Andrea Graziano en février 2016, afin d'envisager la possibilité d'une collaboration prenant pour objet l'expérimentation d'un procédé de production de structures en céramique, par déposition robotique d'argile. Notre proposition de recherche, formulée suite à cette première rencontre, a donné lieu au projet *Unspecified Clay*, sur lequel nous avons travaillé lors de trois sessions expérimentales, organisées en juillet 2016, octobre 2016 et janvier 2017.

Ces expérimentations pratiques, au cours desquelles nous avons eu l'opportunité de collaborer avec Andrea Graziano, Bruno Demasi (artiste et artisan céramiste), Stefano Paradiso (architecte et coordinateur du FabLab Torino), Marco Palma (architecte) et Marco Caprani (architecte), se sont déroulées au FabLab Torino, un lieu central dans l'articulation du projet de recherche inFORMed matter. Premier FabLab fondé en Italie, le FabLab Torino développe en effet un partenariat étroit avec Co-de-iT depuis la formation en 2015 de digifabTURINg, une structure visant à explorer l'utilisation de technologies de robotique industrielle dans les champs de l'art, de l'architecture et du design. Cette structure regroupe d'autres entités, telles que ToolBox Coworking<sup>4</sup> (un espace de travail collaboratif installé dans une ancienne fonderie, et fournissant ses locaux au FabLab Torino), Officine Innesto (une entreprise développant des projets éducatifs et de recherche autour de la carte programmable Arduino), et la société d'automation industrielle COMAU<sup>5</sup>. En termes matériels, la constitution de la structure digifabTURINg s'est notamment concrétisée par l'installation pérenne d'un bras robotisé à six axes, prêté par la société CO-

---

3. Alessio Erioli, Andrea Graziano, Bruno Demasi, Stefano Paradiso, Tommaso Casucci et Michele Semeghini, « inFORMed clay matter », vidéo présentée lors de la conférence Rob|Arch 2016: Robotic fabrication in architecture, art and design, 2016, en ligne : <https://vimeo.com/158804664> (consulté le 10 mai 2017).

4. <http://www.toolboxoffice.it> (consulté le 10 mai 2017).

5. <http://www.comau.com> (consulté le 10 mai 2017).

MAU, dans les locaux partagés du FabLab Torino et de Toolbox coworking. Notre collaboration avec Co-de-iT a ainsi bénéficié des possibilités offertes par ce bras robotisé, ainsi que des développements technologiques précédemment réalisés par l'équipe de digifabTURING, tout en recevant le soutien de notre propre laboratoire de rattachement, EnsadLab.

Le projet *Unspecified Clay* visait à explorer une situation de production numérique « rétroactive », comprise comme une alternance d'étapes d'extrusion d'argile et d'adaptation en « temps-réel » des instructions de contrôle du robot aux structures matérielles ainsi déposées. Tout en se basant sur l'expertise technique précédemment acquise par le groupe digifabTURING, relative à la production de structures d'argile par fabrication additive, le projet se proposait ainsi d'explorer de nouvelles approches computationnelles (numérisation 3D, vision par ordinateur. . .) afin d'instaurer un processus d'interaction *réciproque* entre les comportements du code, du robot et du matériau, donnant lieu à une production émergente d'artefacts matériels.

La figure 9.1 présente le dispositif utilisé au cours de nos expériences. Le bras robotisé COMAU est équipé d'un extrudeur d'argile personnalisé, conçu par l'équipe de digifabTURING. Fixé sur l'arrière de cet extrudeur, un axe en aluminium porte un capteur 3D Kinect<sup>6</sup>, installé de manière déportée par rapport à la zone d'extrusion. Le processus de production de chaque pièce en argile consiste en une succession d'étapes de déposition de matière, de numérisation du nouvel état des structures matérielles déposées (résultant de l'accumulation de l'ensemble des dépositions antérieures), et de génération des instructions suivantes de contrôle du robot à partir des données ainsi collectées. Au terme de l'étape de déposition, visible sur la figure 9.1, le robot se positionne dans une posture d'« acquisition », plaçant le capteur Kinect en position zénithale par rapport à la zone de travail (figure 9.2). Une représentation 3D de la scène numérisée est ensuite construite sous la forme d'un « nuage de points<sup>7</sup> » (*point cloud*), et affichée sur un logiciel personnalisé (figure 9.3). De nouvelles trajectoires sont ensuite calculées à partir de cette représentation, permettant de procéder à une nouvelle étape de déposition : la figure 9.4

---

6. Commercialisé par Microsoft à partir de 2010, le capteur Kinect est un dispositif de numérisation 3D initialement conçu pour la console de jeu Xbox 360. Nous détaillons dans la section 9.3 le fonctionnement de sa fonction de numérisation, basée sur le flux d'une caméra infrarouge et permettant d'obtenir une représentation tridimensionnelle d'une scène. Le capteur Kinect embarque également une caméra vidéo couleur ainsi que plusieurs microphones.

7. En imagerie 3D, un nuage de points est une représentation d'une scène tridimensionnelle constituée d'un ensemble plus ou moins dense de points placés dans l'espace, fournissant une représentation discontinue des volumes. Les coordonnées spatiales de ces points peuvent être directement mesurées par un échantillonnage de la scène à l'aide d'un dispositif de type télédéetecteur laser (LIDAR), ou calculées à partir d'autres données de captation (comme nous l'expliquons dans la section 9.3 à propos du capteur Kinect utilisé dans *Unspecified Clay*).

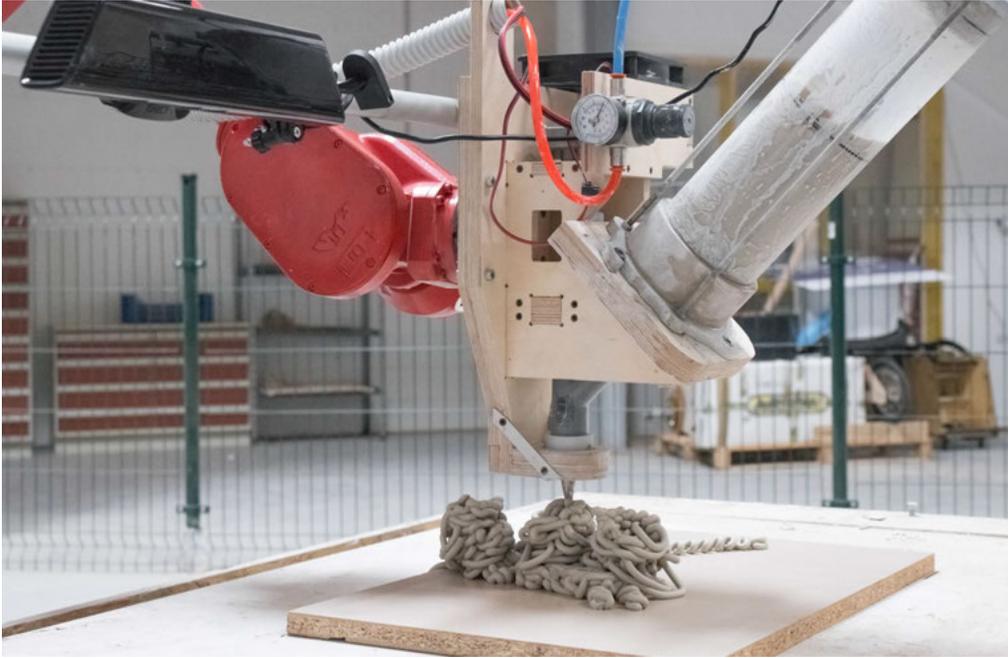


Fig. 9.1 — Dispositif expérimental : bras robotisé COMAU, extrudeur d'argile, capteur Kinect.

montre ainsi deux états successifs d'une structure obtenue au cours d'une de nos expériences. Ce cycle productif, composé de trois étapes principales (numérisation des structures précédemment déposées, génération des instructions de contrôle du robot, réalisation des nouvelles dépositions d'argile), peut ensuite être répété jusqu'à épuisement de la quantité de matière disponible, ou jusqu'à ce que l'opérateur prenne la décision d'interrompre la production de la pièce. À l'exception d'une première phase d'initialisation, basée sur une génération heuristique de trajectoires robotiques destinées à « amorcer » la production, chaque parcours d'outil suivi par le robot est ainsi déterminé, de manière itérative, à partir des structures matérielles obtenues au terme d'étapes productives antérieures. Le scénario proposé, d'orientation expérimentale et prospective, ne vise ainsi pas à réaliser des modèles numériques prédéfinis, mais à produire, de manière itérative et émergente, des structures indépendantes de toute forme de spécification explicite. Les artefacts « finaux » obtenus ne s'inscrivent donc pas dans une démarche « applicative », et doivent être considérés, avant tout, comme des « échantillons » expérimentaux — ce qui n'interdit évidemment pas d'en envisager l'appréciation sous un angle esthétique<sup>8</sup>.

8. Il s'avère également tout à fait envisageable que certains des outils ou des méthodes développés au cours de cette expérimentation puissent être réinvestis dans le cadre de proces-

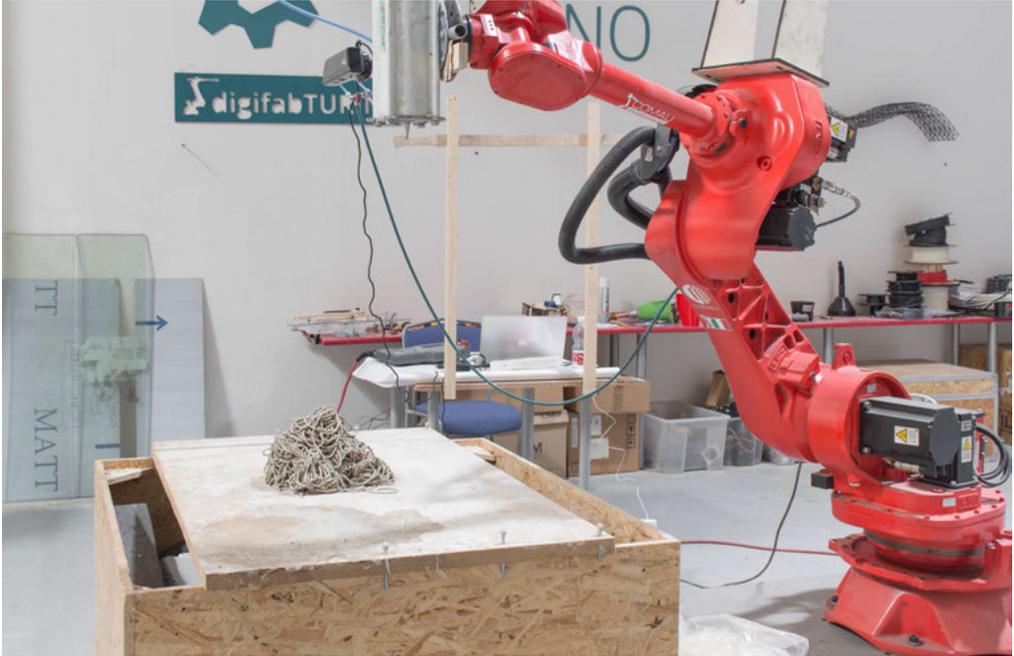


Fig. 9.2 — Bras robotisé positionné dans une posture d’acquisition. Le robot est ici équipé d’une version antérieure de l’extrudeur d’argile.

La direction expérimentale suivie par *Unspecified Clay* s’inscrit dans un contexte existant de recherches et de pratiques prospectives, liées au champ de la production numérique, qu’il convient ici d’explicitier plus en détails. Le point saillant du projet réside, bien entendu, dans son abandon de toute représentation géométrique de l’issue attendue du processus de production pour s’orienter vers une génération *directe* et *rétroactive* des parcours d’outil suivis par le robot. La mention de la première de ces deux qualités (génération directe des parcours d’outil) nous conduit immédiatement à proposer une première série de remarques. Dans *Unspecified Clay*, les parcours d’outil ne sont plus considérés comme des instructions permettant la réalisation matérielle « fidèle » d’une forme déjà définie, mais comme de pures trajectoires, susceptibles de donner lieu des effets matériels émergents. Les parcours d’outil ne se trouvent ainsi plus liés à une représentation géométrique explicite de l’objet à produire, mais deviennent manipulés dans une logique performative : on n’attend plus d’eux qu’ils réalisent une forme connue à l’avance, mais qu’ils *produisent* la forme de l’objet dans leur « actualisation », au moment du contact entre outil et matière.

---

sus productifs plus « appliqués » : *Unspecified Clay* relève ainsi pleinement, en ce sens, d’un contexte de recherche *instrumentale*.

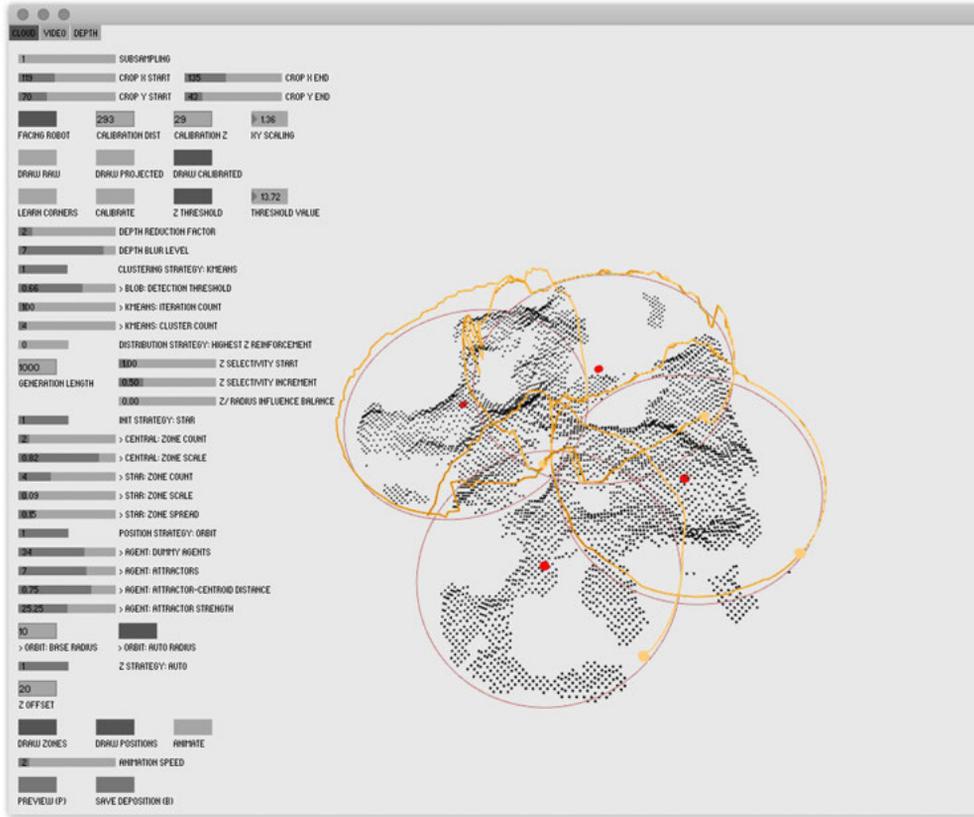


Fig. 9.3 — Logiciel permettant le traitement des données de captation et la génération des instructions de contrôle du robot.



Fig. 9.4 — Vue de deux étapes successives de production d'une pièce.

En termes d'implémentation logicielle, cette évolution du point de vue sur la notion de parcours d'outil se traduit par l'abandon de toute étape de représentation géométrique « intermédiaire », conduisant à l'adoption de procédures algorithmiques à même de générer directement les parcours d'outil utiles à la production : si les flux de travail file to factory ne calculent traditionnellement l'information de commande numérique que dans un second temps, après une première étape de description explicite de l'artefact à produire (conduisant à la production d'un fichier 3D), le logiciel développé pour *Unspecified Clay* est ainsi conçu pour « parler » directement au robot, en termes de *trajectoires* plutôt que de forme. La fabrication se trouve alors envisagée au niveau « local » de la rencontre entre outil et le matériau, sans passer au préalable par une description globale du résultat attendu de cette rencontre.

Cette possibilité d'envisager un processus de production basé sur une génération directe de parcours d'outil se posait comme la continuation logique de nos expérimentations antérieures, et notamment des travaux explorant l'idée d'une forme « ouverte » de notations, présentés dans le chapitre 7. Si, dans notre projet *Gradient*, nous nous intéressions à la possibilité de produire des comportements matériels émergents en contraignant l'outil de gravure laser à générer un ensemble de trajectoires d'usinages spécifiques, nous travaillions en effet encore à partir de la spécification d'une forme géométrique « intermédiaire » (en l'occurrence, un rectangle), dont nous attendions qu'elle produise, lors de son traitement par les algorithmes de génération de trajectoire de la machine, les parcours d'outil adéquats. En regard de cette approche, la perspective d'une génération directe de parcours d'outil nous paraissait non seulement plus rigoureuse sur le plan conceptuel, mais aussi porteuse de plus larges possibilités d'expérimentation. Telle est l'une des raisons pour lesquelles nous avons en premier lieu été conduits à nous intéresser au travail de Co-de-iT lors de nos recherches bibliographiques : la plupart des expérimentations développées dans le cadre du projet inFORMed matter s'inscrivent en effet dans une approche de génération directe de parcours d'outil<sup>9</sup>.

Au cours des dernières années, cette idée d'une production numérique basée sur la spécification directe des trajectoires suivies par les machines de production a été explorée par plusieurs autres praticiens et chercheurs : on peut citer par exemple l'œuvre *Filament Sculptures* (2013) de l'artiste Lia<sup>10</sup> (figure 9.5), ou les travaux d'impression 3D d'argile menés par Olivier van Herpt et la société Emerging Objects, cités en introduction de cette thèse. Outre ces

---

9. Antérieurement aux travaux relatifs à l'extrusion robotique d'argile, l'idée d'une génération directe de parcours d'outil a d'abord été expérimentée par Co-de-iT sur des machines d'impression 3D « de bureau » : voir notamment <http://www.co-de-it.com/wordpress/p5experimental-3d-printing.html> (consulté le 11 mai 2017).

10. <http://www.liaworks.com/theprojects/filament-sculptures> (consulté le 11 mai 2017).



Fig. 9.5 — Lia, *Filament Sculptures*, 2013 (source : <http://www.ntaa.be/public>).

projets, réalisés à l'aide d'imprimantes 3D, nous pouvons remarquer que la plupart des recherches mobilisant des bras robotisés à 6 axes adoptent une telle approche de génération directe de trajectoires. Cette propriété tient sans doute à la nature extrêmement spécifique des procédés de fabrication mis en œuvre à l'aide de ces bras robotisés (par contraste, par exemple, avec un scénario « classique » d'impression 3D), rendant le plus souvent nécessaire le développement de procédures personnalisées de génération d'instructions de pilotage : l'adoption d'une approche d'écriture directe de parcours d'outil s'impose alors comme une nécessité technique pour les concepteurs. On peut notamment mentionner, à ce titre, les recherches récemment menées par Gilles Retsin et Manuel Jiménez García autour de la notion de « méthodes computationnelles discrètes<sup>11</sup> » dans le cadre du Research Cluster 4 de la Bartlett School of Architecture, explorant diverses méthodes de génération de trajectoires spatiales adaptées au contexte d'une fabrication additive à « grande échelle », basée sur

---

11. Gilles Retsin et Manuel Jimenez Garcia, « Discrete Computational Methods for Robotic Additive Manufacturing: Combinatorial Toolpaths », *Posthuman Frontiers: Data, Designers, and Cognitive Machines. Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, Ann Arbor, University of Michigan Taubman College, 2016, p. 332–341.

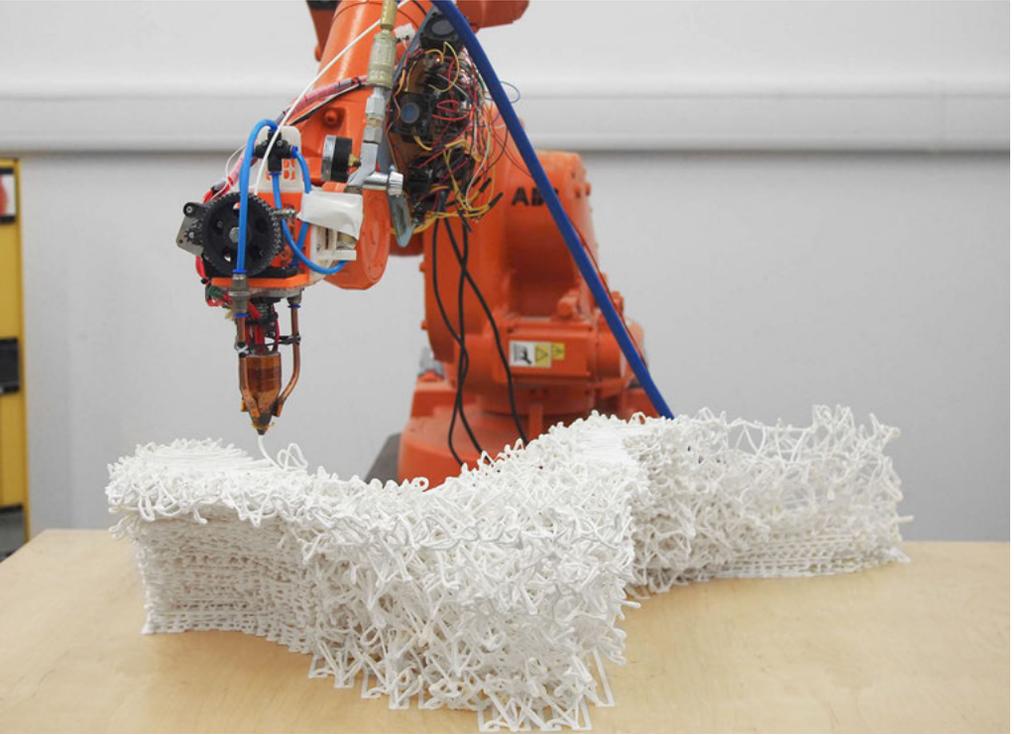


Fig. 9.6 — Hyunchul Kwon, Amreen Kaleel et Xiaolin Li, CurVoxels, 2016, projet développé sous la direction de Manuel Jiménez García et Gilles Retsin dans le cadre du Research Cluster 4 de la Bartlett School of Architecture (source : <http://manueljimenezgarcia.com/rc4-curvoxels>).

des matériaux comme des polymères thermoplastiques (figure 9.6) ou du béton.

S'orientant vers la spécification du comportement de la machine, plutôt qu'une prescription explicite de la forme à réaliser, de telles approches témoignent de l'émergence d'un intérêt contemporain pour une vision *non représentationnelle* de la conception numérique, et signalent ainsi, à notre sens, le début d'une véritable remise en cause du paradigme de production « non standard ». Cependant, comme l'a montré notre analyse présentée au cours du chapitre 8, le projet d'un véritable dépassement du cadre conceptuel de la standardisation requiert, à notre sens, de s'orienter non seulement vers la mise en œuvre d'étapes de fabrication dotées d'une véritable capacité d'invention formelle, mais aussi de remettre en cause l'idée même d'une articulation *linéaire* de la fabrication à la conception, pour chercher à s'orienter à la place vers un régime de production maintenue. Cette remarque nous conduit à la seconde propriété saillante du projet *Unspecified Clay* : son ambition d'inscrire l'idée d'une génération directe de parcours d'outil dans le cadre d'une production en « temps-réel », dont les conditions ne seraient plus fixées à l'avance mais

constamment redéfinies, selon une logique de rétroaction, dans le cours même de son déroulement.

Cette idée d'un mode de production rétroactif a récemment été mise à l'épreuve dans un ensemble de projets, dont nous souhaitons ici présenter quelques exemples. Depuis quelques années, les travaux de l'Institute for Computational Design and Construction (ICD), dirigé par Achim Menges, explorent ainsi la possibilité d'une génération « en direct » de trajectoires robotiques sur la base d'une captation et d'une analyse des structures matérielles produites au cours du processus de fabrication. Le ICD/ITKE Research Pavilion 2014–15<sup>12</sup> (figure 9.7), réalisé en collaboration avec le Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE), dirigé par Jan Knippers à l'université de Stuttgart, exploite ainsi un processus de génération en direct de parcours d'outil pour réaliser le renforcement sélectif d'une membrane flexible initialement gonflée à l'air, à l'aide d'un dépôt de fibres de carbone opéré par un bras robotisé. Travaillant initialement sur la base d'un premier jeu de trajectoires calculées à partir d'une géométrie « cible », ce bras réalise une première série d'opérations de renforcement de la membrane, au cours desquelles la configuration géométrique de cette dernière se trouve modifiée. Pour s'adapter à cette évolution dynamique de son support de travail, le robot utilise les données d'un capteur, monté sur l'outil de dépôt des fibres, afin d'ajuster rétroactivement le modèle computationnel de détermination des trajectoires au nouvel état physique du système en construction. Au cours de la fabrication, la trajectoire suivie par le robot se trouve ainsi mise à jour en permanence, afin d'optimiser ses zones d'action en fonction de l'évolution réelle de la membrane. Le processus permet finalement d'obtenir une structure auto-portante, dont les propriétés géométriques, quoi qu'inspirées initialement d'une forme de départ, ont été négociées en temps-réel dans l'interaction entre le matériau, le support de construction et l'algorithme de pilotage du robot.

Des dispositifs robotiques tels que ceux du ICD, capables de négocier, par l'intermédiaire de mécanismes de captation et de procédures computationnelles, leurs interactions avec un environnement en évolution dynamique, renvoient à la notion de systèmes « cyber-physiques<sup>13</sup> ». Ces systèmes industriels, définis comme des « systèmes physiques construits dont les opérations sont surveillées, coordonnées, contrôlées et intégrées par un centre de calcul et de com-

---

12. Moritz Doerstelmann, Jan Knippers, Valentin Koslowski, Achim Menges, Marshall Prado, Gundula Schieber et Lauren Vasey, « ICD/ITKE Research Pavilion 2014–15: Fibre Placement on a Pneumatic Body Based on a Water Spider Web », *Architectural Design*, vol. 85, n° 5, 2015, p. 60–65.

13. Ragnathan Rajkumar, Insup Lee, Lui Sha et John Stankovic, « Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution », *Proceedings of the 47th Design Automation Conference*, ACM, 2010, p. 731–736.



Fig. 9.7 — Fabrication du *ICD/ITKE Research Pavilion 2014–2015* (source : <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=12965>).

munications<sup>14</sup> », occupent une place centrale dans le projet stratégique d'une augmentation radicale de la connectivité, de l'autonomie et de l'intégration des technologies de production automatisées — une perspective fréquemment résumée par le terme d'« industrie 4.0<sup>15</sup> ». Les recherches du ICD ambitionnent

14. *Ibid.*, p. 731. Notre traduction.

15. Cette notion renvoie, par son nom même, à l'idée d'une « quatrième révolution industrielle ». Selon la vision historique usuellement proposée dans les contextes d'usage de l'expression « industrie 4.0 », la « première révolution » industrielle serait actée par l'introduction de la production mécanisée à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle; la « seconde révolution », par le développement de la production de masse en série, et la généralisation de l'usage de l'énergie électrique au début du XX<sup>e</sup> siècle; la « troisième révolution », par l'introduction de l'informatique industrielle à la fin des années 60; et la « quatrième révolution », par la généralisation des systèmes cyber-physiques (Achim Menges, « The New Cyber-physical Making in Architecture: Computational Construction », *op. cit.*). Les systèmes cyber-physiques annoncent une nouvelle étape dans les logiques de mécanisation et d'automation de la production, en tirant partie d'une connectivité accrue des systèmes et d'une augmentation exponentielle des capacités de stockage et de traitement des données numériques. Son enjeu principal est le développement de l'autonomie des unités de production, et l'application d'une logique de décentralisation des décisions permettant une meilleure adaptation de chaque « maillon » de la chaîne productive à ses conditions environnementales. Incidemment, cette idée d'une décision décentralisée se rapproche des thèses de Jeremy Rifkin sur l'idée d'une « troisième » (et non quatrième) révolution industrielle (Jeremy Rifkin, *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming*

de s'inscrire pleinement dans ce secteur d'innovation, dont elles reprennent d'ailleurs explicitement le vocabulaire<sup>16</sup>.

S'il s'avère important de mentionner ces références issues du contexte industriel, l'idée d'une production rétroactive, telle que nous la concevons dans le cadre d'*Unspecified Clay*, s'avère cependant plus « ouverte » que celle des scénarios de production cyber-physiques. Il apparaîtra en effet clairement, en vertu des réflexions réalisées dans les chapitres précédents de cette thèse, que l'orientation « pragmatique » (pour ne pas dire productiviste) des systèmes cyber-physiques n'est pas celle que nous retenons comme cadre conceptuel principal de nos expériences. Au sein d'*Unspecified Clay*, la mobilisation de procédures rétroactives se trouve ainsi volontairement mise en œuvre dans une orientation générative : l'enjeu est d'explorer les conditions d'une formation véritablement émergente de structures matérielles, résultant d'une interaction dynamique entre les logiques du code, du robot et du matériau, plutôt que de développer des solutions visant à accroître la résilience des procédés de fabrication en les dotant d'une capacité d'adaptation à l'imprévisibilité du comportement de la matière. En d'autres termes, nous ne cherchons pas ici à mobiliser la notion de rétroaction afin d'affiner itérativement un comportement émanant d'une géométrie « cible » (comme dans le cas du ICD/ITKE Research Pavilion 2014–15), mais à explorer de manière ouverte les possibilités expressives d'un agencement d'acteurs matériels, tous envisagés comme des sources potentielles de création de forme.

Nos recherches nous ont permis de mettre en évidence plusieurs travaux récents s'inscrivant dans ce type de compréhension de la notion de production rétroactive. Le projet Autonomous Tectonics<sup>17</sup> (figure 9.8), dirigé par Matias del Campo et poursuivi dans le cadre de plusieurs ateliers (notamment au Taubman College of Architecture and Urban Planning de l'université du Michigan ainsi qu'à l'université RMIT de Melbourne), explore la formation émergente de structures auto-portantes au cours d'une série de dépôts d'un polymère thermoplastique. Après chaque dépôt, une captation 3D

---

*ming Energy, the Economy, and the World*, Basingstoke, Palgrave Macmillan, 2011). Au sein de l'Union Européenne, cette perspective est soutenue par des initiatives telles que le programme allemand Industrie 4.0, ainsi que le projet CREMA (Cloud-based Rapid Elastic Manufacturing), financé dans le cadre du projet européen Horizon 2020 (<http://www.crema-project.eu>, consulté le 11 mai 2017).

16. Achim Menges, « The New Cyber-physical Making in Architecture: Computational Construction », *op. cit.*

17. Matias del Campo, Adam Fure, Wes McGee, Sandra Manninger et Arthur Flexer, « Autonomous Tectonics: A Research into Emergent Robotic Construction Methods », dans Christoph Gengnagel, Axel Kilian et Julien Nembrini (dir.), *Rethinking Prototyping: Proceedings of the Design Modelling Symposium Berlin 2013*, Berlin, Universität der Künste, 2013, p. 417–432.



Fig. 9.8 — Atelier organisé autour du projet Autonomous Tectonics à l'université RMIT de Melbourne (source : <https://vimeo.com/145365730>).

de la configuration de la structure obtenue permet de déterminer les points de plus grande stabilité, servant de « cibles » à la prochaine étape de déposition. À l'exception de la phase d'initialisation du processus, le concepteur ne fournit ainsi aucune description explicite des trajectoires suivies par le robot. Un autre exemple est celui du projet Stigmergic Accretion<sup>18</sup> (figure 9.9), dirigé par Roland Snooks et Gwyllim Jahn et présenté sous la forme d'un atelier à la conférence Rob|Arch 2016. Ce projet vise à explorer la formation émergente de structures en mousse polyuréthane expansée et en polyéthylène haute densité, produites par un bras robotisé dont les trajectoires sont pilotées en « temps-réel » par une simulation multi-agents. L'enjeu du projet est d'informer rétroactivement l'environnement numérique de la simulation multi-agents par une captation de l'état physique des structures produites, de sorte à établir une correspondance entre le domaine numérique d'exécution de la simulation, et le domaine matériel de sa réalisation par le robot. Le flux de travail mis en œuvre ne se base, là encore, sur aucune spécification établie *a priori* des trajectoires robotiques, et fixe les conditions de leur génération sur la base seule des

18. Roland Snooks et Gwyllim Jahn, « Stigmergic Accretion », dans Dagmar Reinhardt, Rob Saunders et Jane Burry (dir.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*, Cham, Springer, 2016, p. 398–409.



Fig. 9.9 — Roland Snooks et Gwyllim Jahn, *Stigmergic Accretion*, 2016 (source : <https://vimeo.com/172435465>).

comportements matériels observés. Dans leur article accompagnant l'atelier, les auteurs opposent ainsi leur approche à l'idée d'une « computation matérielle », dans la continuité de laquelle s'inscrivent les systèmes cyber-physiques développés à l'ICD : là où la computation matérielle signale classiquement une volonté d'intégration des logiques matérielles au sein de processus de simulation numérique<sup>19</sup> (augmentée, dans le cas des systèmes cyber-physiques, par une mesure en temps-réel du comportement physique des matériaux), l'approche défendue par les auteurs procède davantage d'une volonté de « mise en relation » des domaines numérique et matériel, ouvrant la possibilité d'une expression simultanée, émergente, des logiques propres à chacun d'entre eux — hors de toute forme de domination de l'un par l'autre. Comme le soulignent Roland Snooks et Gwyllim Jahn :

« This process inverts the prevailing approach to material computation (...) in which material behaviors are encoded within digital algorithms for the purposes of form finding, optimization or simulation. Instead we posit a model in which the digital knows nothing of the physical,

19. Achim Menges, « Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design », *Architectural Design*, vol. 82, n° 2, 2012, p. 14–21.

but instead operates at such a closeness of feedback that the digital and material are caught in a mutual process of volatile reaction<sup>20</sup>. »

Tout en répondant à des préoccupations conceptuelles et pratiques spécifiques à cette thèse, *Unspecified Clay* a ainsi été pensé comme une contribution au champ de recherche auquel se rattachent les expériences mentionnées ci-dessus. Cette remarque nous conduit par conséquent à préciser le statut réservé à ce projet dans le cadre de cette thèse. Au sens strict, *Unspecified Clay* n'a pas été pensé comme un objet de design ou une œuvre artistique « achevés », mais comme un projet de recherche visant à mettre à l'épreuve, par la pratique, notre idée d'auto-maintenance : il s'agissait pour nous, avant tout, de confronter à la réalité d'un dispositif expérimental l'idée selon laquelle une production continue de structures matérielles pouvait à la fois s'offrir en tant que réalisation d'un ensemble de relations productives, tout en fournissant le moyen effectif d'une « régénération » de ces relations. En permettant de construire, à chaque étape du processus productif, la possibilité d'une réalisation future des relations productives entre code, robot et matériau sur la base même des structures produites au cours des étapes antérieures, la notion de rétroaction nous est ainsi apparue comme le point de départ possible de l'implémentation d'un tel processus d'auto-maintenance.

En tant que mise à l'épreuve de notre hypothèse d'auto-maintenance, *Unspecified Clay* appelait ainsi à définir un « critère d'évaluation » de la direction pratique empruntée. En cohérence avec l'orientation générative du projet, nous avons retenu l'idée d'un scénario de « différenciation matérielle » afin d'évaluer la capacité des processus de maintenance implémentés à induire une négociation productive entre les comportements du code, du robot et du matériau. Nous avons ainsi cherché à évaluer notre capacité à produire des artefacts caractérisés par l'émergence progressive de différents degrés de densité, de texture et d'articulation matérielles, sur la base d'une première déposition d'argile relativement peu différenciée.

Le choix de ce critère, que nous utiliserons notamment pour discuter les sessions expérimentales présentées dans la section 9.4, visait également à intégrer l'une spécificités principales de notre approche : l'utilisation d'argile, matériau plastique et par conséquent capable de maintenir une capacité de déformation pendant l'intégralité du processus de production. À notre connaissance, *Unspecified Clay* constitue en effet la première tentative de mise en œuvre d'une logique de production rétroactive basée sur un processus d'extrusion d'argile : les projets mentionnés ci-dessus au titre de références exploitent en effet le plus souvent des matériaux dotés d'une capacité de durcissement rapide,

---

20. Roland Snooks et Gwyllim Jahn, « Stigmergic Accretion », *op. cit.*, p. 400.

comme la mousse polyuréthane ou divers polymères thermoplastiques. Dans ce cadre, l'effet d'un nouveau dépôt de matériau se traduit alors essentiellement par un comportement additif : l'apport supplémentaire de matière vient se greffer sur les structures déjà formées, sans induire une déformation de celles-ci. Par contraste, les durées de séchage typiques de l'argile impliquent le maintien prolongé d'une plasticité des structures déposées, rendant possible leur déformation par l'ajout ultérieur de matière. Cette capacité d'une déformation progressive des structures d'argile, particulièrement importante lorsque les « supports » sur lesquels viennent s'ajouter les nouvelles dépositions sont dotés d'une articulation matérielle peu dense, nous a intéressé pour sa capacité potentielle à induire des reconfigurations radicales des structures en cours de production. Nous avons ainsi envisagé d'explorer notre hypothèse, liée à la possibilité d'induire une différenciation progressive des propriétés matérielles de l'argile, à travers l'idée d'une mise en œuvre *localisée* des capacités de déformation du matériau, exprimée en différents « points d'intérêt » des structures matérielles formées. Nos expériences nous ont permis d'identifier et d'implémenter plusieurs procédures pertinentes en ce sens, composant différentes déclinaisons du « processus de maintenance » implémenté dans notre dispositif. Nous présentons les résultats de ces expérimentations dans la section 9.4.

Tout en soulignant cette compréhension de notre projet sous l'angle d'une démarche de recherche expérimentale, il convient néanmoins de souligner l'intérêt *esthétique* que nous trouvions dans la réalisation de ces expériences. Une large part de notre motivation à travailler sur *Unspecified Clay* résidait en effet dans notre intérêt plastique pour le type d'artefacts susceptible d'être « générés » par le processus rétroactif mis en place. Cet intérêt ne s'avérait en aucun cas contradictoire avec l'adoption du critère d'« évaluation » mentionné ci-dessus, lié à la capacité d'induire une différenciation matérielle progressive au sein de chacun des artefacts produits : ce critère se posait en effet, par sa nature même, comme un véritable principe de génération plastique.

Envisagés sur un plan esthétique, les artefacts finalement produits par notre dispositif peuvent de fait être rattachés à l'idée artistique d'« antiforme », formalisée en 1968 par Robert Morris dans son texte « Anti Form<sup>21</sup> » et expérimentée dès 1967 dans sa série de sculptures en feutre *Wall Hanging* (figure 9.10). L'idée d'antiforme procède, au départ, d'une contestation de l'impératif du « bien construit<sup>22</sup> ». Valorisé par la sculpture Minimaliste, cet impératif favorisait l'utilisation exclusive de matériaux « industriels rigides<sup>23</sup> » (comme les contreplaqués), choisis pour leur capacité à réaliser fidèlement les géomé-

---

21. Robert Morris, « Anti Form », dans *Continuous Project Altered Daily : The Writings of Robert Morris*, Cambridge, MIT Press, 1993, p. 41–47.

22. *Ibid.*, p. 41. Notre traduction.

23. *Ibid.*, p. 46. Notre traduction.



Fig. 9.10 — Robert Morris, *Wall Hanging*, vers 1970 (source : <http://www.ngv.vic.gov.au/explore/collection/work/4198>).

tries décidées *a priori* par l'artiste. Contre cette idée d'une « perpétuation de la forme<sup>24</sup> », représentant pour Morris « de l'idéalisme en fonctionnement<sup>25</sup> », l'antiforme s'oriente vers l'utilisation de matériaux non-rigides, et adopte plus généralement une approche visant à « reconsidérer l'usage des outils en lien avec le matériau utilisé<sup>26</sup> ». L'idée principale du texte, pour la formuler dans le vocabulaire théorique adopté dans cette thèse, n'est autre que le développement d'une vision non hylémorphique de la sculpture, ménageant une place à l'expression spontanée des propriétés physiques des matériaux, sous l'action de forces comme la gravité (une propriété notamment exploitée dans la série *Wall Hanging*).

Bien que le courant de l'antiforme ne soit pas directement lié à l'utilisation de processus industriels (il s'agissait plutôt, comme le soulignait Robert Morris, de s'éloigner de l'impératif industriel du « bien construit »), son héritage se prolonge à notre sens directement dans un ensemble d'œuvres plus récentes qui, à l'instar de *SCUMAK* de Roxy Paine ou des extrusions de béton présentées en 2011 par Anish Kapoor dans son installation *Between Shit*

24. *Ibid.*, p. 45. Notre traduction.

25. *Ibid.*, p. 45. Notre traduction.

26. *Ibid.*, p. 46. Notre traduction.



Fig. 9.11 — Anish Kapoor, *Between Shit and Architecture*, 2011 ; exposition à la Chapelle des Petits-Augustin, École Nationale Supérieure des Beaux-Arts, Paris, 12 mai – 11 juin 2011 (source : <http://anishkapoor.com/691/between-shit-and-architecture>).

*and Architecture*<sup>27</sup> (figure 9.11), défie précisément les logiques « rigides » de la production industrialisée en réinvestissant l'appareil technique de cette dernière dans le cadre d'une production de formes émergentes.

Si nous avons avant tout envisagé *Unspecified Clay* comme une exploration empirique de notre idée d'une production « auto-maintenue », il nous semble important de souligner ici ces références esthétiques, mobilisées de manière consciente lors de la conception de notre projet. Le rapprochement que nous esquissons ici avec la notion artistique d'antiforme mérite cependant une ultime précision : au sens strict, les artefacts produits par notre dispositif ne sauraient être qualifiés d'« informes », dans la mesure où ils mettent en œuvre la capacité active de la matière à se structurer spontanément dans des formes émergeant à différentes échelles. Plutôt que de constituer des objets informes, les artefacts que nous proposons démontrent ainsi, de manière brute, l'idée simondonienne d'une matière comprise comme un substrat de « formes implicites », susceptibles d'opérer un « changement d'ordre de grandeur » dans la médiation de l'opération technique. La notion d'antiforme ne doit donc à

---

27. <http://anishkapoor.com/691/between-shit-and-architecture> (consulté le 12 mai 2017).

notre sens pas être comprise comme synonyme d'« informe », mais plutôt — et tel était l'usage, comme nous l'avons vu, que lui réservait Robert Morris — comme une remise en cause de l'acception *hylémorphique* de la notion de forme : l'antiforme s'oppose à la forme comprise en tant que pôle séparé de la matière, à l'idée selon laquelle un certain donné géométrique « pur » pourrait s'imposer hiérarchiquement à une matière passive.

## 9.2 Dispositif expérimental (hardware)

Le dispositif expérimental mobilisé dans *Unspecified Clay*, déjà présenté brièvement dans la section précédente, se compose de trois éléments principaux : le bras robotisé COMAU, l'outil porté par le bras (composé du système d'extrusion d'argile et du capteur Kinect), ainsi que le logiciel traitant les données de captation et générant les trajectoires du robot. Nous fournissons ici quelques précisions supplémentaires sur les deux premiers de ces éléments.

À l'instar des deux références liées à la notion de production rétroactive citées dans la section précédente, *Unspecified Clay* privilégie l'utilisation d'un bras robotisé à celle d'une machine à commande numérique « sur châssis ». Ce type d'approche, encore minoritaire il y a quelques années, bénéficie aujourd'hui d'une forte popularité, sans aucun doute accru par le succès des recherches menées par Gramazio et Kohler à l'ETH de Zurich depuis 2005. Sans prétendre discuter ici de l'intérêt général d'un usage de bras robotisés, qu'il semble au demeurant légitime d'interroger d'un point de vue critique<sup>28</sup>, il nous paraît important de souligner l'apport pratique d'un tel choix d'outillage dans le cadre d'une situation de production rétroactive, impliquant l'usage d'un dispositif de captation.

Au sens strict, notre processus de production ne mobilise pas l'ensemble des six axes du robot : si nous travaillons bien avec des trajectoires en trois dimensions (et non simplement limitées dans un plan), l'effecteur du robot (l'extrémité du bras) maintient en permanence une orientation fixée, de sorte à préserver la verticalité de l'extrudeur. Mais la liberté de mouvement accessible au robot offre avant tout, dans notre projet, la possibilité de monter le capteur Kinect directement sur l'effecteur, dans une position latérale par rapport à l'extrudeur d'argile. Une fois le robot placé en posture d'acquisition, l'extrudeur se trouve ainsi automatiquement soustrait au champ visuel du capteur. La flexibilité offerte par l'utilisation d'un bras robotisé permet donc de résoudre simplement les problèmes d'occlusion visuelle qui rendraient difficile le positionnement d'un capteur en position zénithale sur une imprimante 3D « sur châssis », tel que le modèle « delta » utilisé par Olivier van Herpt (figure

28. Antoine Picon, « Free the Robots! », *op. cit.*, p. 147.



Fig. 9.12 — Imprimante 3D à céramique de type « delta » utilisée par Olivier van Herpt (source : <http://www.damnmagazine.net/2017/06/28/imprimer-le-monde>).

9.12). Après chaque étape de déposition, le système de captation peut ici simplement être repositionné dans une configuration zénithale, optimale tant en termes de simplicité d'utilisation des données obtenues (notamment en prévision de l'étape de calibration des coordonnées du logiciel), qu'à l'égard de la qualité de la numérisation à proprement parler<sup>29</sup>. Ce point crucial justifie à lui seul, à notre sens, l'utilisation d'un bras robotisé dans le cadre du scénario de production rétroactive adopté ici.

Dans la période temporelle de réalisation de nos expériences, le FabLab Torino a successivement été équipé de deux bras robotisés COMAU, de type NS 12 et NS 60. Respectivement dotés de charges utiles de 12 et 60 kilogrammes, ces bras s'avéraient suffisamment robustes pour permettre le montage du réservoir d'argile directement sur l'extrudeur, comme visible sur la figure 9.1.

29. Le capteur Kinect, comme nous le verrons, ne produit pas directement une représentation tridimensionnelle de la scène observée mais une « carte de profondeur » (*depth map*) calculée à partir de l'image captée par une caméra infrarouge. Or, cette image est naturellement soumise aux phénomènes d'occlusion des objets de la scène entre eux : seuls les objets placés dans le champ direct de la caméra peuvent être saisis. La disposition du capteur en position zénithale fournit ainsi la solution la plus robuste pour s'assurer de numériser la majeure partie de la scène (au prix d'une perte de détails sur les flancs des objets).

Cette solution, adoptée par l'équipe de digifabTURING lors de sa conception du système d'extrusion, présentait un avantage immédiat en termes de simplicité de mise en œuvre par rapport à l'acheminement de l'argile vers l'extrudeur depuis un réservoir déporté. Son inconvénient principal par rapport cette alternative résidait, bien entendu, dans la limitation du volume d'argile utilisable, conditionné à la charge utile maximale du robot et l'encombrement acceptable de l'outil monté sur son effecteur. Ces deux facteurs ont déterminé la quantité d'argile mobilisée lors de chacune de nos expérimentations et, corrélativement, le nombre d'étapes (itérations) composant chacune d'entre elles. En pratique, la durée typique de chaque de nos expériences était comprise entre quatre et huit itérations du cycle de déposition, numérisation et génération des trajectoires : ce nombre, limité par la capacité du réservoir, constituait un compromis entre la volonté de mettre en œuvre un nombre suffisant d'itérations afin d'observer l'action des procédures rétroactives développées, et la nécessité de déposer une quantité suffisante d'argile au cours de chaque étape de déposition pour espérer produire des effets matériels véritablement émergents.

Nous avons été successivement amenés à utiliser deux extrudeurs d'argile, tous deux développés par l'équipe de digifabTURING. La première version, visible sur la figure 9.2, consistait en un réservoir en aluminium muni d'une buse d'extrusion conique. L'extrusion était contrôlée par l'intermédiaire d'un flux d'air comprimé, apporté par une valve présente en haut du réservoir, et activant un piston destiné à presser l'argile contre la buse d'extrusion. Cet extrudeur était dénué de toute possibilité de contrôle numérique du débit de l'extrusion, lequel ne pouvait être ajusté qu'au niveau du compresseur fournissant le flux d'air : le premier inconvénient de ce prototype résidait donc dans l'impossibilité d'arrêter l'extrusion en cours de déposition, et par conséquent de travailler avec des trajectoires de déposition discontinues. Son second inconvénient tenait à la durée nécessaire à la préparation du réservoir, limitant la fréquence possible de réalisation des expériences. L'argile devait en effet être introduite par la partie inférieure du réservoir, ce qui nécessitait le démontage complet de la buse d'extrusion (figure 9.13).

Après une première série d'expériences réalisée avec ce dispositif, en juillet 2016, nous avons pu utiliser un second modèle d'extrudeur, conçu entre temps par l'équipe de digifabTURING. Tout en conservant le principe d'une extrusion basée sur un flux externe d'air comprimé, ce second modèle d'extrudeur (visible sur la figure 9.1) introduisait un mécanisme de contrôle du débit de l'extrusion, basé sur une vis sans fin commandée numériquement, ainsi qu'un réservoir amovible, permettant le renouvellement rapide du stock d'argile<sup>30</sup>.

---

30. Les plans de cet extrudeur sont disponibles sur la page GitHub de digifabTURING : <https://github.com/Digifabturing/Claystruder> (consulté le 12 mai 2017).



Fig. 9.13 — Préparation du réservoir d'argile utilisé dans la première version de l'extrudeur.

Ce nouveau modèle d'extrudeur nous a notamment autorisé à travailler à partir de trajectoires de déposition discontinues, ce qui permettait de cibler indépendamment différentes zones de la surface de travail. La possibilité nouvellement acquise d'un remplacement rapide du réservoir en cours d'expérimentation aurait également pu nous permettre de réaliser des séries de dépositions plus longues, mobilisant par exemple deux réservoirs. Après avoir constaté que les propriétés de l'argile pouvaient varier significativement entre deux préparations successives, nous avons cependant décidé de n'utiliser qu'un réservoir par série expérimentale, afin de maintenir constantes les propriétés du matériau au cours de chaque série. Il nous importait en effet, avant tout, que l'évolution morphologique des artefacts obtenus résulte de l'interaction itérative des logiques du code, de la machine et du matériau : l'introduction en cours d'expérience d'un nouvel élément dans le système, comme une nouvelle préparation d'argile provoquant une modification brusque des propriétés physiques du matériau, aurait en ce sens « faussé » la lecture de nos résultats.

### 9.3 Dispositif expérimental (software)

Ces remarques sur les aspects « hardware » de notre dispositif nous permettent à présent de nous concentrer plus spécifiquement sur sa partie logicielle, afin de préciser le détail des processus de maintenance que nous avons été conduits à concevoir et implémenter dans le cadre de ce projet. Le développement de ces processus a été réalisé en majeure partie à Paris, dans l'intervalle entre les trois sessions expérimentales organisées au FabLab Torino en 2016 et 2017. Chacune de ces sessions (d'une durée de deux à trois jours) nous a permis de mettre à l'épreuve et « déboguer » les nouvelles procédures implémentées depuis la session expérimentale précédente, et de discuter des directions ultérieures de développement possibles avec les membres présents de l'équipe de digifabTURINg (et notamment d'Andrea Graziano). L'utilisation du système

de gestion de versions Git<sup>31</sup> nous a permis de construire, progressivement, un historique des modifications et transformations du code, constituant une réelle documentation du travail de développement réalisé. Cependant, compte tenu de la nature technique du matériau ainsi documenté, il nous semble qu'il serait fastidieux d'en proposer une présentation séparée en différentes étapes chronologiques<sup>32</sup>. Nous adopterons donc ici une description d'ensemble des fonctionnalités « finales » intégrées au logiciel.

Le logiciel d'*Unspecified Clay* a été développé dans l'environnement Processing<sup>33</sup>, un langage de programmation créé en 2001 par Ben Fry et Casey Reas, et orienté vers la conception d'applications graphiques et interactives. Processing peut être considéré comme un « méta-langage » du langage Java : chaque « croquis<sup>34</sup> » Processing, rédigé dans une syntaxe simplifiée, est en réalité compilé en code Java natif avant son exécution. Ce code est ensuite exécuté en tirant partie d'une bibliothèque<sup>35</sup> de fonctions de haut niveau, véritable « cœur » du projet Processing, visant à simplifier grandement diverses opérations liées à la manipulation d'objets graphiques ainsi que l'accès aux flux d'entrée/sortie (souris, clavier, son...)<sup>36</sup>. La simplicité de mise en œuvre et la puissance du langage Processing lui ont permis de se positionner comme l'un des langages de programmation « créatifs » de référence et, au-delà de ce succès, de transformer profondément le rapport à la programmation dans les champs

---

31. <https://git-scm.com> (consulté le 12 mai 2017). Un système de gestion de versions permet d'enregistrer (et de réactiver) une série d'instantanés temporels du code source d'un logiciel (ou de n'importe quel type de ressource numérique stockée au format texte). Il permet de garder une trace des étapes clés du développement, et d'organiser le déroulement de ce dernier : les versions sauvegardées peuvent être accompagnées d'un commentaire et inscrites dans diverses « branches », constituant autant de trajectoires parallèles de l'évolution du logiciel.

32. Nous serons en revanche conduit à adopter un format de présentation chronologique lors de notre discussion du projet *Manœuvres*, présenté dans le chapitre 12. Ce choix sera alors motivé par l'adoption d'une méthodologie expérimentale directement inspirée des sciences physiques, en dialogue avec lesquelles ce projet a été conçu.

33. <https://processing.org> (consulté le 12 mai 2017).

34. Ou *sketch*. Ce terme constitue le nom usuellement donné aux programmes Processing.

35. En informatique, une « bibliothèque logicielle » (*library*) est une collection de procédures destinées à être mobilisées dans d'autres programmes. Les bibliothèques sont le plus souvent dédiées à des fonctions précises (conception d'interface graphiques, calculs...), dont elles facilitent la mise en œuvre en proposant des algorithmes, des structures de données ou encore des utilitaires pertinents par rapport au champ d'application traité. Au sens strict, la bibliothèque proposée par Processing devrait plutôt être qualifiée de « cadre applicatif » (*framework*), en vertu de sa dimension générique et de sa définition d'un « modèle » d'application type.

36. Processing fournit également un environnement de développement intégré, le Processing Development Environment (PDE). Son usage n'est cependant pas obligatoire pour bénéficier des fonctionnalités offertes par la bibliothèque Processing, ainsi que des simplifications syntaxiques offertes par rapport au langage Java natif.

de l'art, du design et de l'architecture. Processing est tout autant mobilisé dans le contexte éducatif que professionnel. S'il s'avère tout à fait utilisable pour une large gamme d'applications « finales », son emploi restent la plupart du temps lié à des fonctions de prototypage et de recherche<sup>37</sup>. Processing constituait en ce sens un choix particulièrement adapté au projet *Unspecified Clay*.

---

37. D'autres solutions, plus performantes ou personnalisables, seront en pratique privilégiées à Processing pour concevoir des applications distribuables, ou des installations interactives de grande ampleur. Concernant ce dernier type d'usages, on peut notamment citer les environnements Cinder (<https://libcinder.org>, consulté le 12 mai 2017) et openFrameworks (<http://openframeworks.cc>, consulté le 12 mai 2017). Basés sur le langage C++, ces environnements offrent des performances supérieures à Processing, au prix d'une plus grande complexité de mise en œuvre.



Fig. 9.14 — Localisation des fonctionnalités proposées par le logiciel sur son interface graphique : (I) construction et calibration du nuage de points, (II) génération des zones de déposition initiales, (III) calcul rétroactif des zones de déposition, (IV) distribution sélective du volume total d'argile déposé, (V) génération des trajectoires de déposition.

Le logiciel se compose d'un ensemble de modules répartis selon cinq grandes catégories d'opérations : (i) construction et calibration du nuage de points, (ii) génération des zones de déposition initiales, (iii) calcul rétroactif des zones de déposition, (iv) distribution sélective du volume total d'argile déposé, (v) génération des trajectoires de déposition. La plupart des résultats produits par ces modules peuvent être visualisés ou animés dans le logiciel. Trois modes d'affichage graphique sont proposés : nuage de points (CLOUD), entrée vidéo (VIDEO), et carte de profondeur (DEPTH). La figure 9.14 présente une capture d'écran du logiciel dans le mode CLOUD, annotée afin d'expliquer les différentes fonctionnalités de l'interface graphique ainsi que la signification des éléments visuels affichés. L'un des avantages de Processing réside dans sa large collection de bibliothèques additionnelles, développées par une communauté active d'utilisateurs : plusieurs d'entre elles ont ainsi été mobilisée au cours de ce projet. L'interface graphique du logiciel a notamment été conçue à l'aide de la librairie ControlP5<sup>38</sup>.

Afin de présenter de la manière la plus claire possible l'interconnexion des diverses fonctionnalités implémentées par le logiciel, nous nous proposons de suivre à présent la séquence d'actions réalisées lors du déroulement d'une session typique d'expérimentation, de la calibration du nuage de points à la génération itérative de trajectoires de déposition. Nous présenterons, à chaque étape, les différentes options accessibles à l'utilisateur, ainsi que les problématiques de développements logiciel correspondantes. La présentation suivante reprend les intitulés des différents modules fonctionnels présentés ci-dessus, mais les agence dans l'ordre « logique » de leur utilisation au cours d'une session de travail typique.

#### *a. Construction et calibration du nuage de points*

Cette première étape vise à construire une représentation de la zone de travail numérisée sous la forme d'un nuage de points, et d'y établir un système de coordonnées représentatif des dimensions et de l'orientation de l'espace physique.

Au cours de cette première étape, le robot est placé en position d'acquisition : le capteur Kinect observe la scène en position zénithale, à une distance de l'ordre de 70 cm par rapport au plan de travail<sup>39</sup>, alors vierge. L'utilisation du mode VIDEO fournit un retour visuel de l'image captée par la caméra couleur du capteur Kinect (figure 9.15). Les réglages CROP X START, CROP X END, CROP Y START et CROP Y END permettent de restreindre la zone de captation à une surface de

38. <https://github.com/sojamo/controlp5> (consulté le 9 mai 2017).

39. La valeur exacte de cette distance n'est pas critique, mais il importe que la position d'acquisition reste exactement la même au cours de l'ensemble du processus de production.



Fig. 9.15 — Mode VIDEO : affichage de l'image couleur fournie par le capteur Kinect.

travail plane, de hauteur constante : sur la figure 9.15, ces réglages seront ainsi ajustés de façon à « couper » le bord supérieur de l'image, afin de ne retenir que le plateau de bois destiné à recevoir les dépositions.

Le champ visuel cadré en mode VIDEO est ensuite automatiquement converti en information tridimensionnelle par le logiciel, sous la forme d'un premier nuage de points. La seule donnée tridimensionnelle fournie par le capteur Kinect est celle d'une carte de profondeur, calculée à partir de la corrélation d'une image 2D captée par la caméra infrarouge du capteur, et d'un motif de points lumineux « plaqué » sur la scène par un projecteur infrarouge, également embarqué par le capteur<sup>40</sup>. La figure 9.16 présente une carte de profondeur déterminée par le capteur Kinect, ainsi que l'image couleur correspondante (fournie par la caméra couleur) : ces deux images possèdent le même nombre de pixels ; pour chaque pixel de l'image couleur, la carte de profondeur fournit une valeur de gris indiquant la distance à la caméra. Cette carte de profondeur encode

40. Zhengyou Zhang, « Microsoft Kinect Sensor and its Effect », *IEEE Multimedia*, vol. 19, n° 2, 2012, p. 5.



Fig. 9.16 — Carte de profondeur fournie par le capteur Kinect (source : [http://openframeworks.cc/ofBook/chapters/image\\_processing\\_computer\\_vision.html](http://openframeworks.cc/ofBook/chapters/image_processing_computer_vision.html)).

ainsi une information tridimensionnelle repérée de manière relative au tableau de pixels de la caméra, et non dans un système de coordonnées cartésien. Pour convertir les informations de distance de la carte de profondeur en coordonnées cartésiennes, nous nous basons sur une fonction proposée par Matthew Fisher<sup>41</sup>, calibrée à partir de mesures empiriques réalisées sur le capteur Kinect. À partir des coordonnées  $(i, j)$  du pixel de la carte de profondeur et de la valeur  $d$  du niveau de gris en ce point, cette fonction `depthToWorld` permet de calculer les coordonnées  $(x, y, z)$  du point correspondant au sein de la scène tridimensionnelle, exprimées dans un repère de coordonnées cartésien relatif à l'orientation du capteur. Nous pouvons alors déterminer les coordonnées d'un premier nuage de points « brut ». la figure 9.17 présente, dans le mode CLOUD du logiciel, le nuage de points brut obtenu par numérisation de la zone de travail (vierge) précédemment cadrée en mode VIDEO.

Ce premier nuage de points brut fournit des positions spatiales cohérentes entre elles, mais présente typiquement une orientation spatiale « arbitraire » : plus précisément, les plans horizontaux et verticaux du système de coordonnées par défaut du logiciel, dans lequel est affiché le nuage de points, n'ont *a priori* aucune raison de correspondre à l'orientation définie de manière intrinsèque par la géométrie des objets numérisés. L'étape suivante du traitement consiste donc à « redresser » le nuage de points brut calculé à l'étape précédente, afin de s'assurer notamment que les points obtenus par numérisation du plan de travail, correspondant à un ensemble horizontal dans l'espace *physique*, soient bien représentés dans un plan horizontal au sens du système de coordonnées utilisé dans le logiciel. Pour ce faire, nous cherchons tout d'abord à représenter l'orientation intrinsèque du nuage de points bruts, en calculant une base orthonormée de l'espace à partir des propriétés géométriques de ce

41. <http://graphics.stanford.edu/~mdfisher/Kinect.html> (consulté le 12 mai 2017).

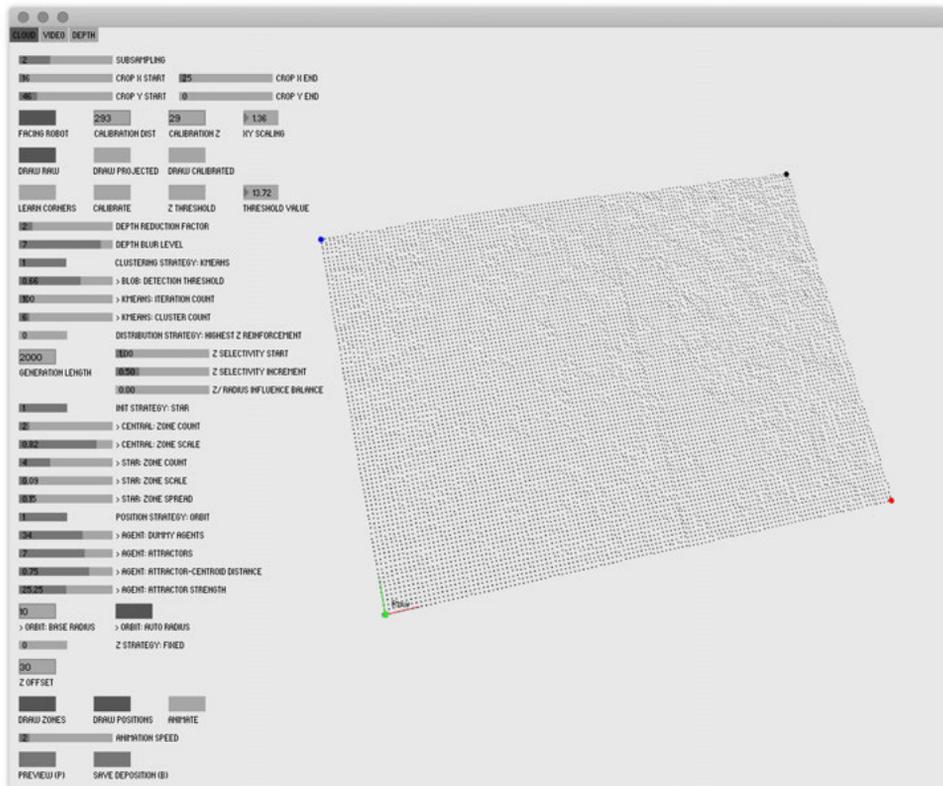


Fig. 9.17 — Nuage de points obtenu par numérisation de la zone de travail précédemment cadrée en mode VIDEO.

nuage. En exprimant les coordonnées du nuage de points brut dans cette nouvelle base, nous obtenons alors automatiquement une représentation « redressée » de la zone de travail, qualifiée de nuage de points « projeté » (visualisable par le réglage DRAW PROJECTED) : lorsque nous affichons les points correspondant à ces nouvelles coordonnées, tout se passe en effet comme si le nuage de points brut avait été projeté dans le plan horizontal du système de coordonnées par défaut du logiciel. La figure 9.18 montre simultanément les représentations du nuage de points brut, ainsi que du nuage de points redressé obtenu.

Pour calculer un repère orthonormé correspondant à l'orientation du nuage de points brut, nous cherchons tout d'abord à déterminer deux vecteurs représentatifs de cette orientation. Pour ce faire, nous calculons tout d'abord une représentation moyennée de chacun des quatre sommets de la forme trapézoïdale adoptée par le nuage brut (lorsque celui-ci représente, comme à présent, la surface vierge du plan de travail) : cette opération, déclenchée par le bouton LEARN CORNERS de l'interface graphique, permet d'obtenir une représentation stable de l'orientation de ce nuage de points, non soumise aux fluctuations introduites par le bruit électronique du capteur. Nous utilisons en pratique une moyenne sur 100 cycles d'acquisition. L'une des quatre moyennes ainsi obtenues des sommets du trapézoïde est ensuite choisie comme référence. Les vecteurs issus de ce point et atteignant les deux sommets voisins du trapézoïde fournissent alors deux directions représentatives de l'orientation spatiale du nuage de points. Pour obtenir une base orthonormée à partir de cette paire de vecteurs, nous utilisons la procédure d'orthogonalisation de Gram-Schmidt<sup>42</sup>, permettant, en trois dimensions, de calculer itérativement une base orthonormée de l'espace à partir d'une famille libre de deux vecteurs.

Le nuage de points projeté obtenu au cours de cette étape doit ensuite être « calibré » afin de pouvoir servir de référence pour la génération de trajectoires robotique. Au cours de nos expériences, nous avons configuré le robot de sorte que l'origine de son système de coordonnées, située à l'extrémité de la buse de l'extrudeur, corresponde au point central de la zone de travail. Au sein de notre logiciel, ce point occupe, par construction, la position (0, 0, 0) de notre système de coordonnées. Une opération de translation doit donc tout d'abord être réalisée sur le nuage de points projeté afin de le « centrer » sur la coordonnée (0, 0, 0), en accord avec la position du nouveau point définissant son origine dans l'espace physique (le centre de la zone de travail). Une opération de rotation du nuage de points autour de l'axe vertical permet ensuite de lui donner un angle adéquat dans le plan horizontal<sup>43</sup>. Enfin, une opération d'homothétie permet de doter le nuage de points d'une échelle spatiale adéquate : en pratique, nous nous sommes en effet aperçus qu'une correction dimensionnelle s'avérait nécessaire par rapport aux données brutes fournies par la fonction `depthToWorld`. Ces trois opérations sont prises en charge depuis l'interface graphique du logiciel. En sélectionnant l'option CALIBRATE, un segment déplaçable apparaît sur le nuage de points projeté : en positionnant ce segment sur la ligne

---

42. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme\\_de\\_Gram-Schmidt](https://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_de_Gram-Schmidt) (consulté le 16 mai 2017).

43. Le calcul du nuage de points projeté nous a permis d'obtenir une représentation numérique orientée de manière cohérente avec le plan horizontal de l'espace physique, mais cette représentation peut néanmoins encore se trouver « tournée » par rapport au repère utilisé pour le contrôle du robot.

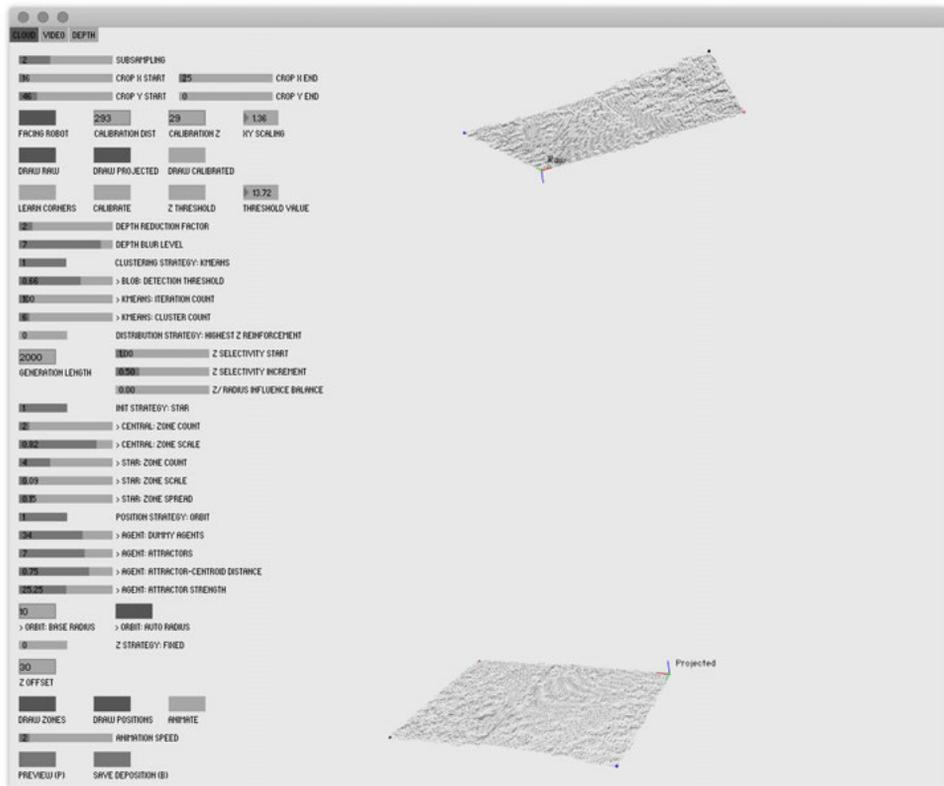


Fig. 9.18 — Affichage du nuage de points brut (en haut) et du nuage de points projeté (en bas). Noter l'orientation inversée des repères attachés à chacun de ces nuages.

de points numérisés correspondant à l'une des arêtes d'un objet de référence, positionné de sorte à indiquer l'origine et l'orientation du système de coordonnées du robot (figure 9.19), l'origine et l'angle du nuage de points projeté dans le plan horizontal peuvent être ajustés de manière interactive. La calibration est ensuite complétée par la saisie des valeurs CALIBRATION DIST et CALIBRATION Z, permettant respectivement d'indiquer la longueur « physique » du segment de calibration (ce qui permet d'ajuster l'échelle du nuage de points), ainsi que de corriger l'erreur de translation introduite par la hauteur de l'objet de référence. La figure 9.20 permet de comparer le nuage de points « calibré » (CALIBRATED) ainsi obtenu avec le nuage de points projeté.

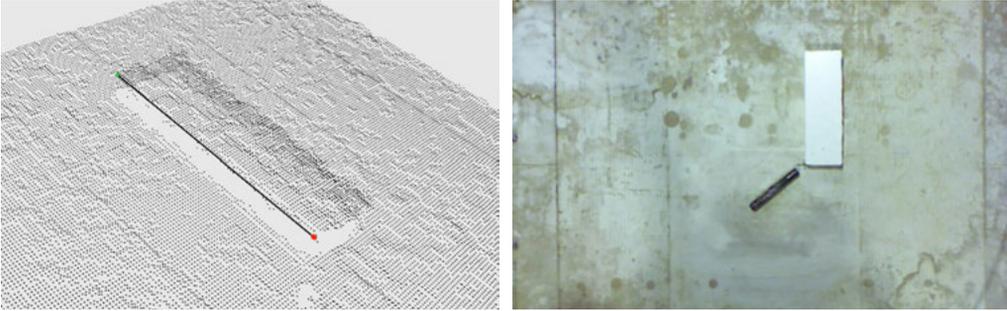


Fig. 9.19 — Procédure de calibration du nuage de points. Un objet parallélépipédique est utilisé pour indiquer l'orientation, l'origine ainsi que l'échelle du repère à calculer. Le feutre visible sur la figure de droite permet de repérer l'orientation du parallélépipède dans l'espace du nuage de points.

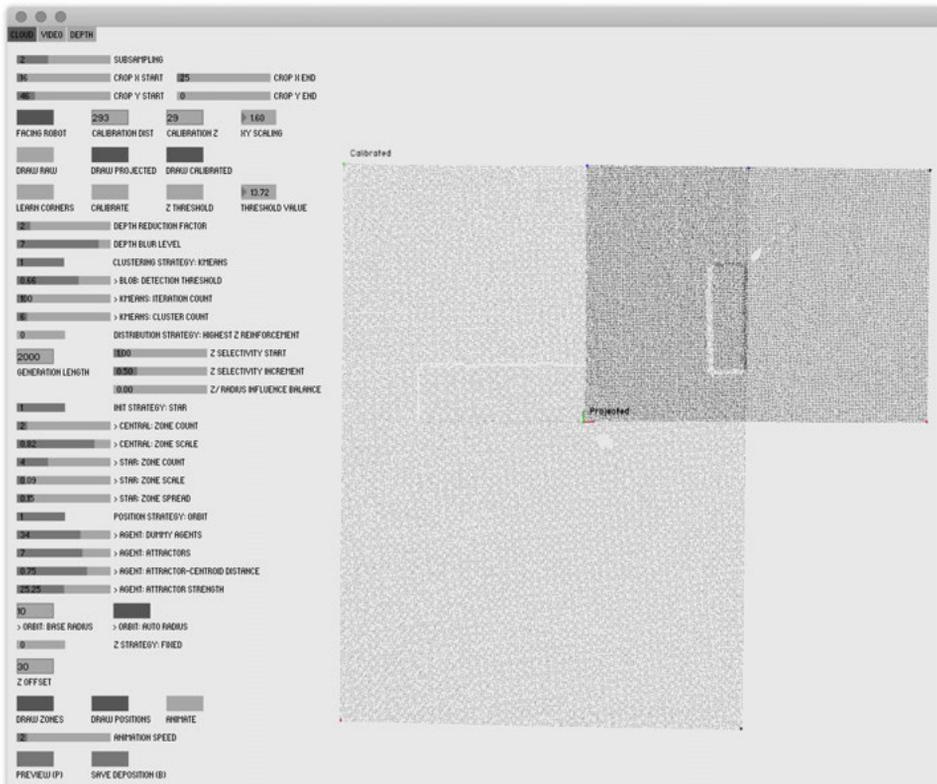


Fig. 9.20 — Affichage en vue zénithale des nuages de points projeté et calibré. Noter la dimension plus importante du nuage de points calibré ainsi que son orientation différente. Conformément à la calibration réalisée, l'origine du repère a été placée sur l'un des coins de l'objet parallélépipédique de référence.

Une dernière étape vise ensuite à soustraire les points correspondant au plan d'« origine » de la surface de travail, de sorte que la captation ne saisisse que les futures structures en argile qui seront déposées sur cette dernière. Dans cette optique, l'activation de l'option `Z THRESHOLD` permet de supprimer toutes les valeurs des points dont la coordonnée `z` est inférieure à un seuil, défini par le champ `THRESHOLD VALUE`. Pour régler ce seuil, le même objet de référence que celui utilisé lors de la calibration du nuage de points peut par exemple être utilisé : le seuil est alors progressivement augmenté de sorte à obtenir la disparition de l'ensemble des points correspondant au plan d'origine de la surface de travail, tout en préservant la partie supérieure de l'objet utilisé pour la calibration (figure 9.21).

### *b. Génération des zones de déposition initiales*

Une fois la calibration du nuage de points réalisée, le dispositif se trouve prêt à amorcer la production d'un artefact. Chacune des itérations successives du cycle de production va désormais donner lieu à une étape de déposition d'argile, au cours de laquelle le robot se trouvera conduit à suivre une ou plusieurs trajectoires de déposition indépendantes, ciblant différentes zones de l'espace de travail. Pour préparer les trajectoires de déposition suivies par le robot, il importe donc d'identifier un ensemble de « zones d'intérêt » à partir de la configuration actuelle de la scène captée par le capteur Kinect. Au cours d'une étape régulière du cycle de production, ces zones sont déterminées par une analyse rétroactive du nuage de points fourni par le capteur ; mais ce protocole ne peut bien entendu être appliqué pour la première étape du cycle, dans la mesure où la zone de travail se trouve alors entièrement vide<sup>44</sup>. Cette première étape, que nous pouvons qualifier d'étape d'initialisation, nécessite ainsi de générer des zones de déposition *ex nihilo*, dans le sens où celles-ci ne sont pas basées sur l'analyse rétroactive de formations précédemment obtenues. Les structures obtenues à partir de ces zones initiales doivent ainsi servir de base aux itérations ultérieures du cycle productif, et fournir des « prises » au développement de formations matérielles différenciées au sein de l'échantillon produit.

Différentes approches heuristiques de génération de zones de déposition peuvent être imaginées en ce sens. La version actuelle du logiciel propose deux procédures : `CENTRAL` et `STAR`. La procédure `CENTRAL` permet de créer des zones centrées sur la surface de travail disponible (figure 9.22) dont les dimensions peuvent être ajustées par le paramètre `CENTRAL: ZONE SCALE`. Le paramètre `CENTRAL: ZONE COUNT` permet de superposer plusieurs de ces zones, afin de don-

---

44. L'objet parallélépipédique utilisé pour la calibration a été retiré, et aucune structure d'argile n'a encore été déposée.

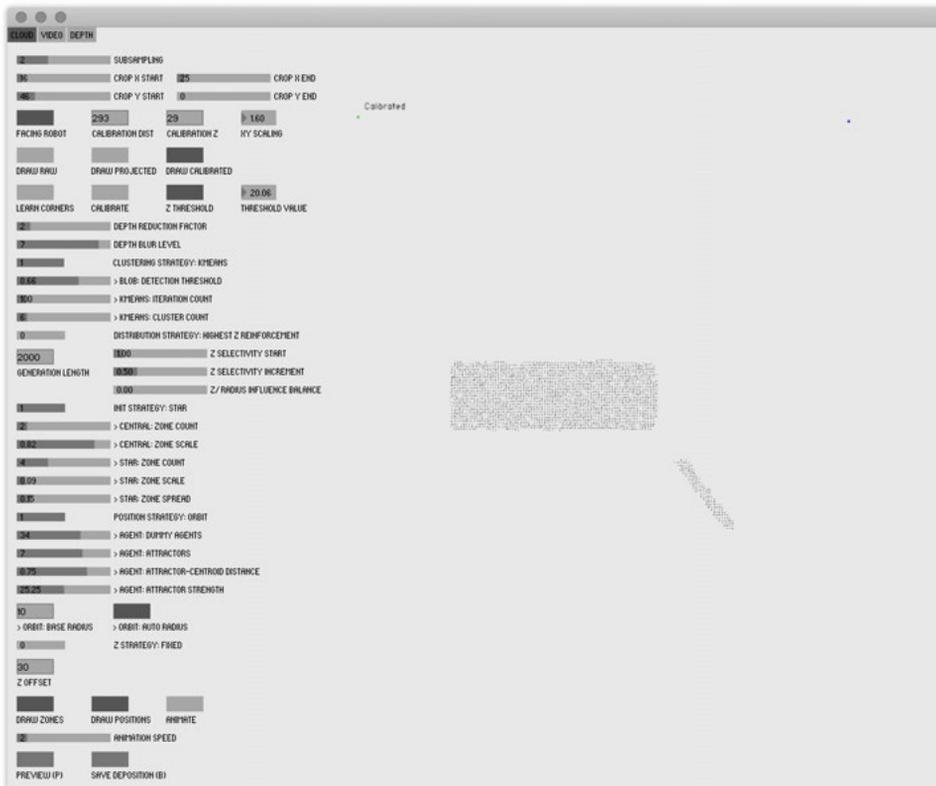


Fig. 9.21 — Affichage en vue zénithale du nuage de points calibré après application d’une opération de seuillage, de façon à supprimer les points correspondant au plan de de travail, tout en conservant ceux décrivant la partie supérieure de l’objet parallélépipédique utilisé pour la calibration.

ner lieu à autant de processus indépendants de génération de trajectoires. La procédure STAR permet alternativement de créer des zones réparties selon une structure en étoile centrée sur la surface de travail (figure 9.23). Le paramètre STAR: ZONE COUNT contrôle le nombre de zones ainsi produites, tandis que les paramètres STAR: ZONE SCALE et STAR: ZONE SPREAD contrôlent respectivement leur dimension, ainsi que leur distance de positionnement par rapport au centre de la surface de travail.

### c. Génération des trajectoires de déposition

Sur la base des premières zones générées à l’aide des procédures décrites précédemment, des trajectoires de déposition peuvent ensuite être calculées et converties en instruction de contrôle. Les paragraphes suivants introduisent la procédure générale de génération de trajectoires de déposition, identique que ces trajectoires soient obtenues à partir de zones initiales générées de ma-

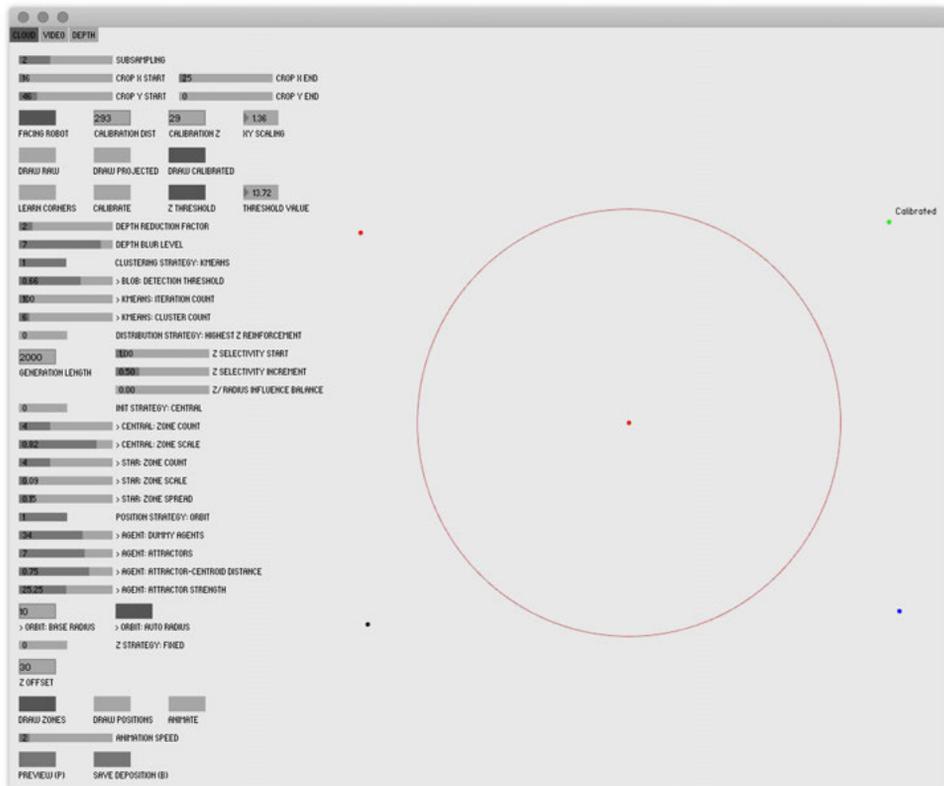


Fig. 9.22 — Génération de quatre zones de dépôt superposées à l'aide de la procédure CENTRAL.

nière heuristique, ou procèdent d'une analyse rétroactive de structures d'argile précédemment déposées. Par souci de continuité avec notre propos, nous illustrerons visuellement cette procédure générale en nous basant sur la donnée de zones de dépôt générées de manière heuristique; la dernière partie de cette section illustrera leur action sur des zones de dépôt obtenues « rétroactivement ».

Le logiciel propose deux types de procédures de génération de trajectoires : ORBIT et AGENT. Chacune de ces procédures exploite deux caractéristiques géométriques des zones de dépôt : un « centre de masse » (barycentre)  $G$  ainsi qu'une mesure d'extension spatiale  $r$ . Ces zones de dépôt sont traitées par les deux algorithmes de génération de trajectoires (et affichées par le logiciel) comme des disques horizontaux, de rayon  $r$ , placés à différentes hauteurs selon la position de leur barycentre  $G$ <sup>45</sup>.

45. Nous préciserons par la suite le mode de calcul de ces propriétés dans le cadre de zones de dépôt déterminées de manière rétroactive; pour les zones de dépôt initiales

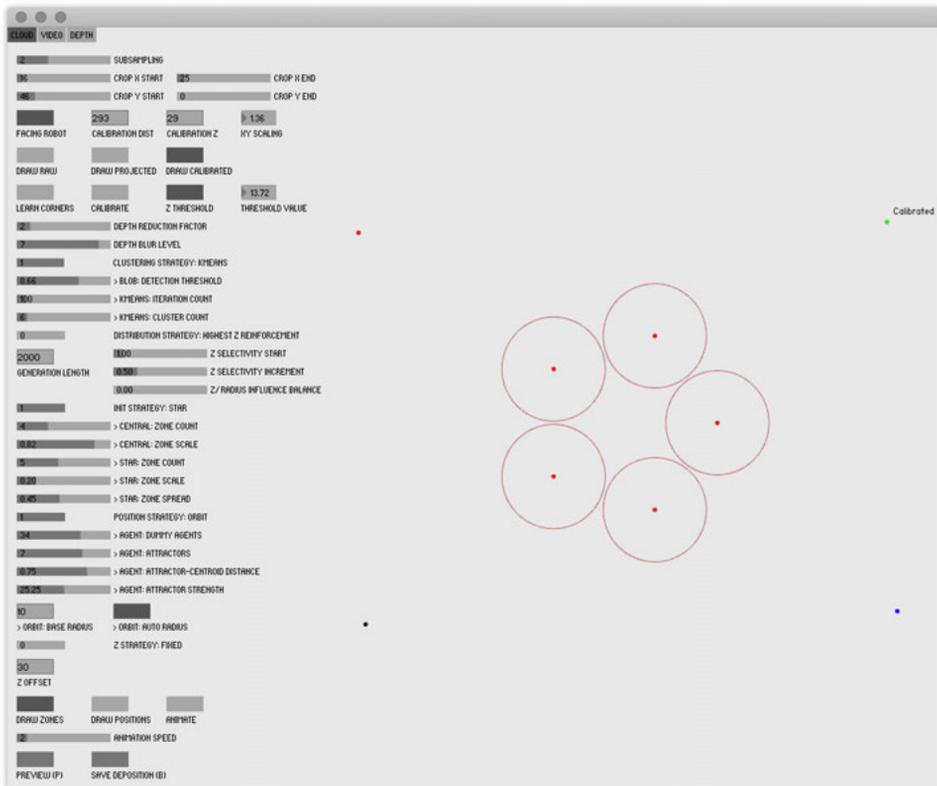


Fig. 9.23 — Génération de cinq zones de déposition « en étoile » à l'aide de la procédure STAR.

La procédure ORBIT permet de générer des trajectoires circulaires centrées sur chacune de ces zones de déposition. L'option ORBIT: AUTO RADIUS permet d'ajuster automatiquement le rayon de ces trajectoires au rayon  $r$  de la zone de déposition correspondante ; lorsque cette option est désactivée, l'algorithme utilise une valeur de rayon prédéfinie, fixée par le champ ORBIT: BASE RADIUS.

À l'instar de la simulation implémentée dans notre projet *Two*, la procédure AGENT se base ici sur un modèle dérivé de l'algorithme de Craig W. Reynolds pour procéder à la génération des trajectoires de déposition. Les effets collectifs d'agrégation simulés par cet algorithme sont obtenus à partir de règles individuelles de comportement, basées sur la capacité des agents à opérer une « conduite » (*steering*) vers une position cible à atteindre (figure 9.24).

auxquelles nous nous intéressons ici,  $r$  et  $G$  sont fixés en fonction des paramètres choisis par l'utilisateur lors de la configuration des procédures CENTRAL ou STAR.

Étant donné un agent situé à la position  $P$ , doté d'une vitesse  $\vec{v}$  et souhaitant atteindre une position cible  $P_0$ , la « force »  $\vec{s}$  de conduite ressentie par l'agent se calcule par la formule<sup>46</sup> :

$$\vec{s} = \frac{v_{\max}}{\| \overrightarrow{PP_0} \|} \cdot \overrightarrow{PP_0} - \vec{v},$$

où  $v_{\max}$  désigne la vitesse maximale de déplacement de l'agent. Cette force de conduite se calcule ainsi sur la base d'un mécanisme de *rétroaction* : à tout moment, la vitesse actuelle de l'agent ( $\vec{v}$ ) est comparée (soustraite) à une vitesse « idéale », dotée d'une amplitude maximale ( $v_{\max}$ ) et pointant vers la position  $P_0$  à atteindre ; la valeur obtenue fournit ensuite une force permettant de « corriger » la vitesse de l'agent. Ce mécanisme de *rétroaction* permet ainsi un ajustement progressif de la trajectoire de l'agent, résultant en un comportement d'apparence « naturel ». En pratique, la valeur de la force de conduite  $\vec{s}$  peut être limitée en lui imposant une amplitude maximale, permettant de contrôler l'aspect de la trajectoire suivie par l'agent pour rejoindre  $P_0$  (figure 9.25).

Sur la base de ce principe fondamental de conduite, trois comportements principaux du système d'agents peuvent ensuite être calculés : l'alignement, la cohésion et la séparation. L'*alignement* décrit la tendance d'agents voisins à homogénéiser localement leur vitesse de déplacement (en direction et en amplitude). Pour un agent donné de la simulation, la procédure de calcul de la force d'alignement se base sur l'estimation de la vitesse moyenne des agents situés dans son voisinage proche, suivie du calcul d'une conduite  $\vec{s}$  à partir de la direction pointée par cette vitesse moyenne<sup>47,48</sup>. La valeur de la conduite ainsi obtenue est retournée par la procédure comme valeur de la force d'alignement ressentie par l'agent. La *cohésion* décrit la tendance des agents à se rapprocher spontanément de leurs voisins, afin de former des regroupements d'agents cohérents. La procédure de calcul de la force de cohésion se base, pour chaque agent, sur le calcul d'une conduite  $\vec{s}$  à partir d'une position cible correspondant à la position moyenne des agents voisins<sup>49</sup>. Enfin, la *séparation* décrit la

46. Daniel Shiffman, *The Nature of Code*, New York, l'auteur, 2013, p. 267.

47. *Ibid.*, p. 311.

48. La conduite décrit théoriquement l'ajustement de la trajectoire des agents vers une position cible  $P_0$ . Toutefois, dans la mesure où cette position cible sert, dans la formule de calcul de la conduite, à déterminer une vitesse « idéale » dont l'amplitude est fixée à  $v_{\max}$ , seule la *direction* pointée par cette position cible entre en compte en pratique dans le calcul. Il est donc possible d'appliquer la formule de calcul de la conduite à partir de la donnée d'un *vecteur*. Cette possibilité est mise à profit dans les procédures de calcul de l'alignement et de la séparation.

49. *Ibid.*, p. 312.

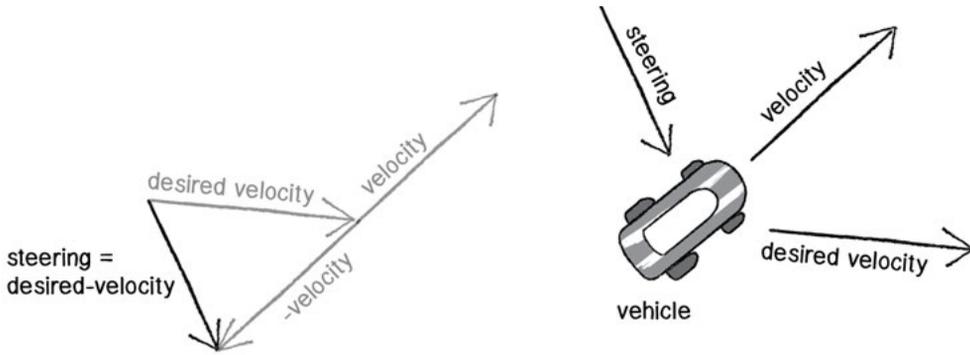


Fig. 9.24 — Illustration du comportement de « conduite » (source : <http://natureofcode.com/book/chapter-6-autonomous-agents>).

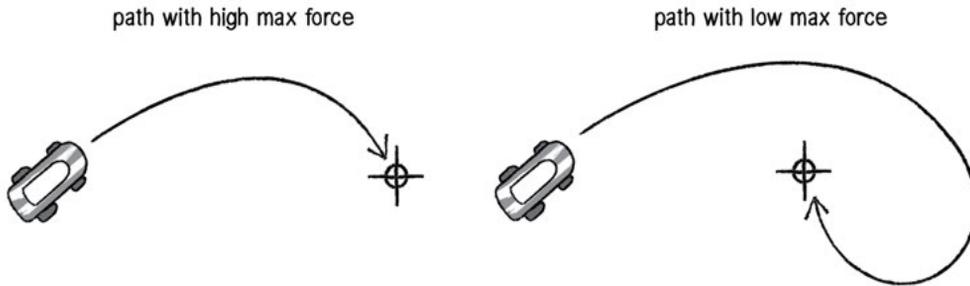


Fig. 9.25 — Contrôle de l’aspect des trajectoires suivies par un agent par réglage de la valeur maximale de la force de conduite (source : <http://natureofcode.com/book/chapter-6-autonomous-agents>).

tendance des agents à maintenir une distance minimale avec leurs plus proches voisins. La force correspondante est calculée, pour chaque agent, par l’estimation d’une conduite  $\vec{s}$  à partir d’une « position de fuite », définie comme l’opposé de la moyenne des vecteurs reliant l’agent à ses plus proches voisins<sup>50</sup>. La figure 9.26 présente schématiquement ces trois comportements.

Les effets relatifs de l’alignement, de la séparation et de la cohésion peuvent être pondérés au moment du calcul de la force totale appliquée à chaque agent, afin de privilégier l’un ou l’autre de ces comportements. Par ailleurs, d’autres paramètres peuvent être ajustés, tels que la distance définissant les limites du voisinage d’un agent donné. Dans notre implémentation de l’algorithme de Reynolds, nous avons fixé ces paramètres à des valeurs pré-établies, ajustées de manière empirique, dans l’optique de n’exposer via l’interface utilisateur de

50. *Ibid.*, p. 302.

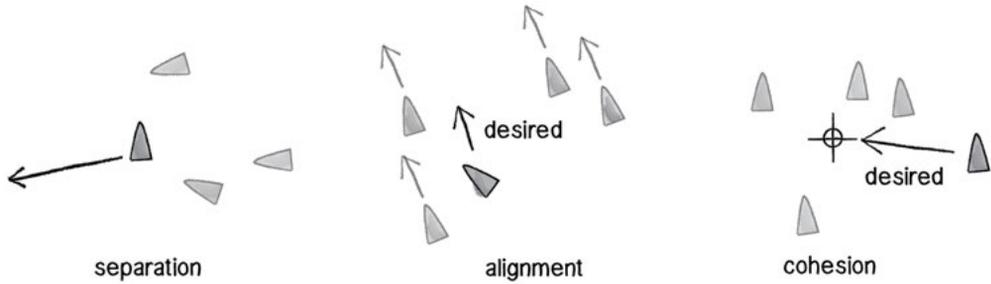


Fig. 9.26 — Illustration des comportements de séparation, d'alignement et de cohésion (source : <http://natureofcode.com/book/chapter-6-autonomous-agents>).

notre logiciel que des paramètres de plus « haut niveau » liés au fonctionnement d'ensemble de la procédure AGENT, décrit ci-dessous.

Pour chaque zone de déposition, la procédure AGENT commence par instancier un système multi-agents à partir de positions initiales aléatoirement réparties sur le contour de la zone. Chaque système se compose d'un agent « réel », dont la trajectoire fournit directement le parcours d'outil à transmettre au robot, ainsi que d'une population donnée d'agents « factices », ajustable à l'aide du paramètre AGENT: DUMMY AGENTS. Afin de maintenir chaque système d'agents en évolution au voisinage de sa zone de déposition correspondante, un ensemble d'« attracteurs » est placé à proximité du barycentre G de chaque zone : le nombre de ces attracteurs, leur distance par rapport à G, ainsi que la force de l'attraction exercée sont respectivement contrôlés par les paramètres AGENT: ATTRACTORS, AGENT: ATTRACTOR-CENTROID DISTANCE et AGENT: ATTRACTOR STRENGTH. En termes du vocabulaire introduit lors de notre discussion du concept de conduite, les attracteurs sont implémentés comme des positions « cibles » pour le système d'agents. Leur influence est alors ajustée en pondérant la valeur des forces de conduite qu'ils permettent d'induire par rapport à celles résultant des comportements d'interaction inter-agents (alignement, cohésion et séparation).

À tout moment, la trajectoire suivie par l'agent « réel » se trouve donc dépendante des interactions avec les agents « factices », ainsi qu'avec les attracteurs associés à la zone de déposition. Par le réglage de l'ensemble des paramètres de haut niveau exposés par l'interface, une large gamme de trajectoires peut être générée : la figure 9.27 montre un exemple de comportement ainsi obtenu par le système implémenté. Au cours de l'étape d'« initialisation » décrite ici, les trajectoires des agents « réels » restent confinées dans un plan horizontal, décalé verticalement d'une distance de vingt à quarante millimètres par rapport au barycentre de leurs zones de déposition respectives (elles-mêmes placées à hauteur de la surface de travail).

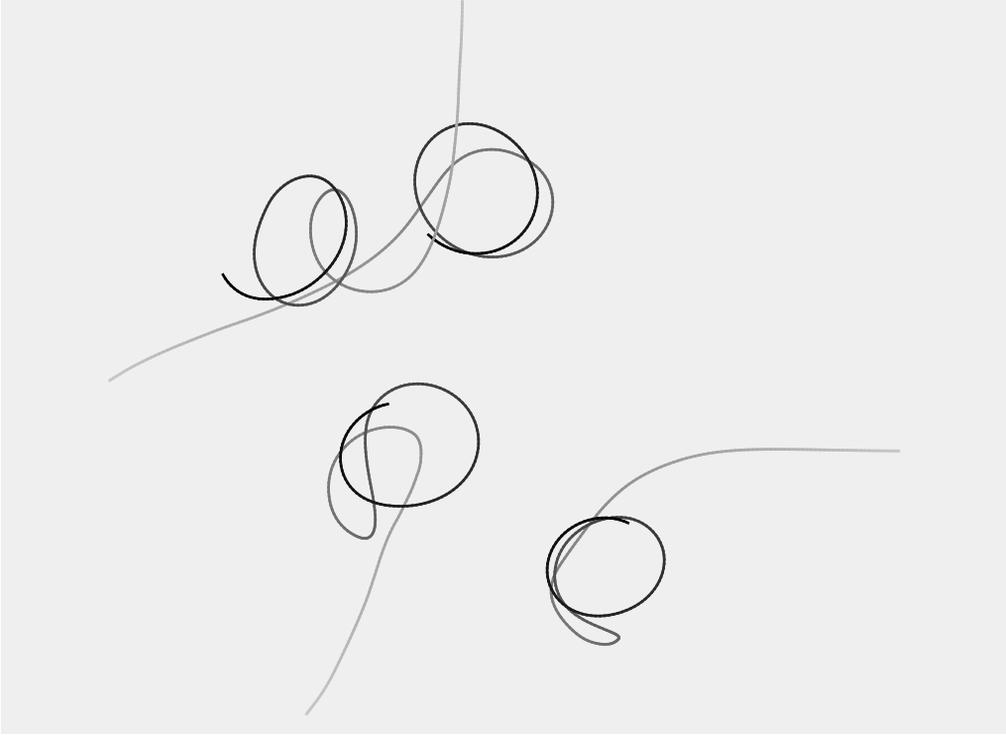


Fig. 9.27 — Exemple de trajectoires de déposition obtenues à l'aide la procédure AGENT. Quatre zones de déposition initiales ont été ici générées par la procédure CENTRAL.

À partir des trajectoires générées pour chacune des zones de déposition, le logiciel écrit ensuite les instructions de contrôle du robot dans le langage propriétaire PDL, développé par COMAU. Outre la problématique, relativement simple, de la mise en forme automatique de ces instructions, cette opération pose la question d'une conversion des trajectoires spatiales générées par notre logiciel en valeurs directement utiles au pilotage du robot. Une première solution pour obtenir ces valeurs consisterait à déterminer, pour chaque jeu de coordonnées  $(x, y, z)$  des points composant les trajectoires de déposition générées, les angles des six axes de rotation du robot. Cet objectif se rapporte à la question générale de la *cinématique inverse*, laquelle constitue l'une des problématiques les plus complexes dans le domaine du contrôle robotique. Extrêmement difficiles à résoudre dans le cas général d'un bras articulé à six degrés de liberté, les problèmes de cinématique inverse sont en pratique simplifiés dans le cas des bras dits à « poignet sphérique » : ce type courant de robots à six axes, auquel se rattachent les robots COMAU utilisés par digifab-TURING, se caractérise par la présence d'un point d'intersection commun aux trois derniers degrés de rotation du bras (c'est-à-dire aux degrés de rotation du « poignet »). En présence d'une telle configuration, des solveurs de cinématique inverse génériques peuvent être utilisés : les expériences précédemment menées

par l'équipe digifabTURING se basaient ainsi sur la librairie Lobster<sup>51</sup>, développée par Daniel Piker pour l'environnement Grasshopper. Dans le cadre de nos expériences, nous avons exploré une solution de contrôle alternative, exploitant un solveur de cinématique inverse directement intégré au système de pilotage du robot. La mise à profit de cette solution requérait de décrire la configuration spatiale de l'effecteur du robot à partir de trois composantes de translation, ainsi que de trois angles de rotation (angles d'Euler). Dans la mesure où notre scénario de déposition d'argile se basait, à tout moment, sur le maintien d'une orientation constante pour l'extrudeur (comme précisé dans la section 9.1), la spécification de la configuration spatiale de l'effecteur se réduisait dans notre cas à la transmission de ses trois composantes de translation, pour lesquelles les coordonnées des trajectoires générées par le logiciel pouvaient être directement utilisées. Grâce à cette procédure, la génération du code PDL a ainsi pu être prise en charge directement dans notre logiciel, sans qu'il ne soit nécessaire de recourir à une solution de conversion externe.

#### *d. Calcul rétroactif des zones de déposition*

Au terme de l'étape de déposition initiale décrite précédemment, le robot se place automatiquement en posture d'acquisition afin de préparer l'itération suivante du cycle de production. Après numérisation de la zone de travail, le logiciel affiche alors un nuage de points permettant d'observer la configuration des structures nouvellement déposées (figure 9.28). Dans la logique itérative propre à notre scénario de production, l'enjeu principal réside à présent dans la génération de nouvelles trajectoires de déposition à partir d'une analyse rétroactive de ces structures. Cette étape d'analyse occupe un rôle important dans la chaîne des procédures computationnelles examinées dans cette section : elle y introduit en effet, pour la première fois, l'idée d'un comportement rétroactif, composante essentielle de notre approche visant à « implémenter » un régime productif auto-maintenu.

Cette procédure d'analyse doit permettre d'identifier un ensemble de zones de déposition potentielles, à partir desquelles l'une des deux procédures de génération de trajectoires implémentées (ORBIT ou AGENT) pourra être appliquée. En accord avec notre idée originale, présentée dans la section 9.1, de chercher à induire une expression localisée des capacités de déformation de l'argile, notre approche s'est orientée vers l'utilisation d'un algorithme statistique de « partitionnement » (*clustering*), permettant de déterminer un ensemble de « zones » ou de partitions (*clusters*) à partir d'un jeu de données spatialement réparties. En règle générale, les algorithmes de partitionnement visent à inférer un en-

---

51. <http://www.grasshopper3d.com/group/lobster> (consulté le 16 mai 2017).

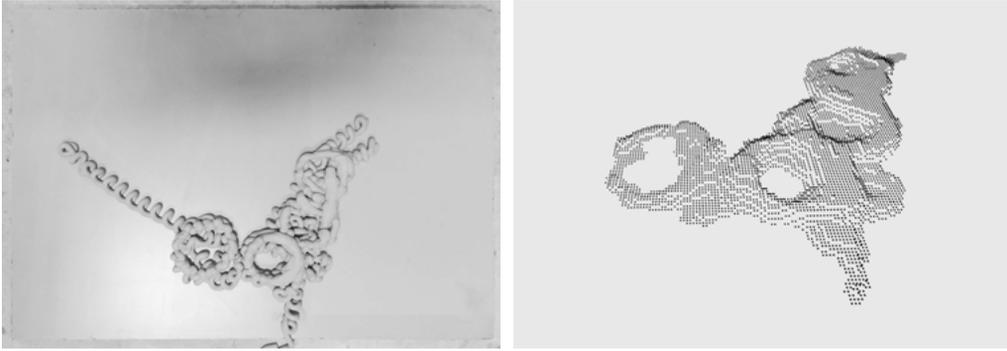


Fig. 9.28 — Structures d'argile et nuage de points obtenus au terme d'une première déposition réalisée par le robot.

semble restreint de représentations significantes (classes) à partir d'un grand nombre de points de données<sup>52</sup>. Il est typiquement attendu que les classes ainsi identifiées décrivent l'« essence » des données observées : l'enjeu d'un processus de partitionnement pourrait ainsi être, étant donné une collection de points de données composée d'un ensemble de mesures anatomiques réalisées sur deux espèces d'animaux, d'inférer à partir des données deux classes correspondant aux espèces réellement présentes. De telles méthodes de partitionnement sont couramment utilisées à des fins de classification : après une première phase d'« apprentissage » des classes à partir d'un jeu de données initiales, tout nouveau point peut ensuite être classifié en fonction de sa similarité respective par rapport à chacune des classes apprises.

Notre utilisation d'un algorithme de partitionnement s'inscrit dans une perspective relativement différente : s'il s'agit bien pour nous de chercher à identifier un ensemble de zones « saillantes » du nuage de points, il n'est en aucun cas question de chercher à apprendre l'« essence » des structures d'argiles obtenues. En d'autres termes, nous ne cherchons pas à construire une représentation numérique « fidèle » des structures analysées, mais nous intéressons en premier lieu aux actions et comportements matériels induits par les « classes » détectées par notre algorithme. Notre utilisation du partitionnement statistique s'inscrit donc dans une logique résolument *performative*, au sein du cadre précis d'une mise à l'épreuve de notre idée d'auto-entretien. Il s'agit ainsi d'abord pour nous d'évaluer la procédure de partitionnement implémentée sur la base de sa capacité à contribuer à la « régénération » itérative des relations productives entre code, robot et matériau — autrement dit, sur la base de sa capacité à « poser les bases » d'une nouvelle étape de dépositi-

52. Cette opération de *partition* est la plupart du temps qualifiée de « partitionnement » dans la littérature informatique. Nous adoptons ici cet usage.

tion à travers la prise en compte des dépôts antérieurs, dans l'objectif de conduire à une différenciation progressive des propriétés matérielles au sein de l'échantillon produit.

En cohérence avec cette compréhension performative de l'approche du partitionnement statistique, nous nous sommes orientés en priorité vers un algorithme simple, susceptible d'une mise en œuvre rapide et dotée d'un comportement appréhendable de manière intuitive. Notre choix s'est ainsi porté sur l'algorithme  $k$ -moyennes. Cet algorithme, initialement introduit en 1967 par James MacQueen<sup>53</sup>, permet de partitionner un ensemble de points en  $k$  ensembles de sorte à minimiser la distance moyenne entre les points à l'intérieur de chaque partition. À partir de la donnée  $k$  du nombre de partitions à construire, l'algorithme sélectionne aléatoirement  $k$  points de données, jouant le rôle d'une première estimation des barycentres de chaque partition. Les populations de ces partitions sont ensuite construites en affectant chaque point en fonction de sa proximité avec les barycentres estimés. Une fois tous les points affectés, le barycentre de chaque partition est mis à jour. Ces deux dernières étapes (affectation des points aux partitions et ré-estimation de leurs barycentres) sont ensuite répétées jusqu'à convergence de l'algorithme.

L'une des principales caractéristiques du partitionnement en  $k$ -moyennes réside dans la nécessité d'effectuer un choix *a priori* quant au nombre de partitions à rechercher. Ce critère constituait un facteur potentiellement problématique pour nos expériences : dans un cas idéal, nous aurions en effet souhaité nous doter d'une solution de partitionnement capable d'identifier, par elle-même, le nombre « optimal » de zones d'intérêt du nuage de points<sup>54</sup>. Mais

---

53. James MacQueen, « Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations », dans *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics*, Berkeley, University of California Press, 1967, p. 281–297.

54. Nous avons cherché à concevoir une telle solution au cours de nos recherches, et implémenté en ce sens une procédure expérimentale que nous décrivons ici brièvement. Cette procédure se base sur une classe d'algorithmes dont le nom anglais (*blob detection*) peut se traduire en français par « détection de zones d'intérêt ». Ce type d'algorithmes, fréquent dans le domaine de la « vision par ordinateur » (*machine vision*), travaille sur une image bidimensionnelle afin d'en extraire des zones polygonales, correspondant, par exemple, à des regroupements cohérents de points de forte intensité lumineuse : l'utilisation de ce type d'algorithme implique donc de travailler sur la donnée d'une carte de profondeur, et non sur la donnée tridimensionnelle du nuage de points. La procédure expérimentale que nous avons implémentée se base actuellement sur une version reconstruite de la carte de profondeur. Visible dans le mode DEPTH du logiciel, cette reconstruction tient compte de l'opération de seuillage introduite dans les traitements du nuage de points, et présente l'avantage de supprimer la surface de base de la zone de déposition : ceci permet aux structures d'argile, représentées sous la forme de zones claires, de se détacher sur un fond entièrement noir, facilitant ainsi leur détection. Ces structures visuelles sont ensuite identifiées à l'aide de l'algorithme de « blob detection ». Si cette solution présente en théorie l'avantage d'une détermination automatique du nombre

cette idée d'un algorithme capable de sélectionner de lui-même le nombre de partitions recherchées mérite cependant d'être considérée avec précaution. Nous pouvons tout d'abord noter qu'elle constitue une question notoirement difficile dans le champ de l'informatique : ainsi, s'il est vrai l'algorithme  $k$ -moyennes constitue l'une des solutions de partitionnement les plus élémentaires (tout en étant largement utilisée), la plupart des algorithmes les plus avancés ne peuvent également fonctionner sans la donnée d'un nombre pré-établi de partitions. Cette contrainte résulte, en grande partie, de la difficulté à définir de manière générale un critère d'optimalité du résultat fourni par les algorithmes de partitionnement. Des solutions existent pour définir une telle optimalité en termes statistiques (comme l'analyse par silhouette<sup>55</sup>), mais ne sauraient prétendre constituer une solution valable dans l'ensemble des cas d'application possibles de ces algorithmes. Le cadre précis de nos expériences pose, de fait, la question même de la possibilité de définir un tel critère d'optimalité : dans la mesure où les partitions déterminées par notre logiciel fournissent la base d'un comportement matériel émergent, il semble par exemple difficile d'évaluer la pertinence de ces partitions à partir de simples critères statistiques. Tout en notant l'existence d'une problématique liée au choix *a priori* du nombre de partitions, il convient donc, à nouveau, de souligner l'orientation *performative* de notre approche : nous n'envisageons pas l'algorithme  $k$ -moyennes comme une méthode permettant d'abstraire une représentation « fidèle » des structures d'argile numérisées, mais comme un élément permettant de catalyser, dans le cadre d'un processus de maintenance rétroactif, l'émergence de structures matériellement différenciées.

Dans cette perspective, nous avons adopté dans nos expériences une approche pragmatique, en fixant, pour la plupart de nos sessions de fabrication, le nombre de partitions de l'algorithme  $k$ -moyennes (ajustable par le paramètre `KMEANS: CLUSTER COUNT`) à une valeur égale au nombre de zones de déposition initiales utilisées. Cette approche a initialement été motivée par notre curiosité pour les phénomènes de « décalage » susceptibles d'être observés, au cours des étapes successives de la production, par rapport à la première morphologie d'« amorçage » déposée par le robot<sup>56</sup> — phénomènes d'autant plus

---

de zones d'intérêt à détecter, nous n'avons en pratique pu en tirer de résultats suffisamment convaincants au cours de nos expériences. Nous la mentionnons donc simplement ici comme cible potentielle d'un travail à poursuivre sur notre projet.

55. [https://en.wikipedia.org/wiki/Silhouette\\_\(clustering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Silhouette_(clustering)) (consulté le 6 juin 2017).

56. En raison de la nature peu structurée de la première déposition, les « cibles » proposées à la suite de cette dernière par l'algorithme  $k$ -moyennes-moyennes (Algorithme) s'avèrent fréquemment distinctes des zones de déposition initiales, générées par les procédures `CENTRAL` ou `STAR`. Cette déviation, alliée à l'expression autonome des propriétés plastiques de l'argile, contribue à la formation émergente de nouvelles morphologies.

appréciables que le nombre de zone de dépositions à détecter est maintenu constant à chaque étape.

La figure 9.29 montre les quatre zones de déposition générées par notre procédure de partitionnement, à partir du nuage de points visible sur la figure 9.28. Sur la base des  $k$  partitions spatiales du nuage de points fournies par l'algorithme  $k$ -moyennes, un second algorithme calcule ensuite le barycentre de chaque partition obtenue, ainsi que les dimensions de sa « boîte d'encombrement » (*bounding box*), définie comme le plus petit volume cubique contenant l'ensemble des points attribués à cette partition. Ces valeurs permettent de définir « géométriquement » les zones de déposition à proprement parler.

Sur la base des zones de déposition ainsi obtenues, le logiciel génère ensuite les trajectoires robotiques nécessaires à la réalisation de la prochaine étape de déposition. La procédure utilisée dans cette optique s'avère similaire à celle décrite précédemment, lors de notre présentation de l'étape d'initialisation : la génération des trajectoires s'opère ainsi selon la procédure ORBIT ou AGENT, en cohérence avec l'option sélectionnée pour la déposition initiale. La seule différence notable par rapport à l'étape d'initialisation réside désormais dans la possibilité d'activer, via le réglage `Z STRATEGY: AUTO`, un ajustement automatique de la hauteur locale de chaque trajectoire de déposition en fonction de la topographie du nuage de points. Lorsque ce réglage est activé, chaque position d'une trajectoire générée, déjà décalée d'une hauteur fixe (donnée par le paramètre `Z OFFSET`) par rapport à la hauteur de la zone de déposition correspondante, est translatée par l'addition de la hauteur du point numérisé dont elle se trouve le plus proche. Nous obtenons alors, en théorie, des trajectoires prévues pour maintenir un écart constant avec les structures d'argile survolées. Cette procédure d'adaptation automatique du profil de hauteur des trajectoires à la topographie de l'artefact a notamment été introduite pour permettre une sélection relativement libre du paramètre `Z OFFSET`, sans qu'il ne soit nécessaire de prévoir à cette endroit l'éventualité d'une collision potentielle entre la buse de l'extrudeur et certaines structures d'argile existantes<sup>57</sup>. La figure 9.30 présente les trajectoires obtenues par la stratégie AGENT augmentée de cette procédure, sur la base des zones de déposition visibles sur la figure 9.29.

#### e. *Distribution sélective du volume total d'argile déposé*

Au cours de nos premières expériences avec l'algorithme de partitionnement par  $k$ -moyennes, Il nous est progressivement apparu important de dis-

---

57. En pratique, des imprécisions liées à la procédure de numérisation empêchent de se fier entièrement à ce mécanisme. Cette imprécision ne s'est pas avérée rédhibitoire, car nous avons dans tous les cas conservé une valeur non nulle du paramètre `Z OFFSET` dans chacune de nos expériences.

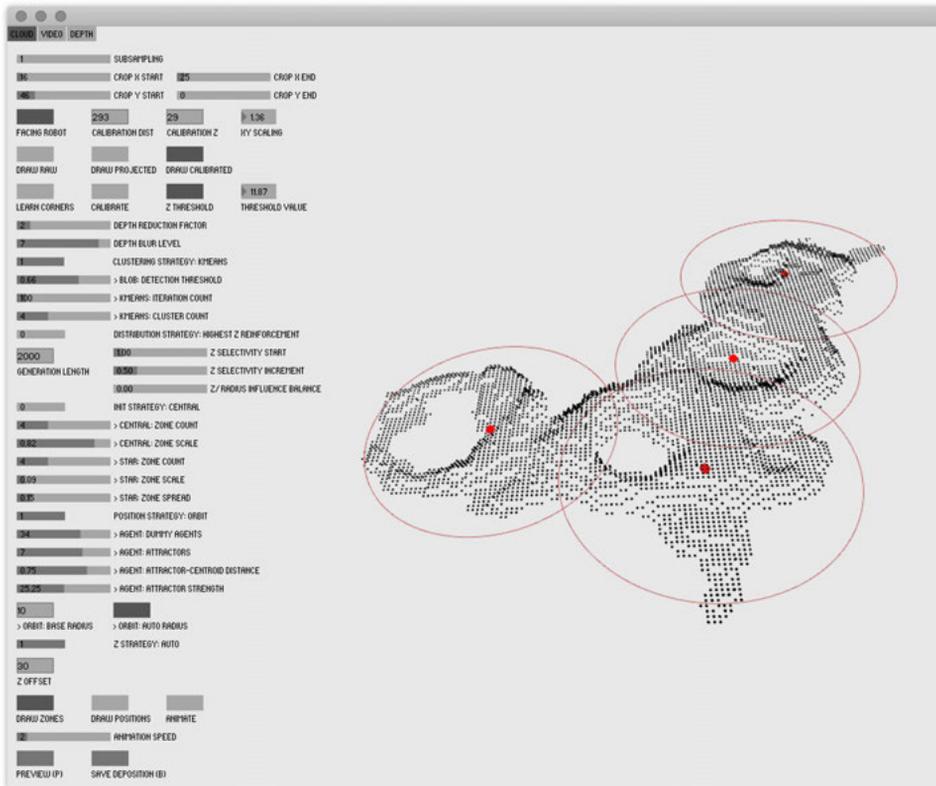


Fig. 9.29 — Zones de déposition générées par l'algorithme *k*-moyennes.

poser d'une procédure capable de pondérer l'influence des partitions détectées par l'algorithme en fonction de certains critères liés à l'état de différenciation matérielle des zones détectées. Il ne s'agissait pas ici de réactualiser le projet d'une sélection automatique du nombre « optimal » de partitions à utiliser à chaque itération, mais d'être capable d'« ignorer » progressivement les partitions les moins pertinentes au vu de l'évolution concrète de la morphologie de l'échantillon — de sorte que le comportement de notre logiciel puisse *s'adapter* de plus en plus finement aux structures matérielles formées au cours des étapes successives de la production.

Pour ce faire, nous avons implémenté une procédure visant à distribuer, à chaque itération du cycle de production, l'ensemble du volume total d'argile à déposer parmi les différentes zones potentielles détectées par l'algorithme. En concevant cette procédure de distribution de sorte que son action s'avère progressivement plus favorable à un certain type de zones (autrement dit, que certaines zones sélectionnées reçoivent proportionnellement une plus grande quantité de matière), nous disposons ainsi d'une manière simple d'orienter progressivement la procédure de déposition vers les propriétés morpholo-

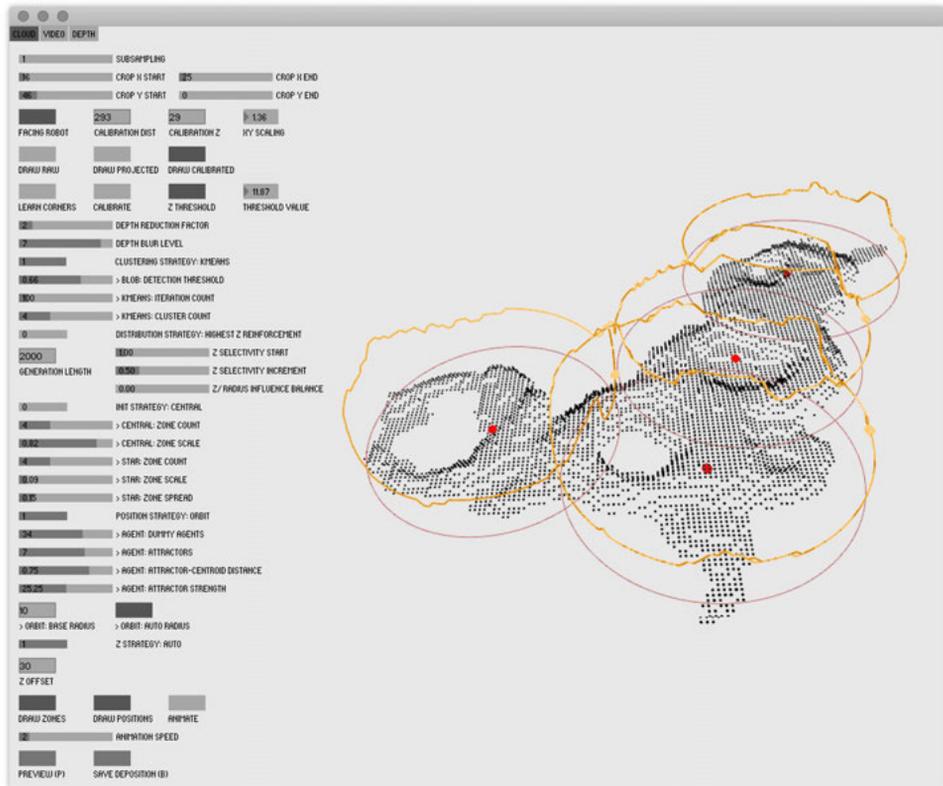


Fig. 9.30 — Trajectoires de déposition générées par la procédure AGENT sur la base du partitionnement réalisé par l’algorithme  $k$ -moyennes.

riques les plus saillantes de l’artefact. La procédure que nous avons conçue en ce sens, composante essentielle du processus de maintenance de notre dispositif, s’inscrit en lien direct avec notre hypothèse d’une capacité à induire une différenciation matérielle progressive sur la base d’une première déposition peu différenciée. Elle vise ainsi à « encourager » l’émergence progressive de structures caractérisées par une densité matérielle croissante, en dirigeant progressivement l’ajout de matière sur les zones les plus « prometteuses » à cet égard.

Cette concentration progressive de la déposition sur un nombre de plus en plus restreint de zones augmente par la suite, en retour, les chances de produire des effets de « déformation » liés à la plasticité de l’argile, entraînant finalement une différenciation de l’échantillon en termes de textures et d’articulation matérielles. La procédure de distribution sélective implémentée dans notre logiciel exploite à ce titre le potentiel morphogénétique induit par une variation progressive de la distance d’extrusion (définie par l’écart entre la buse de l’extrudeur et la plus proche surface d’argile située à la verticale de celui-ci)

au cours d'une même déposition. Comme précisé précédemment, le profil de hauteur des trajectoires de déposition générées (constant ou adapté à la topographie de l'échantillon) est fixé au début de chaque étape de déposition, et n'évolue pas au cours de cette étape (par contraste avec une imprimante 3D classique, augmentant régulièrement la hauteur de sa buse après déposition de chaque « couche » de la pièce imprimée). Ce choix stratégique, peu influent au cours des premières dépositions réalisées (en raison d'une répartition « lâche » de la masse d'argile déposée), devient central lors d'itérations plus avancées du cycle de production, lorsque la procédure de distribution sélective décrite ci-dessus entraîne l'allocation d'une grande quantité d'argile au sein d'une même zone. En vertu de la masse d'argile ajoutée, la distance d'extrusion se trouve mécaniquement conduite à diminuer au cours d'une même déposition : lorsque les quantités d'argile apportées sont suffisamment importantes, il devient ainsi fréquent que la buse de l'extrudeur finisse par entrer en contact avec le matériau ajouté, produisant des effets de « compression », ou de « nivellement » de l'argile — autant de possibilités morphogénétiques qui nous intéressent par leur capacité à différencier les zones au sein desquelles elles s'expriment par rapport aux structures déposées lors d'itérations antérieures. Ces différents effets seront notamment illustrés dans la section suivante, présentant certains échantillons matériels obtenus au cours de nos expériences.

En pratique, la procédure de distribution sélective de la quantité totale d'argile déposée intervient au moment de générer les nouvelles trajectoires de déposition, à partir de la donnée des zones détectées par l'algorithme de partitionnement. Le mécanisme de distribution à proprement parler implique le calcul d'une « récompense » pour chaque zone, déterminée en fonction de la hauteur du barycentre de cette dernière<sup>58</sup>, ainsi que du nombre d'itérations du cycle productif déjà réalisées dans l'expérimentation en cours. Pour chaque itération du cycle, cette récompense est calculée par une fonction de la forme  $r = z^\alpha$ , où  $r$  représente la récompense attribuée à une zone de déposition donnée,  $0 < z \leq 1$  la hauteur du barycentre de cette zone (normalisée relativement à la hauteur du barycentre de la zone la plus haute), et  $\alpha > 1$  représente un paramètre d'ajustement de la sélectivité de la procédure de déposition. Après avoir calculé la valeur de la récompense pour chacune des zones de déposition, l'algorithme divise les différentes valeurs de  $r$  obtenues par la somme de toutes

---

58. Nous utilisons ici la hauteur du barycentre des zones détectées comme indicatif de la nature plus ou moins « différenciée » des structures d'argile décrites par ces zones. Ce choix se base sur le constat que des structures peu différenciées, comme celles obtenues au cours de la première déposition, se caractérisent par une articulation essentiellement horizontale. En d'autres termes, nous comprenons ici avant tout la notion de structures émergentes comme celle de structures ayant été capables d'émerger « en hauteur », à partir d'une première forme de structuration horizontale de l'échantillon.

les récompenses attribuées, afin de calculer la proportion du nombre total de pas de déposition à attribuer à chaque zone<sup>59</sup>.

La figure 9.31 présente l'aspect de la fonction de récompense pour quatre valeurs différentes du paramètre  $\alpha$ . On constate ici que si les zones de déposition les plus hautes se trouvent toujours favorisées par rapport aux zones les plus basses (la fonction est croissante sur l'intervalle  $[0, 1]$ ), cet effet s'accroît lorsque le paramètre  $\alpha$  augmente (la convexité de la fonction s'accroît lorsque  $\alpha$  augmente, pour  $\alpha > 1$ ). Pour une valeur élevée de ce paramètre, les récompenses attribuées à toute zone de hauteur suffisamment inférieure à 1 (autrement dit, suffisamment inférieure à la hauteur maximale détectée, normalisée par définition à la valeur 1) deviendront ainsi proches de zéro, conduisant à l'attribution d'une quantité faible ou nulle d'argile à ces zones. En augmentant progressivement la valeur du paramètre  $\alpha$  au cours d'une même expérience, nous pouvons ainsi induire une sélectivité croissante de la procédure de distribution de la quantité totale d'argile déposée, conduisant à terme à concentrer l'effet de la déposition sur les structures matérielles de plus grande hauteur. En pratique, nous avons le plus souvent utilisé une valeur initiale de  $\alpha = 1$ , incrémentée d'un pas de 0,25 ou 0,5 à chaque itération du cycle de production. Ces valeurs peuvent être ajustées à travers les paramètres Z SELECTIVITY START et Z SELECTIVITY INCREMENT de l'interface graphique.

#### f. Itération

Chaque nouvelle itération du cycle de production se caractérise par une mise en œuvre successive des procédures de calcul rétroactif des zones de déposition, de distribution sélective du volume total d'argile déposé, et de génération des trajectoires.

### 9.4 Résultats expérimentaux et discussion

Cette section se propose de discuter une sélection d'échantillons matériels produits au cours de nos expérimentations. Il s'agit ici pour nous, avant tout, de défendre l'idée selon laquelle certaines déclinaisons du processus de maintenance implémenté dans *Unspecified Clay* conduisent effectivement à la réalisation d'une forme d'auto-maintenance, vérifiée par le constat selon lequel ce processus parvient à induire une différenciation progressive des qualités maté-

---

59. Pour chaque itération, la quantité totale d'argile déposée est représentée par le nombre total de « pas » (*steps*) géométriques calculés par la procédure de génération de trajectoires de déposition. Ce nombre, fixé par le paramètre GENERATION LENGTH, est maintenu constant au cours d'une expérience donnée. En attribuant de manière égale 2000 pas de déposition à quatre zones détectées, nous obtenons ainsi, par exemple, 500 pas pour chaque zone.

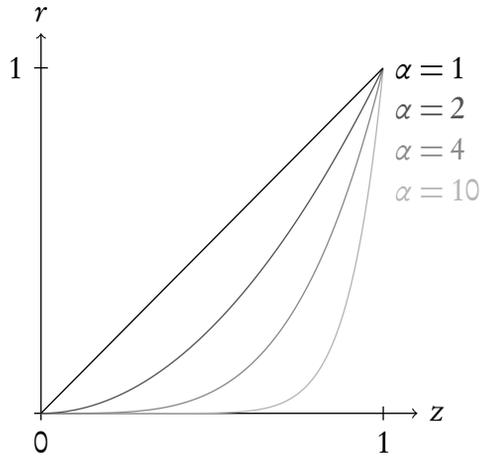


Fig. 9.31 — Tracé de la fonction de récompense pour différentes valeurs de  $\alpha$ .

rielles des artefacts produits. Notre discussion restera ainsi focalisée sur l’observation de ces qualités, que nous tâcherons d’interpréter en tant qu’effet des différentes procédures décrites dans la section 9.3 (dont la combinatoire constitue les différentes déclinaisons du processus de maintenance « d’ensemble » du dispositif). Cette première discussion se concentrera ainsi, à dessein, sur les aspects *pratiques* de la notion d’auto-maintenance. La section 10.3 nous fournira l’occasion de revenir sur *Unspecified Clay* selon un angle plus conceptuel, en considérant cette fois la notion d’auto-maintenance comme une modalité de compréhension du cadre de *recherche instrumentale* dont relève ce projet — ce qui nous conduira, notamment, à analyser non seulement les composantes *matérielles* des relations productives à l’œuvre, mais à nous intéresser également aux conditions de notre propre intégration, en tant que concepteur et chercheur, au réseau productif constitué par le projet.

La figure 9.32 présente un échantillon produit au cours de la série d’expériences d’octobre 2016, au terme d’une étape d’initialisation (étape n° 0), suivie de quatre itérations successives du cycle de production rétroactif (étapes n°s 1 à 4). Cette expérience a mobilisé la procédure de génération de trajectoires AGENT, ainsi qu’une procédure d’initialisation basée sur la procédure CENTRAL. La figure 9.33 présente les trajectoires générées à l’occasion de l’étape d’initialisation, ainsi que les structures matérielles obtenues au terme des dépôts correspondants. Après une première phase d’« approche », ces trajectoires prennent l’aspect d’orbites quasi-circulaires<sup>60</sup>, de faible amplitude et localisées à proximité l’une de l’autre. Tout en suivant cet agencement dans leur ensemble, les

60. L’adjectif « circulaire » est ici employé pour décrire le profil des trajectoires lorsque celles-ci sont observées selon un point de vue zénithal, indépendamment de leurs variations locales de hauteur.



Fig. 9.32 — Échantillon n° 1 : structure finale obtenue.

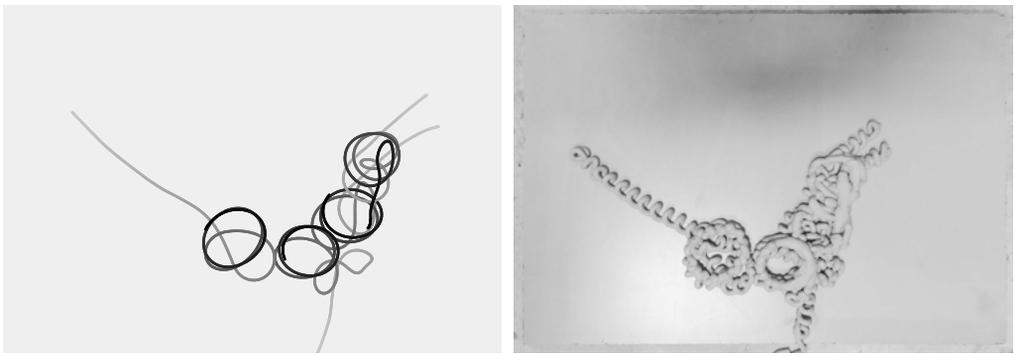
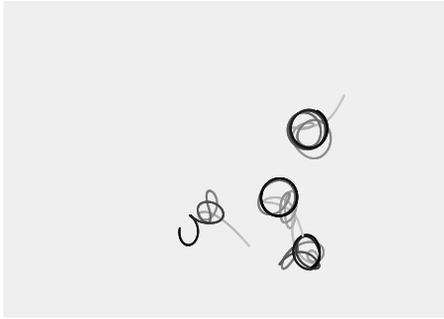
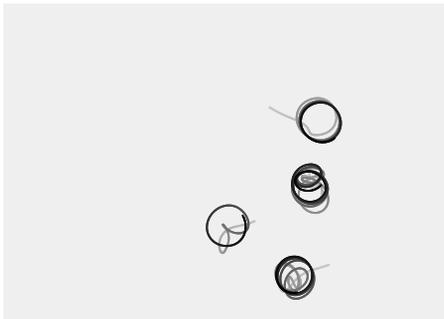


Fig. 9.33 — Échantillon n° 1 : trajectoires de déposition et structure obtenue au terme de l'étape d'initialisation.

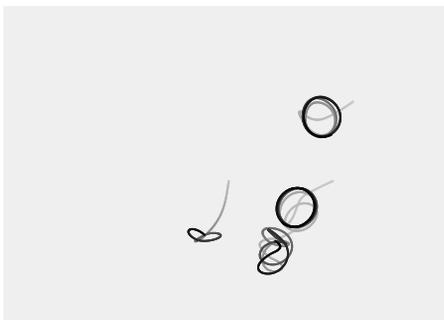
structures produites exhibent une matérialité émergente, non réductible à la donnée géométrique des trajectoires de déposition. L'utilisation d'une hauteur d'extrusion relativement importante (30 mm) permet ici d'induire une première forme d'expression autonome des qualités morphogénétiques du matériau : déposé à cette hauteur, le « filament » d'argile s'organise spontanément autour de la trajectoire de déposition, produisant des effets matériels tels que les « torsades » observées au premier plan à gauche de la figure 9.32.



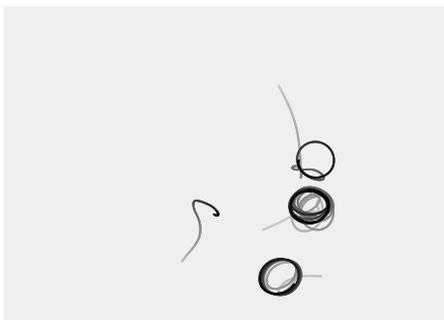
(a) Étape n° 1



(b) Étape n° 2



(c) Étape n° 3



(d) Étape n° 4

Fig. 9.34 — Échantillon n° 1 : trajectoires de déposition et structures obtenues (étapes n°s 1 à 4). Étape n° 3 : indication des deux zones renforcées par la procédure de génération des trajectoires lors du passage à l'étape n° 4 (A et B).

La figure 9.34 documente les étapes ultérieures de production de l'échantillon : pour chacune de ces étapes, nous présentons le tracé des trajectoires robotiques générées par le logiciel, ainsi que les structures d'argiles obtenues suite aux dépositions correspondantes. En comparant ces images, nous pouvons tout d'abord noter l'effet de la procédure de distribution sélective du volume d'argile déposé : initialement réparties de manière égale au cours de la phase d'initialisation, les quantités d'argile déposées par zone (visualisables par la longueur des trajectoires de déposition) tendent progressivement à se concentrer en certains points de l'échantillon. Cet effet s'accroît sensiblement lors de la déposition réalisée à l'occasion de l'étape n° 4 : la procédure de génération des trajectoires se trouve alors incitée à « renforcer » deux zones parmi les quatre « candidates » identifiées sur la structure obtenue à l'étape n° 3 (marquées A et B sur la figure 9.34). La première des structures ainsi ciblées (A) correspond à la partie la plus nettement différenciée de l'échantillon, et prolonge une formation déjà individuée à partir de l'étape 1 ; la seconde structure (B) s'avère quant à elle moins affirmée, et semble encore en cours de « développement ». Il aurait ainsi été intéressant, si la quantité d'argile disponible nous l'avait permis, de réaliser des itérations supplémentaires du cycle de production, afin d'observer l'évolution ultérieure de la structure B. L'observation des quatre itérations réalisées nous permet cependant de souligner la capacité de nos procédures à prolonger le développement d'une formation déjà individuée, tout en ménageant un degré suffisant d'« exploration » pour inciter à la formation ultérieure de nouvelles structures émergentes. Cette première observation indique ainsi que le processus de maintenance mis en œuvre ne se résume pas au renforcement exclusif d'une seule structure, une fois celle-ci détectée : à l'aide d'un mécanisme simple, notre approche permet en effet de maintenir la capacité d'une émergence spontanée de nouvelles structures pendant plusieurs itérations du cycle productif. En d'autres termes, l'évolution suivie par l'artefact en cours de production n'est jamais « jouée dès le départ » : à chaque itération du cycle, les relations productives entre code, machine et matériau sont ainsi « régénérées » et réalisées dans un processus d'interaction émergente — une qualité à laquelle nous avons précédemment associée l'idée d'auto-maintenance.

Au-delà de l'effet de la procédure de distribution sélective d'argile, conduisant à l'émergence progressive d'un ensemble restreint de formations par rapport au nombre initial de dépositions réalisées, l'action différenciante du processus de maintenance ici mis à l'épreuve peut être décrite plus en détails. Il convient tout d'abord de commenter l'effet lié à l'utilisation de trajectoires de déposition quasi-circulaires dans la production de ce premier échantillon. Ces trajectoires conduisent en effet le robot à réaliser des mouvements « bouclant sur eux-mêmes », et permettent de favoriser l'émergence de structures « en hauteur ». Cette possibilité d'une structuration verticale du matériau déposé se

trouve liée à la possibilité d'une expression différenciée des qualités plastiques de l'argile : comme expliqué dans la section 9.3, la structuration progressive du matériau selon la direction verticale s'avère en effet susceptible de provoquer une diminution progressive de la hauteur d'extrusion au cours d'une même déposition, produisant une variation des effets matériels obtenus, voire une « compression » ou un « nivellement » de l'argile par contact direct avec la buse d'extrusion. En raison de ces qualités, des trajectoires de déposition de type quasi-circulaire ont été privilégiées lors de la plupart de nos expérimentations mobilisant la procédure AGENT.

Les effets de compression et de nivellement de l'argile, décrits ci-dessus, s'avèrent principalement responsables de l'apparition de la formation « torique », fortement densifiée, observée au sommet de la structure A sur l'échantillon n° 1. Le développement précoce de cette morphologie (visible dès l'étape 1) permet probablement d'expliquer la rapide différenciation de la structure A par rapport au reste de l'échantillon : les zones « comprimées » par l'extrudeur sont en effet moins susceptibles, par densification, de s'affaisser suite à l'ajout ultérieur de matière, favorisant leur futur développement en hauteur. Ce gain rapide de hauteur est en retour susceptible d'induire un comportement plus sélectif de l'algorithme de distribution de la quantité d'argile déposée, conduisant à la « consolidation » ultérieure de ces zones. Cette discussion permet de souligner l'existence d'un réseau d'interactions complexe et circulaire entre trois acteurs productifs : outre les différentes procédures formant la composante « programmée » du processus de maintenance, les spécificités du comportement matériel de l'argile, ainsi que la matérialité du robot lui-même (dont l'extrudeur est utilisé pour induire une déformation « par contact » de l'argile), contribuent ainsi activement à définir la morphologie des artefacts obtenus. Le processus de maintenance implémenté dans le dispositif ne saurait donc être envisagé sous le seul aspect de son implémentation logicielle : il convient bien, comme nous cherchons à le faire ici, d'en considérer les performances dans un contexte productif « rempli » d'autres formes d'agentivité matérielle.



Fig. 9.35 — Échantillon n° 2 : structure finale obtenue.



Fig. 9.36 — Échantillon n° 2 : structure finale obtenue. A : groupement de structures toriques de forte densité.

Les figures 9.35 et 9.36 présentent deux vues d'un second échantillon produit lors de la série d'expériences d'octobre 2016, au terme de cinq étapes de production (désignées, à nouveau, par les numéros de 0 à 5). À l'instar de l'échantillon considéré ci-dessus, le processus de production s'est ici basé sur les procédures AGENT et CENTRAL. Quatre zones de déposition initiales ont tout d'abord été générées, donnant lieu aux trajectoires présentées sur la figure 9.37. La présence d'un recouvrement entre les deux trajectoires centrales de ce schéma d'initialisation s'est traduite par la production d'une zone centrale de forte densité, que notre logiciel a développé en lui attribuant, à chaque itération du cycle de production, deux des quatre zones recherchées par l'algorithme *k*-moyennes. L'ajout d'une forte quantité de matière dans ces deux zones centrales, allié à l'utilisation de trajectoires de déposition quasi-circulaires, a ainsi provoqué le développement de structures toriques de forte densité (marquées A sur la figure 9.36). La base de chacune de ces structures revêt un aspect plus lâche, évoquant des « coulées » répandues sur les côtés de l'échantillon (un effet particulièrement visible sur la vue en élévation proposée par la figure 9.35). Cette diversité dans la mise en œuvre des qualités morphogénétiques de l'argile s'avère, comme souligné dans la section 9.3, permise par l'adoption d'un profil de hauteur d'extrusion fixé au début de chaque étape de déposition<sup>61</sup>. Si, au début d'une de ces étapes, la hauteur d'extrusion s'avère suffisante pour laisser « couler » le filament d'argile, l'ajout progressif de matière finit, au terme de plusieurs passages de l'extrudeur, par amener la buse d'extrusion en contact direct avec la structure formée : cette *modulation* progressive de la hauteur d'extrusion produit alors des morphologies caractérisées par une articulation continue entre une base lâche, où le matériau conserve un aspect filamentaire, et une surface supérieure plus dense, induite par la déformation progressive de l'argile déposé (produisant les striations visibles au sommet de chacun des « tores »).

Ces premières expérimentations, centrées sur la procédure AGENT, ont été complétées par la production d'une série d'échantillons mobilisant la procédure « circulaire » ORBIT. Développée à l'occasion de la session expérimentale de janvier 2017, ORBIT visait à explorer l'utilisation de trajectoires de génération plus régulières que celles précédemment mises à l'épreuve : ses trajectoires

---

61. Rappelons ici que la hauteur d'extrusion est réglée par le paramètre Z OFFSET, et augmentée optionnellement de la hauteur locale de l'échantillon en début d'extrusion (une option que nous avons utilisée dans la production de chacun des échantillons présentés ici). En indiquant que le *profil* de la hauteur d'extrusion est fixé au début de chaque déposition, nous ne sous-entendons pas que la hauteur d'extrusion est maintenue constante au cours de chaque extrusion, mais que la courbe de son évolution le long de la trajectoire est déterminé *a priori* : en particulier, nous ne mettons pas à jour ce profil en fonction des évolutions de la hauteur locale de l'échantillon en cours d'impression, liées à l'ajout de matière.

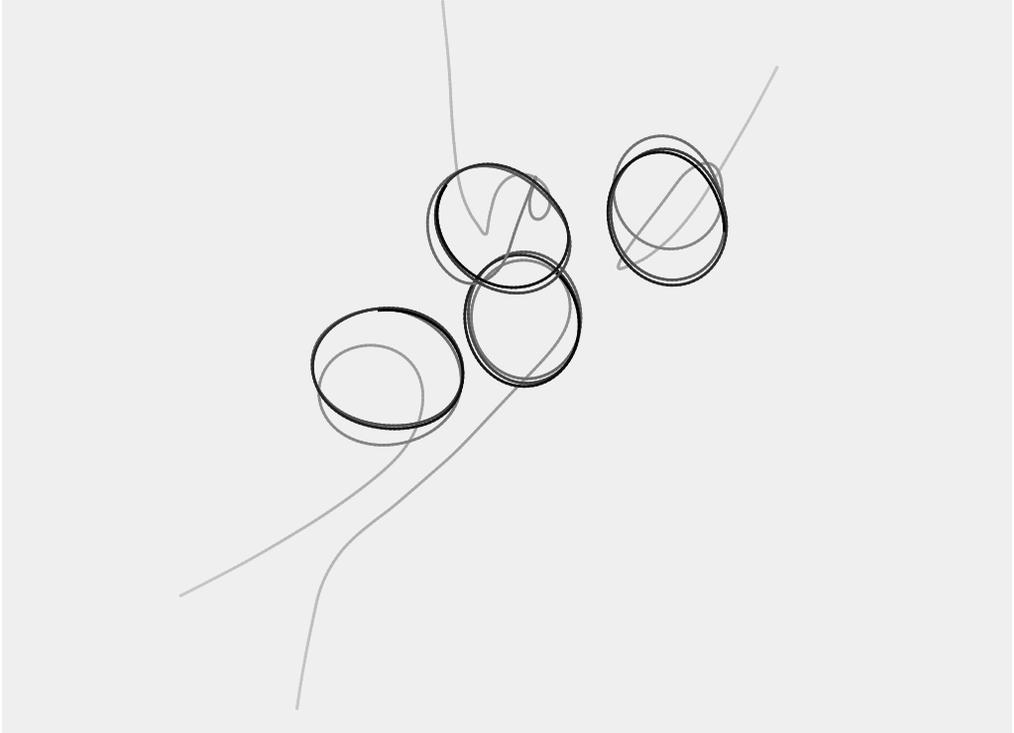


Fig. 9.37 — Échantillon n° 2 : trajectoires de déposition générées pour l'étape d'initialisation.

circulaires peuvent en ce sens être considérées comme une simplification de la morphologie quasi-circulaire observée, dans chacune de nos expériences, sur les trajectoires générées par la procédure AGENT. Cette régularité de la procédure ORBIT permet d'induire de nouvelles formes d'expression plastique des propriétés de l'argile. En particulier, l'absence de décalage entre les différents mouvements circulaires successifs de l'extrudeur peut donner lieu, dans certains cas, à la construction de surfaces de conformation cylindrique, construites par superposition de plusieurs couches du filament d'argile. Tout en visant ici un type de structures très différent des objets produits par les procédés d'impression 3D par dépôt de matière fondue, nous pouvions ainsi nous attendre à obtenir, à l'aide de la procédure ORBIT, des formes d'articulation matérielles rappelant l'aspect des productions classiques de la fabrication additive.

La figure 9.38 présente l'un des échantillons obtenus au cours de notre série d'expériences basées sur la procédure ORBIT. L'initialisation du processus de production a ici été effectuée à l'aide de la procédure STAR, paramétrée de sorte à obtenir quatre trajectoires de déposition agencées en croix, en contact tangentiel l'une de l'autre. La figure 9.39 présente ces trajectoires ainsi que les structures obtenues au terme de la déposition correspondante : quatre formations circulaires, agencées de manière similaire aux trajectoires de déposition,



Fig. 9.38 — Échantillon n° 3 : structure finale obtenue.



Fig. 9.39 — Échantillon n° 3 : trajectoires de déposition et structure obtenue au terme de l'étape d'initialisation. A : point de contact de deux formations circulaires.

sont ainsi obtenues. Peu différenciées en termes d'articulation matérielle, ces structures s'élèvent par ailleurs toutes d'une hauteur similaire par rapport à la surface du plan de travail. Par effet de recouvrement, le point de contact supérieur droit des « cercles » d'argile (marqué A) se trouve cependant légèrement rehaussé par rapport au reste de l'échantillon ; au cours des deux premières itérations du cycle (étapes n<sup>os</sup> 1 à 2), cette première « zone d'émergence » potentielle va être développée par le logiciel, à travers le placement répété de deux zones de dépositions principales à proximité du point A.



Fig. 9.40 — Échantillon n° 3 : structure obtenue au terme de l'étape n° 2. Zones de « compression » (C) et de « relâchement » (B).

La figure 9.40 présente la structure obtenue au terme de l'étape n° 2 : on y distingue, dans la zone mentionnée ci-dessus, l'émergence d'une formation nettement différenciée, présentant un aspect « par couches » ainsi qu'un profil quasi-cylindrique. Au cours de la production du troisième échantillon discuté ici, nous avons configuré l'algorithme  $k$ -moyennes de sorte à rechercher quatre partitions spatiales du nuage de points. L'option ORBIT: AUTO RADIUS a ensuite été utilisée afin d'adapter, à chaque itération, le diamètre des trajectoires de déposition à la dimension des zones ainsi identifiées par l'algorithme de partitionnement. Ce choix nous a permis d'expérimenter avec des trajectoires de plus grande extension spatiale que celles mises en œuvre lors de nos expériences précédentes : le diamètre de la formation quasi-cylindrique visible sur la figure 9.40 s'avère ainsi plus important que celui des structures « toriques » observées sur les figures 9.35 et 9.36 (échantillon n° 2), obtenues à l'aide de trajectoires de déposition localisées dans le voisinage immédiat du centre des zones détectées. Combinée à la régularité accrue des trajectoires générées par la procédure ORBIT, ce dimensionnement supérieur des zones de déposition se traduit par la mise en œuvre d'effets de « déformation » spécifiques, induits au sein d'une même trajectoire. Sur les « parois » de la formation quasi-cylindrique visible sur la figure 9.40, différentes formes d'expression du comportement plastique de l'argile se trouvent ainsi mises en œuvre : sur la partie la plus proche du point de prise de vue, une « zone de compression » (marquée C) indique l'exer-

cice d'une action déformante réalisée par contact direct de l'extrudeur avec la matière déposée, tandis qu'un type d'articulation plus « lâche » des couches d'argile est obtenu sur une partie voisine du cylindre (marquée B).

La configuration finale de l'échantillon n° 3, déjà présentée ci-dessus (figure 9.38), correspond à l'étape n° 4 de la production : deux itérations supplémentaires ont ainsi été réalisées par rapport à la figure 9.40. La comparaison avec cette dernière figure révèle l'ajout d'« arcs » filamenteux de grande dimension, croisant les contours de la structure quasi-cylindrique précédemment formée. De toute évidence, l'algorithme de partitionnement a ici tenu relativement peu compte des formations matérielles déjà développées au cours des étapes antérieures du processus, conduisant à l'addition d'argile sur l'ensemble de la pièce. Quoique le résultat obtenu ne soit pas dépourvu, à notre sens, de qualités plastiques, cette dernière itération du cycle de production révèle ainsi les limites du processus de maintenance mis en œuvre dans la production de l'échantillon n° 3<sup>62</sup> : au-delà des premières étapes du cycle, où la formation d'une structure fortement différenciée a pu effectivement être encouragée, ce processus a échoué, dans la négociation de l'étape 4, à « remettre en jeu » les conditions d'une réalisation des relations productives à partir de la structuration matérielle précédemment atteinte par l'échantillon. Le régime productif mis à l'épreuve par ce troisième échantillon semble donc moins nettement exemplifier notre idée d'une production « auto-maintenue » : le comportement de déposition observé au cours de la dernière étape de cette expérience pourrait en effet, à bien des égards, avoir été induit par une génération aléatoire de trajectoires circulaires, plutôt que par la « régénération » rétroactive des relations de production à partir des structures matérielles formées au cours des étapes antérieures du cycle.

Nous pouvons supposer que les « difficultés » rencontrées par notre processus de maintenance (relativement à notre hypothèse initiale) s'expliquent, dans le cas de ce dernier échantillon, par une inadéquation entre l'algorithme de partitionnement par *k*-moyennes et les trajectoires générées par la procédure ORBIT. Les structures de profil quasi-cylindrique produites par ces trajectoires de déposition s'avèrent en effet plus difficiles à développer de manière cohérente, sur une durée de plusieurs itérations, que les structures plus « concentrées » induites par la procédure AGENT. En particulier, tout « décalage d'alignement » entre les zones détectées par l'algorithme de partitionnement et la configuration des formations cylindriques déjà déposées donnera lieu à un ajout apparemment « aléatoire » de matière, comme observé sur la figure 9.38. Le partitionnement par *k*-moyennes semble ici rencontrer ses limites, et une approche

---

62. Nous nous référons ici à la configuration particulière de notre logiciel utilisée au cours de cette dernière expérience (mobilisant notamment les procédures ORBIT et STAR).

plus sensible au détail précis des propriétés géométriques de l'échantillon serait peut-être davantage pertinente en lien avec les morphologies induites par la procédure ORBIT.

Nous pouvons ainsi noter, pour clore cette discussion, que certaines déclinaisons du processus de maintenance implémenté semblent donner lieu à un régime productif compatible avec la notion d'auto-maintenance : tel est le cas, en particulier, de la combinaison des procédures AGENT et CENTRAL, mobilisée dans les échantillons n<sup>os</sup> 1 et 2. Dans tous les cas, les expériences réalisées soulignent l'existence d'un couplage circulaire entre les actions des procédures purement logicielles et les comportements matériels exprimés ou captés par ces procédures. La procédure de maintenance à l'œuvre dans notre dispositif de production ne saurait donc être uniquement abordée sous l'angle de son implémentation numérique, mais nécessite d'être mise à l'épreuve de manière empirique, au contact des comportements émergents des acteurs matériels impliqués dans la production. Ainsi, si notre approche de partitionnement par *k*-moyennes a pu se montrer capable de « négocier » avec les morphologies matérielles induites par la procédure AGENT, nos expériences avec la procédure de déposition ORBIT, mobilisant la même méthode algorithmique, se sont avérées moins concluantes. La mise en œuvre d'un régime de production maintenue à partir d'une implémentation de procédures programmées ne saurait donc s'effectuer de manière isolée des conséquences de la réalisation matérielle de ces procédures, et nécessite véritablement de ménager, dans les détails même de l'implémentation de ces dernières, une capacité de « dialogue » avec les différents agents mobilisés dans le scénario de production auquel elles se destinent. Tel est l'enjeu principal qu'incarne, à notre sens, la notion d'une *conception* de processus de maintenance.



Cinquième partie

# **Production participative**



## Chapitre 10

# De la conception à la participation

### 10.1 Vers une production participative

Cette dernière partie se propose de considérer un scénario de production prospectif, redéfinissant les agentivités à l'œuvre dans notre idée d'un régime de production maintenue. Après avoir envisagé, dans les parties précédentes, des régimes productifs relevant d'une forme de « collaboration » hybride entre *une* figure humaine (le concepteur), et un réseau d'agents matériels (algorithmes, matériaux, machines de production), nous souhaitons ici examiner des situations où un ensemble d'*utilisateurs*, distincts du concepteur, s'avèrent capables de s'impliquer dans le processus productif pour en orienter ou contrôler les résultats.

Cette idée d'une *production participative*, dont il s'agira de préciser l'organisation afin de ne pas tomber dans la vision simplificatrice (et souvent rhétorique) d'une horizontalité parfaite des relations entre concepteur et utilisateur, se pose, de fait, comme l'une des conséquences directe d'une rencontre entre les logiques de la *personnalisation de masse*, discutées dans la section 4.1, et le processus de remise en cause de la centralité auctoriale du concepteur, annoncée par l'ouverture du processus productif à l'expression autonome d'autres agentivités, matérielles ou humaine. Ces deux logiques — automation de la production et remise en cause d'une vision prescriptive de l'acte de conception — semblent historiquement s'être manifestées de manière relativement décorrélée dans le champ de la production numérique : comme nous le soulignons dans la section 4.5, l'idée d'un schéma productif « non standard », en dépit de son investissement de la notion de variabilité, rejoint à notre sens une vision fondamentalement linéaire et prescriptive de la production, caractéristique des régimes de production standardisés. Cependant, comme l'a notamment montré notre projet *Unspecified Clay*, l'utilisation de moyens de production automatisés peut bel et bien s'inscrire dans le cas de scénarios opérant une forme de *distribution* de l'autorité, et non de renforcement des schémas centralistes existants.

En 2005, Mario Carpo notait ainsi déjà que l'adoption de schémas participatifs, tels qu'observés alors dans les espaces en ligne du « Web 2.0 », représentait un possible changement de paradigme pour les pratiques de production d'artefacts matériels qui, à l'instar du design industriel ou de l'architecture, s'étaient déjà ouvertes *techniquement* à la possibilité d'une production

participative par leur adoption des logiques *file to factory*<sup>1</sup>. De fait, plusieurs entreprises se sont depuis engagées dans l'idée d'une production participative d'objets sur Internet, permise par l'intermédiaire d'interfaces de conception en ligne et l'utilisation de technologies de fabrication numérique. Parmi ces sociétés, on peut notamment citer le studio de design Nervous System<sup>2</sup>, fondé en 2007 par Jessica Rosenkrantz et Jesse Louis-Rosenberg, tous deux diplômés du MIT. Par l'utilisation de méthodes de conception générative et de technologies spécifiquement développées pour les navigateurs Internet (comme l'API JavaScript WebGL, permettant la visualisation de géométries 3D), le studio propose à ses clients des interfaces interactives permettant de créer des versions personnalisées de certains de leurs produits (figure 10.1), qui sont ensuite fabriquées par impression 3D ou découpe laser. On peut également citer l'exemple de la société Shapeways, spécialisée dans la fabrication additive, qui a récemment entrepris le développement de ShapeJS<sup>3</sup>, une API JavaScript destinée à favoriser le développement d'interfaces de conception générative en ligne, afin de permettre à des sociétés tierces de développer leurs propres offres de produits personnalisables.

De tels scénarios seront très probablement amenés à se démocratiser dans les années à venir, en raison d'une diminution prévisible du coût des procédés de fabrication additive, et de l'intégration accrue d'un ensemble de services en ligne liés à la vente, la communication ou la diffusion, réduisant l'investissement technique nécessaire au commerce d'objets personnalisables. Cependant, ces exemples d'une production participative « en ligne » ne peuvent, en l'état, constituer de réelles références pratiques pour le projet que nous adoptons dans cette dernière partie. Le régime productif mis en place par ces scénarios relève, en effet, d'une séparation stricte entre une phase de conception en ligne et une étape de fabrication ultérieure, dont l'issue s'avère entièrement déterminée par les notations numériques produites, au cours de la première phase, par l'utilisateur : ces formes de production participative correspondant ainsi à une évolution « interactive » du schéma *file to factory*, dont elles reprennent l'idée d'une articulation linéaire, prescriptive, entre conception et fabrication. En d'autres termes, si ces applications, par leur dimension participative, se rapprochent des idées que nous souhaitons explorer dans cette dernière partie, leur base conceptuelle — le schéma *file to factory* — nous rapporte à un stade que nous avons précisément cherché à dépasser en introduisant la notion d'une production *maintenue*, en « temps-réel » — seule à même, selon nous,

---

1. Mario Carpo, « Revolutions: Some New Technologies in Search of an Author », *Log*, n° 15, 2009, p. 51.

2. <http://n-e-r-v-o-u-s.com> (consulté le 21 avril 2017).

3. <https://shapejs.shapeways.com> (consulté le 21 avril 2017).

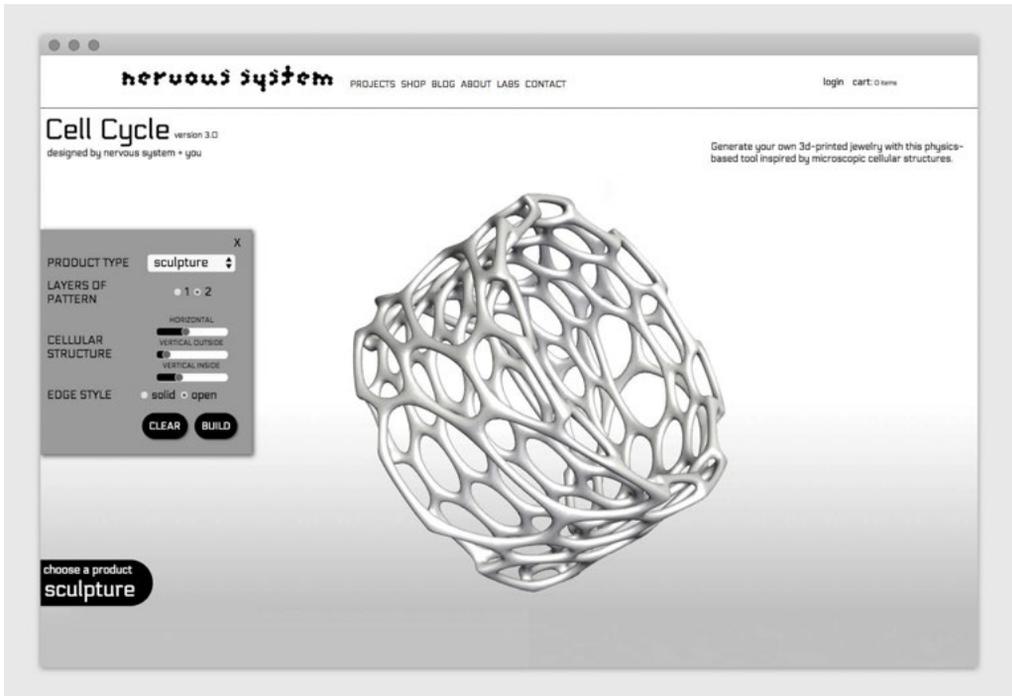


Fig. 10.1 — Capture d'écran d'une interface de personnalisation en ligne proposée par le studio Nervous System (source : <https://n-e-r-v-o-u-s.com/cellCycle>).

d'opérer la transition vers une vision véritablement émergente, et non plus hylémorphique, du processus productif.

Dans ce contexte, nous aborderons ici la perspective d'une production participative dans le prolongement direct des idées formalisées, dans la partie précédente, par la notion d'*auto-maintenance*. De fait, dès lors que la phase de conception devient conception de *processus de maintenance* visant à stabiliser, dynamiquement, les relations opératoires (c'est-à-dire l'organisation) du système productif, et ne vise plus à prescrire explicitement l'issue d'une étape de fabrication perçue comme ancillaire, nous pouvons imaginer travailler avec une organisation productive ouverte à la participation d'un ou plusieurs utilisateurs humains, autres que le concepteur, devenus acteurs d'un schéma global de production maintenue. En d'autres termes, nous nous intéresserons ici à l'idée selon laquelle d'autres agents humains que le concepteur pourraient *utiliser* les processus productifs conçus par ce dernier afin de s'engager, à leur tour, dans une situation productive en « temps-réel ». Il n'est donc pas question ici d'imaginer des situations où, à l'instar des services en ligne décrits précédemment, les utilisateurs se retrouveraient confrontés à des schémas productifs linéaires (séparés en deux phases de conception et de fabrication), mais bien d'envisager l'interaction des utilisateurs avec les moyens de production dans la logique d'une production dont l'organisation serait *continûment* réalisée et ré-

générée par la création de structures matérielles. Cette remarque nous conduit dès lors à nous tourner vers le champ artistique, au sein duquel des situations productives similaires à celles envisagées ici sont en effet expérimentées depuis plusieurs décennies : la discussion des enjeux relatifs à ces *œuvres praticables* s'avère ainsi centrale pour notre projet d'une production participative.

La notion d'œuvre praticable renvoie d'abord, bien entendu, à l'idée de *pratique* : elle désigne ainsi, selon Samuel Bianchini et Erik Verhagen, une catégorie d'œuvres dont la « propriété distinctive réside dans leur capacité à prendre en charge l'implication physique du spectateur, et à générer une activité susceptible de transformer l'œuvre elle-même ainsi que son public<sup>4</sup> ». Les œuvres praticables se caractérisent, en ce sens, par leur capacité à « inviter à l'action », à ne faire œuvre que dans le moment de l'engagement *physique* du public avec leur réalité matérielle, induisant « une expérience tant esthétique que physique<sup>5</sup> ».

Les œuvres praticables constituent une catégorie particulière du type d'œuvres que nous avons, dans la section 8.2, qualifiées d'« œuvres interactives », dans le sens où leur mise en œuvre « en exposition » de situations productives se comprenait, avant tout, comme l'*interaction* d'un réseau d'acteurs. Ce réseau, associé à des formes purement matérielles d'agentivité dans le cas des œuvres « simplement » interactives, se trouve ainsi étendu aux agents humains du public dans le cas des œuvres praticables. L'idée d'une interaction entre agentivités humaine et matérielles s'avère donc intimement liée à la notion d'œuvre praticable : il s'agit bien de la comprendre dans la perspective, discutée dans le chapitre 6, d'une forme de réciprocité des relations entre acteurs humains et non-humains, ce qui implique que les éléments matériels d'une œuvre praticable puissent non seulement être *opérés, pratiqués* par le public, mais s'avèrent également dotés de capacités opératoires. Comme le soulignent Samuel Bianchini et Erik Verhagen, cette dimension opératoire distingue les œuvres praticables de la pratique de l'installation<sup>6</sup>. Les œuvres praticables se donnent ainsi à comprendre comme de véritables « théâtres d'opérations<sup>7</sup> »,

---

4. Samuel Bianchini et Erik Verhagen, « Practicable—Art in the Conditional », dans *Practicable: From Participation to Interaction in Contemporary Art*, Cambridge, MIT Press, 2016, p. 1. Notre traduction.

5. *Ibid.*, p. 1. Notre traduction.

6. *Ibid.*, p. 10.

7. Samuel Bianchini, « The Theatre of Operations », dans Bruno Latour et Peter Weibel (dir.), *Iconoclasm: Beyond the Image Wars in Science, Religion and Art*, catalogue d'exposition (ZKM, Karlsruhe, 4 mai – 1er septembre 2002), Cambridge, MIT Press, 2002, p. 483–485.

des « mises en scènes » d'une « épreuve de forces productives jamais résolue<sup>8,9</sup> », entre l'agentivité humaine d'un public et l'agentivité matérielle d'un *dispositif*.

Les sections 11.2 et 11.3 nous permettront de préciser en détails notre compréhension de cette « épreuve de force », de ces relations entre public et dispositif, sous l'angle de notre idée d'auto-maintenance. Pour l'heure, nous pouvons insister sur la nature *productive* de ces relations, afin d'appuyer l'idée selon laquelle le concept artistique d'œuvre praticable s'avère effectivement pertinent pour donner corps à notre vision d'une production participative, dans le sens qui nous intéresse ici. Les œuvres praticables impliquent en effet, par nature, l'idée d'une production réalisée en « temps-réel » : cette propriété découle de leur qualité d'*œuvres interactives*, une catégorie dont nous avons déjà noté, dans la section 8.2, qu'elle correspondait à la mise en œuvre de situations productives « en exposition ». Les œuvres praticables engagent ainsi les spectateurs dans une « épreuve de forces productives » traduisible, à l'instar des œuvres « simplement » interactives, dans la production en temps-réel de vidéos, de sons ou d'images, ou encore de structures matérielles, concrétisées par la mise en œuvre d'éléments « réactifs » ou de réels procédés de fabrication, donnant lieu à une production d'artefacts.

Cette première introduction de la notion d'œuvre praticable, que nous compléterons par la suite, nous permet de préciser le type de scénarios de production que nous serons amenés à explorer dans cette dernière partie : nous nous intéresserons ainsi, en priorité, à des situations productives « en exposition », impliquant physiquement le public dans la production de structures *matérielles*. Cette précision du domaine de réflexion et de pratique adopté dans la dernière partie de notre thèse peut immédiatement être complétée par deux remarques.

Il convient tout d'abord de souligner que les situations productives que nous envisageons à présent correspondent à un sous-ensemble spécifique dans la catégorie générale des œuvres praticables : si toutes les œuvres praticables relèvent bien, au sens strict, de situations productives, nous choisissons à partir d'ici de nous référer plus précisément au cas d'œuvres concernées par la *production de structures matérielles* — que ce soit par la mise en œuvre d'une reconfiguration « réactive » de leur structure ou d'une réelle production d'artefacts « en exposition ». Nous excluons ainsi, par conséquent, le cas des œuvres

---

8. Samuel Bianchini et Jean-Paul Fourmentraux, « Médias praticables : L'interactivité à l'œuvre », *Sociétés*, n° 96, 2007, p. 95.

9. Il est à ce titre intéressant de noter que l'adjectif « praticable » s'emploie, dans le domaine du théâtre, pour désigner un élément de décor « [o]ù l'on peut passer, marcher, jouer, et qui consiste en des objets réels et non pas seulement figurés » ([Anon.], « Praticable », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/praticable>, consulté le 18 avril 2017).

praticables exclusivement basées sur une production d'images numériques, de vidéos ou de sons. Ce choix s'inscrit, bien entendu, en cohérence avec l'objet même de notre thèse, centrée avant tout sur le champ des pratiques de la production matérielle numérique.

Nous pouvons ensuite noter que le choix de « particulariser » notre idée d'une production participative autour de la notion d'œuvre praticable (restreinte à la catégorie spécifique des situations de production matérielle) nous conduira, nécessairement, à ancrer plus nettement cette dernière partie de notre thèse dans le champ artistique que les sections précédentes de notre exposé, où nous avons le plus souvent adopté une position transverse entre art et design. Mais nous n'en serons pas moins amenés à considérer, dans cette partie également, des exemples issus du champ de la recherche en architecture, dont les problématiques et l'inscription historique croisent largement, comme nous le verrons notamment dans la section 10.4, celles du domaine de l'art. De manière plus fondamentale, il nous semble en réalité que le régime de production participative que nous considérons, ici, sous un angle artistique, pose les bases conceptuelles d'une perspective d'évolution réelle pour un ensemble plus large de pratiques de production numérique — autrement dit, pour des pratiques relevant non seulement de l'art, mais aussi du design et de l'architecture.

En architecture, par exemple, l'horizon d'une telle production participative rejoint ainsi peut-être l'idée, introduite par Antoine Picon, selon laquelle la « commensurabilité entre forme et événement » conduirait, de plus en plus, à « considérer l'architecture comme un art de la performance<sup>10</sup> ». Plus largement, les œuvres praticables ne devraient pas, comme toutes les formes artistiques, être considérées de manière isolée des transformations ressenties à l'échelle de la société dans son ensemble : comme le soulignent Samuel Bianchini et Erik Verhagen, la notion même d'œuvre praticable s'inscrit en effet, dans son principe même, dans le contexte sociétal contemporain d'une « érosion des frontières entre la production et la consommation, la transmission et la réception, la manufacture et l'usage<sup>11</sup> ». Cette compréhension des œuvres praticables comme fruits d'une intensification accrue des échanges entre moyens de production et de communication permet d'imaginer que d'autres secteurs de la production, *a priori* non artistiques, pourraient à terme évoluer vers des scénarios productifs similaires à ceux aujourd'hui proposés par certaines œuvres praticables.

Dans la continuité des premières expériences de « production participative » en ligne, on peut ainsi imaginer, par exemple, que le développement technique des procédés de fabrication numérique — et plus particulièrement,

10. Antoine Picon, *Culture numérique et architecture : Une introduction*, *op. cit.*, p. 75.

11. Samuel Bianchini et Erik Verhagen, « Practicable—Art in the Conditional », *op. cit.*, p. 1. Notre traduction.

l'accroissement prévisible du rendement des technologies de fabrication additive, amorcé aujourd'hui par des procédés comme la technologie CLIP de la société Carbon<sup>12</sup> — conduite bientôt à voir se démocratiser la possibilité d'une production personnalisée d'objets de consommation courants, non plus sur Internet, mais directement au sein d'espaces de vente physiques — transformés, de ce fait, en lieux de production<sup>13</sup>. Une telle situation pourrait alors conduire ces espaces de vente à proposer des expériences de production participative directement inspirées de modèles artistiques — une perspective au demeurant en accord avec la tendance actuelle à envisager le « shopping » en tant qu'expérience multisensorielle. Il n'est ainsi pas impossible que la production quasi-instantanée d'objets personnalisés, par des machines dont les procédés exercent un indéniable pouvoir de fascination (comme l'impression 3D), puisse un jour être proposée en tant qu'élément central de cette expérience.

Pour conclure ces réflexions relatives à notre choix d'aborder la notion de production participative à travers le cas d'œuvres praticables relevant d'une forme de production matérielle, il convient de souligner que la nature même de telles œuvres appelle le plus souvent à l'adoption d'un point de vue transverse, envisageant leur conception à l'intersection d'un ensemble de problématiques générales du champ de la production numérique. Ces problématiques s'expriment en particulier sur le plan de la maintenance : comme nous le notions déjà dans la section 8.2, les œuvres relevant d'une forme de production

---

12. <http://www.carbon3d.com/clip-process> (consulté le 21 avril 2017).

13. Ce scénario est d'ores et déjà évoqué par l'entreprise Normal, proposant des écouteurs personnalisables et adaptés à la morphologie de leurs utilisateurs. Réalisés en fabrication additive, les écouteurs sont pour l'instant expédiés après une durée de quelques jours, mais l'entreprise propose néanmoins à ses clients d'en observer le processus de fabrication en direct, par l'installation d'une série d'imprimantes 3D opérationnelles dans sa boutique new-yorkaise, conçue par l'agence Hollwich Kushner (<http://hwkn.com/projects/normal>, consulté le 21 avril 2017). Plus récemment, le designer Marcelo Coelho a mis à l'épreuve l'idée d'une réelle production participative d'objets électroniques, à l'occasion du projet Pop-Up Factory, organisé dans le cadre de la conférence Solid en 2015. Décrit comme « le premier exemple d'une expérience de production en direct, mêlant en temps-réel les étapes de conception, de fabrication et de distribution d'un produit électronique personnalisé » (Marcelo Coelho, « Pop-Up Factory », 2015, en ligne : <http://www.cmarcelo.com/#/pop-up-factory>, consulté le 21 avril 2017, notre traduction), le projet permettait aux visiteurs de personnaliser et de fabriquer un bracelet connecté Alike qu'ils pouvaient ensuite utiliser pendant la conférence. En 2005, Bernard Cache et Patrick Beaucé proposaient déjà, à l'occasion d'une exposition d'Objectile à la galerie Natalie Seroussi, une expérience de production participative, dans laquelle le visiteur pouvait utiliser un ordinateur pour concevoir, puis commander, une table « non standard » (<http://www.natalieseroussi.com/fr/expositions/presentationarchive/54/objectile-table-non-standard>, consulté le 21 avril 2017). Les deux premiers exemples cités dans cette note se distinguent cependant par leur mise en œuvre des moyens de production depuis l'espace même d'exposition ou de vente, là où la production des tables « non standard » était prise en charge depuis l'extérieur de la galerie.

« en exposition » de structures matérielles posent en effet de manière particulièrement aiguë la question des enjeux techniques et esthétiques liés à la maintenance : il va ainsi sans dire, par exemple, qu'une œuvre mobilisant une machine de production industrielle, comme un bras robotisé, s'expose à des difficultés pratiques redoublées par rapport à la mise en œuvre d'une « simple » production d'images numériques. Ces enjeux relatifs à la maintenance sont rendus d'autant plus sensibles dans le cas des œuvres praticables, où le public se trouve invité à participer *physiquement* à la production, posant ainsi, par exemple, de nouvelles problématiques liées à la sécurité et la robustesse des dispositifs techniques mobilisés.

Ces problématiques, loin d'indiquer une limitation inhérente à l'idée d'une production matérielle « en exposition », signalent l'un des principaux axes sous l'angle desquels cette idée peut être abordée en tant que véritable objet de recherche, non seulement dans le champ de l'art, mais également dans un ensemble d'autres disciplines (sciences, design, ingénierie...). Le type d'œuvres praticables que nous souhaitons considérer dans cette dernière partie de notre thèse constitue, de fait, un champ de déploiement privilégié de certaines avancées récentes liées aux sciences des matériaux : par la mise en œuvre de matériaux dotés de capacités réactives spécifiques, un certain nombre d'œuvres praticables ont ainsi pu, récemment, apporter des réponses élégantes aux enjeux techniques de leur maintenance, tout en réservant une place centrale à ces réponses « techniques » dans l'expérience esthétique du spectateur.

Nous pouvons ici mentionner, en particulier, le cas d'œuvres praticables impliquant le public dans des situations productives *analogiques*, en se montrant capables d'altérer leur structure matérielle sans recourir à l'utilisation de moteurs ou d'actuateurs contrôlés numériquement. Bien qu'elles mobilisent fréquemment des méthodes numériques avancées à différents stades de leur conception, ces œuvres offrent, dans leur déploiement « en exposition », l'image d'une élégante « économie de moyens », dont nous pouvons sans peine deviner l'intérêt en termes de maintenance<sup>14</sup>. La série d'œuvres praticables *LOTUS*<sup>15</sup> (figure 10.2), développée à partir de 2010 par Daan Roosegarde, propose ainsi au public de participer à la production de motifs matériels et lumineux sur la surface d'un mur ou d'une sphère, créés par le mouvement analogique

---

14. Nous faisons bien évidemment référence ici à la possibilité d'« alléger » les problématiques techniques liées au déploiement, et à l'entretien, d'un grand nombre d'éléments motorisés (comme les moucharabiehs de l'Institut du monde arabe, dont nous avons noté les difficultés de fonctionnement dans la section 8.2). De manière plus générale, nous examinerons dans le chapitre 11 les qualités présentées par les modes de production analogiques en regard de la problématique de la maintenance, dans ses enjeux non seulement techniques, mais aussi esthétiques.

15. <https://www.studioroosegarde.net/project/lotus> (consulté le 21 avril 2017).

de centaines de feuillets métalliques étudiés pour s'incurver sous l'effet de la chaleur. En s'approchant de l'œuvre, les spectateurs attirent vers eux le faisceau d'une source lumineuse, dont la chaleur active les feuillets métalliques, provoquant une « ouverture » locale de la surface.

De manière plus prospective, le Self-Assembly Lab du MIT, dont les recherches portent sur les notions d'« auto-assemblage » et de « matière programmable<sup>16</sup> », a récemment décliné certaines de ses recherches sous la forme d'« œuvres » praticables<sup>17</sup>, conçues à la fois comme des « outils éducationnels » et des prototypes concrets de nouveaux modes de production, susceptibles, à terme, d'une mise en œuvre à l'échelle industrielle<sup>18</sup>. Des projets tels que BioMolecular Self-Assembly<sup>19</sup> (figure 10.3) et Self-Assembly Line<sup>20</sup> invitent ainsi le public à mettre en mouvement une enceinte contenant les pièces séparées d'un objet afin de provoquer, à force de collisions aléatoires, son « auto-assemblage ». BioMolecular Assembly, exposé lors de la conférence TEDGlobal en 2012, se présente sous la forme d'une collection d'erenmeyers, manipulables « à la main » et contenant chacun un objet à assembler. Self-Assembly Line, exposé la même année lors de la conférence TED Long Beach, prend la forme d'une « chaîne d'assemblage » de plusieurs mètres de long, composée d'un tambour rotatif activable par le public, et permettant la production d'objets d'une taille de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres.

---

16. Respectivement définies comme « un processus en vertu duquel des parties désorganisées construisent une structure organisée à l'aide d'interactions exclusivement locales » (Self-Assembly Lab, « Research and Projects », en ligne : [http://www.selfassemblylab.net/research\\_projects.php](http://www.selfassemblylab.net/research_projects.php), consulté le 19 avril 2017, notre traduction), et « la science, le développement et la conception d'un type de matière physique dotée de la faculté de changer de forme et /ou de fonction de manière programmable » (*Ibid.*, notre traduction).

17. Nous adoptons ici une définition large du terme d'« œuvre », que nous relierons avant tout au fait, pour les artefacts dont il est ici question, d'avoir été *exposés*. Il serait bien entendu possible de discuter du contexte « artistique » de leur exposition, mais cette précision nous semble secondaire par rapport à la propriété pour laquelle ces objets nous intéressent ici : offrir à un *public* la possibilité de participer physiquement à une situation de production matérielle.

18. Self-Assembly Lab, « Autonomous Mass-Assembly », en ligne : <http://www.selfassemblylab.net/AutonomousMassAssembly.php> (consulté le 19 avril 2017).

19. <http://www.selfassemblylab.net/BioMolecularSelfAssembly.php> (consulté le 21 avril 2017).

20. <http://www.selfassemblylab.net/SelfAssemblyLine.php> (consulté le 21 avril 2017).

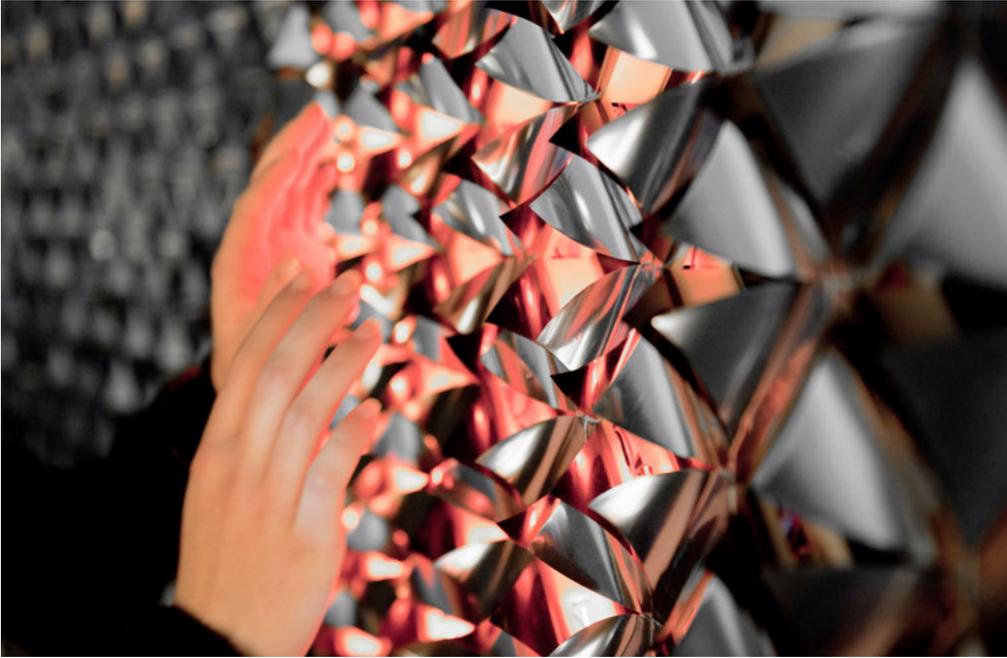


Fig. 10.2 — Daan Roosegarde, *LOTUS 7.0*, 2010–2011 (source : <https://studioroosegarde.net/project/lotus/photo>).



Fig. 10.3 — Self-Assembly Lab, *BioMolecular Self-Assembly*, 2012 (source : <https://vimeo.com/44291046>).

Ces diverses remarques nous incitent à garder à l'esprit la dimension profondément transversale des questions de recherche posées par le type d'œuvre praticables que nous cherchons à présent à considérer — ainsi que l'inscription de ces œuvres dans le contexte d'une transformation d'ensemble des modes de production contemporains, soulignant l'intérêt des problématiques qu'elles soulèvent pour d'autres champs que le strict domaine artistique. La « particularisation » artistique de notre propos au cours de cette dernière partie nous fournira, en ce sens, la possibilité d'*approfondir* notre idée générale d'une production maintenue : la prise en compte explicite de l'agentivité humaine du public, apportée par la notion d'œuvre praticable, permettra en particulier de préciser la place accordée aux « utilisateurs » d'un processus de maintenance au cours de la conception, et de clarifier les implications de la notion d'auto-maintenance à cet égard.

## 10.2 Notion de dispositif

Le contexte d'une œuvre praticable relève, par nature, d'une interaction entre des agents humains — le public — et un ou plusieurs « objets » matériels préalablement disposés par le concepteur, « embarquant » des processus de maintenance. Le public s'avère donc, dans ce contexte, « utilisateur » d'objets et de processus conçus par un autre agent humain — le concepteur —, lequel représente une entité externe par rapport au « système » de l'œuvre en exposition. Dans une œuvre praticable, le concepteur et l'utilisateur — qu'il conviendrait peut-être plus adéquatement, dans ce cadre, de qualifier de « praticieur<sup>21</sup> » — constituent donc deux personnes distinctes, impliquées dans des régimes productifs différents. Le concepteur travaille en effet au sein d'un « premier temps de production », depuis lequel il doit *disposer* des processus de maintenance dans l'optique de leur future *mise à disposition* pour le public ; l'utilisateur intervient, quant à lui, au cours d'un « second temps de production », correspondant à l'exposition de l'œuvre praticable.

À la fois disposé et mis à disposition, l'agencement créé par le concepteur renvoie directement à la notion de *dispositif*. Cette notion de dispositif joue un rôle central dans le contexte des œuvres praticables. Elle souligne la nature dynamique de l'agencement produit par le concepteur de l'œuvre, un agencement conçu, en premier lieu, pour induire des tensions, des rapports de force et des comportements spécifiques dans son interaction avec le public. La notion de dispositif sous-tend en effet une action de *disposition intentionnelle*

---

21. Samuel Bianchini et Jean-Paul Fourmentraux, « Médias praticables : L'interactivité à l'œuvre », *op. cit.*, p. 92. Sur cette notion, voir également : Emmanuel Mahé, « Les praticieurs », dans Jean-Paul Fourmentraux (dir.), *L'Ère post-média : Humanités digitales et cultures numériques*, Paris, Hermann, 2012, p. 117–136.

d'agentivité, produisant une *organisation*, ou un agencement, susceptible d'agir et d'opérer sur des êtres humains. Le dispositif renvoie donc à la fois à l'idée d'une *disposition* et d'une *mise à disposition* de capacités opératoires<sup>22</sup>, c'est-à-dire d'agentivité : l'idée d'une conception de processus de maintenance trouve donc naturellement à se réaliser dans la conception d'un dispositif.

Il importe ici de souligner que la notion de dispositif, au sens strict, renvoie à une *organisation*, et non à la réalité matérielle des « objets » qui lui donnent corps. Le terme de « dispositif » doit en effet être compris dans l'acception que lui a notamment donnée Michel Foucault<sup>23</sup>, puis, à la suite de celui-ci, Gilles Deleuze<sup>24</sup> et Giorgio Agamben<sup>25</sup>, plutôt que dans son sens courant d'« appareil technique<sup>26</sup> ». Pour ces auteurs, la notion de dispositif désigne en effet, en substance, un *réseau de relations* entre différents éléments (matériels, discursifs ou humains) *disposés*, c'est-à-dire organisés, afin de « capturer, d'orienter, de déterminer, d'intercepter, de modeler, de contrôler et d'assurer les gestes, les conduites, les opinions et les discours des êtres vivants<sup>27</sup> ». La définition la plus complète de la notion de dispositif est, selon Giorgio Agamben, proposée par Michel Foucault dans un entretien publié en 1977 dans la revue *Ornicar?*. Interrogé sur « le sens et la fonction méthodologique » du terme « dispositif », Foucault répond alors :

« Ce que j'essaie de repérer sous ce nom, c'est, premièrement, un ensemble résolument hétérogène, comportant des discours, des institutions, des aménagements architecturaux, des décisions réglementaires, des lois, des mesures administratives, des énoncés scientifiques, des propositions philosophiques, morales, philanthropiques, bref : du dit, aussi

22. Samuel Bianchini et Erik Verhagen, « Practicable—Art in the Conditional », *op. cit.*, p. 16.

23. Voir notamment : Michel Foucault, *Surveiller et punir*, Paris, Gallimard, 1975.

24. Gilles Deleuze, « Qu'est-ce qu'un dispositif? », dans *Michel Foucault Philosophe : Rencontre internationale*, Paris, 9, 10, 11 janvier 1988, Paris, Seuil, 1989, p. 185-195.

25. Giorgio Agamben, *Qu'est-ce qu'un dispositif?*, traduction de Martin Rueff, Paris, Payot & Rivages, 2007.

26. Un sens que l'on retrouve, en anglais, dans le terme « apparatus ». De fait, la nuance entre « dispositif » et « appareil » ne semble pas présente en anglais, ce qui a historiquement posé des problèmes lors de la traduction des textes de Michel Foucault : mentionnant l'usage par Foucault du terme « dispositif », Hubert Dreyfus et Paul Rabinow soulignent ainsi que « [c]e terme ennuyeux ne possède pas d'équivalent satisfaisant en anglais » (Hubert L. Dreyfus et Paul Rabinow, *Michel Foucault: Beyond Structuralism and Hermeneutics*, Chicago, The University of Chicago Press, 1983, p. 120, notre traduction). En conséquence, le terme « dispositif » est parfois traduit par l'anglais « apparatus » (comme dans la traduction de l'ouvrage de Giorgio Agamben, *What is an Apparatus?*), parfois laissé en français dans le texte.

27. Giorgio Agamben, *Qu'est-ce qu'un dispositif?*, traduction de Martin Rueff, *op. cit.*, p. 31.

bien que du non-dit, voilà les éléments du dispositif. Le dispositif lui-même, c'est le réseau qu'on peut établir entre ces éléments (...). [P]ar dispositif, j'entends une sorte — disons — de formation, qui, à un moment historique donné, a eu pour fonction majeure de répondre à une urgence. Le dispositif a donc une fonction stratégique dominante<sup>28</sup>. »

Comme nous le voyons, la notion de dispositif renvoie donc, dans la tradition foucauldienne, à l'idée d'une *organisation*, qu'il s'agit bien ici de comprendre comme le réseau de *relations* entre différents composants (matériels, discursifs ou humains), plutôt que la somme « matérielle » de ces composants eux-mêmes<sup>29</sup>. Et en réalité, le sens « commun » de la notion de dispositif (renvoyant à la réalité matérielle d'un « appareil », d'un objet technique) découle, étymologiquement, d'une compréhension du terme « dispositif » dans un sens similaire à la notion de réseau foucauldien. Dans leur ouvrage *Practicables: From Participation to Interaction in Contemporary Art*, Samuel Bianchini et Erik Verhagen notent ainsi :

« Originally, it was an adjective meaning “preparatory” (1314), or “settled, decided.” The nominal form was initially a legal term referring to the final declaration of a judgement and then, by extension, of a law. It was then employed in military parlance to describe the full complement of resources organized (*disposés*) in accord with a plan, and later in political discourse to refer to the resources mobilized in order to achieve a result. The term was subsequently used in the realm of technology to define the way in which the parts of organs of a machine are organized and arranged (*disposés*), and then to designate the machine and its mechanisms themselves<sup>30</sup>. »

Comme le soulignent les sens historiques du terme « dispositif » dans les domaines militaire et technologique, la notion d'organisation, ou d'arrangement, se trouve historiquement première par rapport à une compréhension du dispositif en tant qu'objet matériel. Ce dernier sens n'apparaît que tardivement dans l'histoire du terme, au sein du domaine technologique, dans lequel

28. Michel Foucault, « Le jeu de Michel Foucault », dans *Dits et écrits, 1954–1988, Tome 3: 1976–1979*, Paris, Gallimard, 1994, p. 299.

29. La compréhension qui se dessine ici de l'organisation comme « réseau de relations » se rapporte directement à la définition de l'organisation dans la théorie de l'autopoïèse. En mobilisant ici l'idée de « structure », introduite par Maturana et Varela, nous pourrions ainsi dire que le dispositif foucauldien se définit par son organisation, et non par la structure concrète — matérielle, discursive, ou humaine — « réalisant » cette organisation.

30. Samuel Bianchini et Erik Verhagen, « Practicable—Art in the Conditional », *op. cit.*, p. 15–16.

se développe une compréhension « commune » du dispositif comme « appareil technique ». Cependant, comme le soulignent Samuel Bianchini et Erik Verhagen, cette signification dérive en réalité des acceptions de « dispositif » liées à la notion d'organisation : c'est en effet parce qu'elle constituait une « unité organisée » qu'une machine a d'abord pu être qualifiée de « dispositif », ce qui a permis, ensuite, d'utiliser le terme pour désigner la machine elle-même. Ainsi, les deux compréhensions possibles du terme « dispositif » — comme réseau de relations ou comme objet matériel — s'avèrent liées logiquement l'une à l'autre. Par conséquent, tout en reconnaissant la primauté conceptuelle d'une compréhension liée à l'idée de réseau, certains auteurs usent simultanément du terme « dispositif » afin de désigner les objets incarnant matériellement ce réseau. Cet usage se rencontre notamment dans le domaine de l'art<sup>31</sup>, et s'avère tout particulièrement sensible dans le contexte des œuvres praticables considéré ici, dont les dispositifs (au sens foucauldien) prennent, le plus souvent, la forme de « dispositifs techniques<sup>32</sup> ».

Dans le cadre d'une œuvre praticable, la notion de dispositif renverra donc, tout d'abord, au réseau d'agents matériels disposé et mis à disposition par le concepteur de cette œuvre, puis, dans un second temps, à la forme matérielle concrète utilisée pour offrir ce réseau aux « prises » du public. Cette remarque, caractérisant le dispositif comme un réseau d'agents *matériels*, exclut, de fait, la possibilité d'intégrer le *public* à la définition du dispositif. Il convient donc ici de justifier brièvement cette position. Nous pouvons pour cela souligner que, dans l'éventualité où le public serait lui-même partie intégrante du dispositif, il se trouverait alors — en vertu des précisions apportées plus haut — *mis à disposition du public*. Cette éventualité n'est pas nécessairement paradoxale : nous pourrions, par exemple, imaginer une situation où une partie du public se trouverait intégrée dans le dispositif, et « offerte » à l'interaction d'autres spectateurs<sup>33</sup>. Quoique cette situation puisse s'avérer intéressante, elle

---

31. *Ibid.* Note 1.

32. En soi, la notion de dispositif ne saurait, en art, se limiter au cas des œuvres purement technologiques : ainsi, un énoncé textuel, un *protocole*, peut tout à fait, dans le cadre d'une performance par exemple, être considéré comme un dispositif. Cependant, les œuvres praticables considérées ici, basées sur un principe d'exposition d'une situation de production en « temps-réel », se trouvent naturellement prédisposées à dépendre, dans leur mise en œuvre, du déploiement de dispositifs technologiques — ce qui, comme nous le verrons par la suite, n'implique cependant pas que ces œuvres se basent nécessairement sur des technologies *numériques*.

33. On peut citer ici, par exemple, l'œuvre *Half Life* (2001) du collectif Kolkosz, présentée notamment à la biennale de Lyon en 2001. Dans cette œuvre, les spectateurs peuvent s'asseoir face à une console pour participer à un jeu vidéo prenant place dans une reconstitution numérique de l'espace d'exposition. Mais, ce faisant, ils s'installent devant un grand miroir sans tain qui les offre, ainsi, au regard des autres visiteurs. Par leur participation au dispositif qui leur est proposé, les joueurs se trouvent donc intégrés au dispositif (visuel) de l'œuvre.

nous semble toujours survenir dans un second moment par rapport à un premier temps d'interaction, où le public se trouve d'abord amené à interagir avec des agents matériels disposés par le concepteur de l'œuvre<sup>34</sup>. Dans la suite de notre discussion, nous restreindrons donc notre compréhension de la notion de dispositif à celle d'un réseau d'agents *matériels*<sup>35</sup>. Cette précision étant faite, nous pouvons désormais donner sens à la notion de « système » de l'œuvre, introduite au début de cette section : dans la suite de notre discussion, la notion du « système » d'une œuvre praticable renverra donc à *l'union du dispositif et du public*, formant une « unité » spatiale définie, en termes de *structure*, par les réalités matérielles du dispositif et du public, et en termes d'*organisation*, par trois réseaux, trois ensembles de relations productives : (I) le réseau des relations entre les agents matériels du dispositif, (II) le réseau des relations entre les agents humains du public, et (III) le réseau « hétérogène » des relations entre les agents humains du public, et les agents matériels du dispositif.

### 10.3 Auto-maintenance et œuvres praticables

Cette première introduction du schéma organisationnel d'une œuvre praticable, au cours de laquelle nous avons pu souligner le rôle central joué par la notion de dispositif, nous permet à présent de réévaluer l'idée d'une *auto-maintenance* dans ce cadre.

Selon la définition proposée dans le chapitre 8, la notion d'auto-maintenance renvoie au maintien interne des relations de production constitutives d'un système, par la production de structures matérielles réalisant et régénérant ces relations. Cette définition, que nous avons déjà mobilisée dans notre discussion du projet *Unspecified Clay*, mérite d'être réexaminée en regard du contexte des œuvres praticables. Nous nous baserons pour cela sur le concept central de « relations de production » : ce sont au sens strict ces

---

34. Dans l'exemple de l'œuvre *Half Life* précédemment citée, il convient ainsi, en premier lieu, que les conditions favorables à une « installation » prolongée d'une partie du public aient été ménagées par les artistes : canapés confortables, console de jeu vidéo... Une exception à cette remarque réside, bien évidemment, dans le cas d'œuvres impliquant, à temps plein, des acteurs humains, comme récemment démontré par Tino Sehgal dans sa carte blanche au Palais de Tokyo (2016). De telles œuvres, brouillant les frontières entre installation, danse et performance, constituent *dès le départ* des dispositifs « mixtes », mobilisant des agents matériels et humains autres que les spectateurs qui seront amenés à y participer. Ce type d'œuvre nous semble néanmoins suffisamment éloigné des considérations abordées dans cette thèse pour faire le choix de ne pas analyser ici le type de dispositif qu'elles incarnent.

35. Nous ne traiterons donc pas ici du cas des dispositifs artistiques intégrant des éléments discursifs, comme des *protocoles*. Il va sans dire, en revanche, que dans le contexte foucauldien de formation du concept de dispositif, ces éléments discursifs possèdent une importance capitale.

relations qui conduisent à la notion de *système*, et non l'inverse<sup>36</sup>. L'étude de ces relations de production doit donc nous permettre, d'une part, de préciser la notion de « système » d'une œuvre praticable, et d'autre part de préciser quelles entités contribuent à la notion d'auto-maintenance dans ce contexte.

Dans le contexte des œuvres praticables, le critère même d'implication physique du public suppose, bien évidemment, l'existence de relations de production engageant aussi bien des agents humains, issus du public, que des agents matériels disposés par le concepteur de l'œuvre. Parmi ces relations, nous pouvons nous intéresser en particulier aux relations productives établies entre les agents matériels du dispositif et les agents humains du public. Le point principal à noter est que le concepteur de l'œuvre lui-même ne se trouve pas impliqué *directement* dans ces relations : il en met à disposition les conditions de possibilité par un *dispositif*, produit dans un temps antérieur à celui de l'exposition, et opérant, par la suite, de manière autonome (par rapport au concepteur). Il découle de cette remarque que, pour un observateur externe, toute définition d'une forme de « système » de l'œuvre, réalisée sur la base d'une observation des relations productives actives *en exposition*, ne pourra inclure le concepteur<sup>37</sup>.

Cette situation s'avère différente de celle que nous avons préalablement considérée dans le cas de *Unspecified Clay*. Confronté à ce projet, un observateur externe (comme, par exemple, un anthropologue réalisant une étude sur le FabLab Torino) réaliserait en effet que notre action, en tant que concepteur, se trouve dans ce contexte littéralement située au sein même des relations de production à l'œuvre. Nous nous trouvons ainsi non seulement présents physiquement sur le lieu même de la production d'artefacts, mais contribuons directement à cette production, dans le « temps-réel » de son déroulement. Au cours d'une session de travail typique sur le projet, nous sommes ainsi amenés, par exemple, à manipuler l'interface du logiciel de pilotage du robot à chaque itération du cycle de production, ou à modifier le code de ce logiciel « en direct », soit pour implémenter de nouvelles fonctions, soit pour réaliser de pures opérations de *maintenance*, dans le sens technique du terme — c'est-à-dire, notamment, pour corriger des erreurs de programmation, ou pour réaliser d'autres opérations plus « prosaïques », mais essentielles au déroulement du travail : préparation de l'argile, remplissage du réservoir de l'extrudeur... En

---

36. Nous adoptons ici, à nouveau, un point de vue proche de la théorie de l'autopoïèse. La notion de système ne possède en effet pas de réelle « fonction » dans le mécanisme autopoïétique : elle rend simplement compte de la possibilité, pour un observateur externe, d'« isoler » l'unité autopoïétique de son environnement — une possibilité dépendant de la capacité de cette unité à produire, en son sein, une structure lui conférant une extension topologique finie, comme la membrane d'une cellule (Humberto R. Maturana et Francisco J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, *op. cit.*, p. x).

37. Par ailleurs, en raison de l'implication du public dans ces relations, tout « système de l'œuvre » ainsi défini se devra d'inclure le public, comme nous le notions précédemment.

résumé, les relations de production ne peuvent ici être appréciées sans rendre compte de l'engagement direct du concepteur en leur sein, ce qui devrait, en toute logique, conduire un observateur externe à nous inclure (en tant que concepteur) « à l'intérieur » de l'unité de production examinée. Dans un tel cadre, un observateur externe serait ainsi amené à définir un « système » composé, à la fois, des moyens matériels de production, et du concepteur entrant en relation avec ces derniers.

Ces deux analyses de la « position » du concepteur, soulignant les divergences entre *Unspecified Clay* et le contexte des œuvres praticables, reflètent une différence de statut entre ces projets. *Unspecified Clay*, dans l'état actuel de son développement, relève en effet d'une phase de *recherche instrumentale*, et ne constitue pas une œuvre « en exposition ». Par contraste, les œuvres praticables, telles qu'elles sont considérées ici, sont cernées dans une phase de « publicisation », et plus particulièrement, d'exposition<sup>38</sup>. En nous focalisant, dans cette dernière partie, sur ce type particulier de production participative, nous faisons donc le choix de nous pencher sur la question d'une conception de processus de maintenance en vue d'une situation productive réalisée en exposition. En d'autres termes, nous nous plaçons à présent au sein d'une situation de « publicisation », là où, dans les chapitres 8 à 9, nous avons considéré le cas d'une conception de processus de maintenance dans un pur contexte de recherche instrumentale, indépendamment de toute préoccupation liée à une possible exposition future du projet.

Ces remarques nous permettent à présent, comme annoncé plus haut, de préciser dans son ensemble notre compréhension de la notion d'auto-maintenance.

Le chapitre 9, consacré au projet *Unspecified Clay*, nous a donné l'occasion d'une première discussion de la notion d'auto-maintenance dans le cadre d'une phase de recherche instrumentale. Notre analyse s'est alors centrée sur une discussion *pratique* de la notion d'auto-maintenance, montrant comment les procédures techniques de rétroaction mises en place permettaient, à la fois, la fabrication d'artefacts matériels et la « régénération » itérative des relations de production. Nous avons alors conclu que cette situation correspondait bien à une réalisation pratique du concept d'auto-maintenance; mais notre analyse, fixée exclusivement sur la régénération des relations de production impliquant des agents *matériels*, excluait alors de fait les relations engageant le concep-

---

38. Rien n'empêche, bien sûr, que ces œuvres, dans une logique itérative, fassent l'objet de nouveaux développements et recherches entre deux expositions : cette propriété, pouvant conduire dans certains cas à un « versionnage » des œuvres (comme nous l'avons vu, par exemple, dans les deux versions de l'œuvre *SCUMAK* de Roxy Paine), constitue en fait l'une des caractéristiques saillantes du paradigme de recherche instrumentale (Samuel Bianchini, « Towards Organogenesis: For an Instrumental Approach in Research in Art », *op. cit.*).

teur lui-même. Comme nous allons le voir à présent, la prise en compte de ces relations productives nous permet en réalité de renforcer nos premières conclusions.

La notion d'auto-maintenance se traduit par la capacité d'un système à assurer lui-même la stabilité de ses relations de production internes, autrement dit, à maintenir lui-même un processus d'interaction émergente entre les agents impliqués dans son régime de production. Au prisme de notre nouvelle compréhension du concepteur comme l'un de ces agents, cette notion d'auto-maintenance impliquerait, dès lors, que les interactions du concepteur avec le reste du système productif soient *elles-mêmes maintenues*, de manière interne, au sein de ce système. En d'autres termes, l'activité de conception de processus de maintenance, l'une des principales actions réalisées par le concepteur<sup>39</sup>, deviendrait, elle-même, l'objet d'une auto-maintenance au sein du système productif. Or, cette logique circulaire n'est en rien contradictoire, mais traduit, de manière fondamentale, la dimension circulaire, incrémentale du processus de recherche instrumental lui-même. Selon ce point de vue, les processus de maintenance mis en place par le concepteur ne contribuent pas simplement à régénérer les tensions productives existant entre les différents composants *matériels* du système (par exemple, dans *Unspecified Clay*, entre la masse d'argile déposée à un instant donné et les algorithmes du logiciel), mais également à maintenir l'existence d'une tension entre ces éléments matériels et le chercheur lui-même — autrement dit, à « régénérer » une situation de tension entre forces productives, une « métastabilité » nécessaire à la poursuite de toute activité de recherche.

L'ensemble de la situation de recherche instrumentale s'interprète donc bien sous l'angle de la notion d'auto-maintenance — à condition de considérer que les processus de maintenance, mis en place par le concepteur, maintiennent non seulement la possibilité d'une production de structures matérielles « en cours de recherche » (comme les artefacts en argile d'*Unspecified Clay*), mais contribuent également à maintenir les conditions de réalisation de la situation de recherche instrumentale elle-même. Il convient donc, dès lors, de comprendre la situation de recherche instrumentale comme une véritable situation *productive* (dont l'issue consiste, notamment, en la production d'un ou plusieurs *instruments*<sup>40</sup>), dans le « temps-réel » de laquelle la conception de

---

39. Voir à ce titre, dans la section 9.3, notre description des enjeux liés à la conception de procédures de rétroaction dans le cadre d'*Unspecified Clay*.

40. Dans le cas d'*Unspecified Clay*, les objets produits ne se limitent ainsi pas aux artefacts en argile, mais concernent d'autres artefacts possédant un statut *instrumental*, comme le logiciel, le système de captation... La production continue de ces artefacts, dans le « temps-réel » de la recherche, s'avère nécessaire à l'auto-maintenance de la situation de recherche instrumentale.

processus de maintenance se trouve elle-même maintenue, c'est-à-dire perpétuellement remise en jeu et régénérée. Nous retrouvons ici une idée introduite par la philosophie des sciences d'Andrew Pickering, discutée dans la section 6.3 : une vision de toute activité de recherche comme un processus émergent, une « danse d'agentivité » entre acteurs humains et matériels, affirmant la dépendance des produits de l'activité de conception humaine (et plus largement, de l'ensemble de ce que Pickering nomme la « culture » scientifique) à l'égard de l'évolution *dynamique* du « système » de la recherche dans son ensemble.

La situation s'avère différente dans le cadre des œuvres praticables. Dans ce contexte, la notion d'auto-maintenance se comprend en effet comme la capacité d'assurer la stabilité de relations impliquant l'agentivité matérielle d'un dispositif et l'agentivité humaine du public, de manière interne au « système » de l'œuvre formé par la réunion de ces deux entités (dispositif et public). La propriété d'auto-maintenance signale donc, dans ce cadre, la capacité de l'œuvre praticable à se (re)produire elle-même en tant qu'œuvre « active », indépendamment de toute intervention directe du concepteur, ou de tout autre « agent de maintenance » extérieur au système (comme par exemple un médiateur de l'espace d'exposition). Cette compréhension rassemble les deux dimensions de la maintenance, technique et esthétique, que nous avons précédemment soulignées. Sur le plan *technique*, la notion d'auto-maintenance se rapporte ainsi à la capacité de l'œuvre à se maintenir « en fonctionnement » de manière autonome : ce n'est en effet qu'en maintenant certaines relations entre agents matériels, constitutives de son dispositif, que l'œuvre pourra se maintenir en tant qu'œuvre active — dans le sens d'un fonctionnement technique « normal », garant de la capacité du dispositif à engager une relation productive avec le public. Sur le plan *esthétique*, la notion d'auto-maintenance se rapporte, en priorité, à la stabilisation des relations productives entre dispositif et public, dont il importe, ici, de souligner le caractère constitutif au regard de la notion d'œuvre praticable. Comme le signale notre inclusion du public au « système » de l'œuvre, une œuvre praticable ne peut en effet « faire œuvre », au sens strict, qu'en présence du public. La stabilisation des relations productives entre public et dispositif s'avère donc garante de la dimension *active* de l'œuvre, comprise ici comme liée à l'existence d'une relation non seulement esthétique, mais aussi *physique*, entre le public et l'œuvre. De manière essentielle, les processus conçus dans la perspective d'une auto-maintenance chercheront donc à prendre en charge conjointement ces deux aspects, technique et esthétique, de la maintenance de l'œuvre. Les méthodes déployées à ce titre pourront prendre des formes diverses, que nous détaillerons dans la suite de cette partie.

Un point doit ici être souligné : la notion d'une « stabilisation » des relations entre le public et le dispositif n'est pas réductible à une forme de *contrôle* du public, dans le sens « coercitif » associé, chez Foucault, à la notion de dispo-

sitif<sup>41</sup>. Comme le soulignent Samuel Bianchini et Erik Verhagen, l'idée même de dispositif s'avère, dans le domaine artistique, inséparable de la possibilité de son questionnement, de sa remise en cause, voire de sa « profanation » (un terme proposé par Giorgio Agamben) par le public<sup>42</sup>. Cette remarque entraîne une conséquence importante sur le type de *processus de maintenance* « embarqué » (ou implémenté) par le dispositif de l'œuvre praticable. Dans la perspective soulignée par les auteurs, tout dispositif artistique doit en effet ménager, auprès des spectateurs, la possibilité de développer une attitude *réflexive* par rapport à sa fonction même en tant que dispositif, à sa qualité intrinsèque de « contrôleur ». De manière essentielle, il convient en ce sens que ces dispositifs ménagent de véritables « prises<sup>43</sup> » permettant au public de développer une attitude réflexive *par rapport à son propre engagement dans une logique de maintenance*.

Cette dimension réflexive, essentielle, se pose comme une condition cruciale à laquelle la notion d'auto-maintenance pourra être mobilisée dans le contexte d'une œuvre praticable — autrement dit, dans un contexte où cette notion se traduit, nécessairement, par une stabilisation de relations productives impliquant le public, par l'intermédiaire de processus de maintenance « embarqués » dans un dispositif destiné à jouer le rôle de *contrôleur*. Sans une dimension réflexive venant remettre en cause cette fonction de contrôle, la notion même d'un art invitant à la participation pourrait en effet inciter à la méfiance : car, comme le soulignent Samuel Bianchini et Erik Verhagen, toute participation revient potentiellement « à jouer à un jeu dont les règles nous ont été imposées<sup>44</sup> ». Le contexte des œuvres praticables nous incite ainsi, fondamentalement, à questionner la notion de contrôle sous-entendue par l'idée même d'une auto-maintenance, de manière plus urgente que notre précédent examen de la situation de recherche instrumentale (où le seul agent humain susceptible d'être « contrôlé » était le concepteur lui-même) avait pu nous le faire sentir. Comme nous allons le voir à présent, ces questionnements relatifs à la notion de contrôle se cristallisent dans l'approche cybernétique, et tout particulièrement dans les travaux « praticables » de Gordon Pask.

---

41. Dans l'interview citée précédemment, Foucault donne ainsi l'exemple du dispositif psychiatrique, « dispositif de contrôle—assujettissement de la folie, de la maladie mentale, de la névrose », répondant à l'« impératif stratégique » de la « résorption d'une masse de population flottante qu'une société à économie de type essentiellement mercantiliste trouvait encombrante » (Michel Foucault, « Le jeu de Michel Foucault », *op. cit.*, p. 299).

42. Samuel Bianchini et Erik Verhagen, « Practicable—Art in the Conditional », *op. cit.*, p. 11.

43. Samuel Bianchini et Jean-Paul Fourmentraux, « Médias praticables : L'interactivité à l'œuvre », *op. cit.*, p. 103.

44. Samuel Bianchini et Erik Verhagen, « Practicable—Art in the Conditional », *op. cit.*, p. 7. Notre traduction.



Fig. 10.4 — Gordon Pask, *The Colloquy of Mobiles*, 1968 : vue des mobiles mâles (à gauche) et femelles (à droite) (source : Gordon Pask, « A Comment, a Case History and a Plan », dans Jasia Reichardt (dir.), *Cybernetics, Art and Ideas*, Londres, Studio Vista, 1971, p. 97).

#### 10.4 Gordon Pask : environnements réactifs

Comme le montre Margit Rosen dans son essai *Gordon Pask's Cybernetic Systems: Conversations After the End of the Mechanical Age*<sup>45</sup>, la cybernétique joue, à la fin des années 60, un rôle central dans l'émergence de la notion d'œuvre praticable. L'une des étapes les plus emblématiques de cette brève, mais prolifique période de rapprochement entre la cybernétique et les arts, est l'exposition *Cybernetic Serendipity*, organisée en 1968 au Institute of Contemporary Arts de Londres par Jasia Reichardt. Consacrée aux relations entre « la technologie et la créativité<sup>46</sup> », l'exposition présente, dans une section dédiée aux « [d]ispositifs cybernétiques envisagés en tant qu'œuvres d'art, environnements cybernétiques, robots télécommandés et machines à peindre<sup>47</sup> », des systèmes conçus par plusieurs cybernéticiens : parmi ceux-ci se trouve notamment une installation intitulée *The Colloquy of Mobiles*<sup>48</sup>, conçue par Gordon Pask.

*The Colloquy of Mobiles* se composait de deux mâles « mâles » et de trois « femelles » (figure 10.4). Les mâles, dotés d'un projecteur lumineux, étaient soumis au « désir<sup>49</sup> » de recevoir de la lumière — désir qu'ils ne pouvaient satisfaire seuls. Les femelles, dotées de miroirs, pouvaient capter la lumière émise par les mâles, et la renvoyer vers eux. Les différents mobiles, capables de tourner sur eux-mêmes autour d'un axe vertical, cherchaient alors à s'orienter pour atteindre une interaction satisfaisante entre mâles et femelles. En l'absence du public, l'installation progressait ainsi spontanément vers un état stable puis, au bout d'un certain temps, se mettait à la recherche d'une nouvelle configuration<sup>50</sup>. Les spectateurs pouvaient, s'il le souhaitaient, interagir avec les mobiles, en créant de nouveaux foyers d'excitation lumineuse à l'aide de torches, ou en choisissant simplement de bloquer les rayons émis par les mâles. Cette participation du public entraînait alors une reconfiguration du dispositif, qui tentait de s'adapter à son nouvel environnement. L'ensemble du système, dispositif et public, s'engageait ainsi dans un processus émergent de « dialogue », ou de

---

45. Margit Rosen, « Gordon Pask's Cybernetic Systems: Conversations After the End of the Mechanical Age », dans Samuel Bianchini et Erik Verhagen (dir.), *Practicable: From Participation to Interaction in Contemporary Art*, Cambridge, MIT Press, 2016, p. 25–38.

46. Jasia Reichardt (dir.), *Cybernetic Serendipity: The Computer and the Arts*, catalogue d'exposition (Londres, Institute of Contemporary Arts, 2 août – 20 octobre 1968), Londres, Studio International, 1968, p. 5. Notre traduction.

47. *Ibid.*, p. 5. Notre traduction.

48. Gordon Pask, « The Colloquy of Mobiles », dans Jasia Reichardt (dir.), *Cybernetic Serendipity: The Computer and the Arts*, Londres, Studio International, 1968, p. 34–35.

49. *Ibid.*, p. 34. Notre traduction.

50. Usman Haque, « The Architectural Relevance of Gordon Pask », *Architectural Design*, vol. 77, n° 4, 2007, p. 60.

*conversation* — une notion centrale dans l'approche paskienne, désignant, selon Usman Haque, l'idée d'une « relation mutuellement constructive<sup>51</sup> » entre humains et machines, mise en œuvre à travers des processus d'exploration et d'apprentissage<sup>52</sup>.

*The Colloquy of Mobile* s'inscrit dans une série de recherches développées par Pask dans les années 60 et 70 autour de la problématique des « environnements réactifs<sup>53</sup> » — laquelle trouvera, au-delà du contexte de l'exposition *Cybernetic Serendipity*, une résonance spécifique dans le champ de l'architecture. En 1964, Pask contribue ainsi au projet du *Fun Palace* de la metteur en scène Joan Littlewood et de l'architecte Cedric Price, dont il dirige le « Cybernetics Subcommittee<sup>54</sup> », puis, de 1968 à 1976, collabore régulièrement avec le Architecture Machine Group, un laboratoire interdisciplinaire fondé au MIT en 1967 par Nicholas Negroponte et Leon Groisser<sup>55</sup>.

En 1969, Pask publie dans la revue *Architectural Design* un article intitulé *The Architectural Relevance of Cybernetics*<sup>56</sup>, énonçant le programme conceptuel sous-jacent à ces recherches et posant les bases d'un « paradigme cybernétique » de la conception architecturale. Si la notion d'un environnement architectural réactif s'écarte, au sens strict, du contexte des œuvres praticables, les problématiques soulevées par Pask dans cet article se rapportent directement à nos préoccupations<sup>57</sup>. Comme nous allons le voir à présent, les environne-

---

51. *Ibid.*, p. 55. Notre traduction.

52. Bien que nous nous préoccupions ici essentiellement de relations entre humains et machines, la *Conversation Theory* de Gordon Pask se présente en réalité comme une théorie cybernétique générale de l'apprentissage, applicable de manière indifférenciée à tout type d'interaction : humain-humain, humain-machine, ou même machine-machine. Sur ce sujet, voir notamment : Gordon Pask, *Conversation Theory: Applications in Education and Epistemology*, Amsterdam, Elsevier, 1976. Par ailleurs, il convient de remarquer qu'au sens strict, la notion de « conversation » n'est formalisée par Gordon Pask qu'à partir du milieu des années 70. Néanmoins, nous prenons ici le parti, suivi par plusieurs auteurs (dont Usman Haque dans l'article *The Architectural Relevance of Gordon Pask*, cité précédemment, et Andrew Pickering dans l'ouvrage *The Cybernetic Brain*, mentionné par la suite), de considérer la notion de conversation comme un leitmotiv de l'ensemble de l'œuvre de Pask.

53. Gordon Pask, « The Colloquy of Mobiles », *op. cit.*, p. 34. Notre traduction.

54. Stanley Mathews, « The Fun Palace: Cedric Price's Experiment in Architecture and Technology », *Technoetic Arts*, vol. 3, n° 2, 2005, p. 83.

55. Molly Wright Steenson, « Architectures of Information: Christopher Alexander, Cedric Price, and Nicholas Negroponte and MIT's Architecture Machine Group », thèse de doctorat, Princeton University, 2014, p. 9.

56. Gordon Pask, « The Architectural Relevance of Cybernetics », *Architectural Design*, vol. 9, n° 69, 1969, p. 494-496.

57. Le contexte de l'espace public, auquel pourraient notamment se destiner ces environnements, s'avère *a priori* distinct de celui d'une exposition; cependant, comme nous l'avons déjà souligné dans la section 8.2, de nombreux éléments architecturaux réactifs sont eux-mêmes présentés au sein d'expositions ou de foires. Par ailleurs, l'article *The Architectural Relevance of Cybernetics* semble lui-même indiquer une certaine porosité de la notion d'envi-

ments architecturaux décrits par Pask s'avèrent en effet pensés comme de véritables *dispositifs*, intégrant des processus de maintenance destinés à induire la mise en place de relations productives avec leurs « utilisateurs ».

Au-delà de toute considération technique, la notion d'environnement réactif se développe, chez Pask, dans le cadre d'une pensée systémique de l'architecture. Pour Pask, l'architecte ne conçoit pas seulement une structure architecturale, mais un *système* incluant cette structure et ses habitants : « les structures se comprennent en tant que parties de systèmes plus larges, incluant des composantes humaines, et l'architecte est avant tout concerné par ces systèmes de taille supérieure ; *voilà* ce que l'architecte conçoit — et non pas simplement les parties en briques et en mortier<sup>58</sup> ». Cette pensée systémique conduit Pask à envisager la conception architecturale comme un processus *dynamique* : l'ensemble des interactions futures susceptibles de se produire au sein du système, entre la structure et ses habitants, doivent être prises en compte par l'architecte. Le dynamisme de ces interactions, pour Pask, n'est pas simplement le fait de la composante « humaine » du système : les structures architecturales doivent elles aussi être envisagées de manière dynamique, « comme régulant continuellement [leurs] habitants humains<sup>59</sup> ». Pour Pask, toute structure architecturale représente en effet une instance de *contrôle* : « [un édifice] interagit perpétuellement avec ses habitants, d'un côté en se mettant à leur service, et de l'autre en contrôlant leur comportement<sup>60</sup> ». La vision systémique de la conception incite donc à penser les artefacts architecturaux non seulement comme des objets structurés, mais *structurants* : ils sont mis à disposition par le concepteur afin de « conduire leurs occupants vers un niveau plus élevé d'organisation<sup>61</sup> ». Cet énoncé nous renvoie, bien entendu, à la notion de *dispositif*. À l'instar du contexte des œuvres praticables, la vision paskienne de l'architecture

---

ronnement architectural. Soulignant ses précédentes contributions de recherche au domaine des environnements réactifs, Pask cite ainsi deux dispositifs que nous ne qualifierions sans doute pas spontanément d'architecturaux (*Ibid.*, p. 496) : son système Musicolour et son installation *The Colloquy of Mobiles* (sur le système Musicolour de Pask, voir notamment : Gordon Pask, « A Comment, a Case History and a Plan », dans Jasia Reichardt (dir.), *Cybernetics, Art and Ideas*, Londres, Studio Vista, 1971, p. 76-99). En termes de porosité entre les notions d'environnement architectural réactif et d'œuvre praticable, nous pouvons également citer le projet SEEK, développé par le Architecture Machine Group et exposé lors de l'exposition *Software*, organisée en 1970 par Jack Burnham au Jewish Museum de New York (Jack Burnham (dir.), *Software: Information Technology: Its New Meaning For Art*, catalogue d'exposition (New York, Jewish Museum, 16 septembre – 8 novembre 1970), New York, Jewish Museum, 1970).

58. Gordon Pask, « The Architectural Relevance of Cybernetics », *op. cit.*, p. 494. Notre traduction, italiques dans le texte.

59. *Ibid.*, p. 494. Notre traduction.

60. *Ibid.*, p. 494. Notre traduction.

61. *Ibid.*, p. 495. Notre traduction.

nous conduit ainsi à envisager la notion d'un « système » architectural susceptible d'une évolution dynamique, composé du dispositif conçu par l'architecte — dispositif que Pask qualifierait plutôt de *contrôleur* — et de ses « utilisateurs » (ses habitants).

Les *environnements réactifs* peuvent alors être conçus comme une extension de cette compréhension dynamique de la notion de système architectural : ces dispositifs prolongent en effet l'idée d'une interaction dynamique avec les habitants, en se dotant d'un comportement *littéralement* dynamique, exprimé par la reconfiguration *matérielle* des structures qui les composent. Grâce à cette propriété, l'interaction entre les habitants et le dispositif peut atteindre un niveau d'intensité supérieur, se rapprochant davantage de l'idéal paskien d'une « conversation ». En effet, bien que des structures physiquement statiques puissent se trouver impliquées dans un véritable « dialogue » avec leurs habitants, ces structures manquent néanmoins d'« initiative » : dans une structure telle que le Parque Güell<sup>62</sup> d'Antoni Gaudí, note Pask, la dynamique du dialogue s'avère en effet entièrement dépendante « du mouvement des visiteurs ou des modifications de leur attention<sup>63</sup> ». Par contraste, la structure d'un environnement réactif s'avère véritablement capable d'inviter *physiquement* ses utilisateurs à l'action.

La notion d'environnement réactif s'inscrit ainsi dans le cadre d'une pensée de la conception architecturale que nous pourrions qualifier d'« écologique », au sens où il ne s'agit plus, désormais, d'envisager les structures architecturales comme des entités isolées, mais précisément comme de véritables *environnements*, susceptibles d'être « habités » par la présence et les actions de leurs habitants. Les idées ici proposées par Gordon Pask peuvent en ce sens être directement rapprochées de la notion d'« esthétique des systèmes » (*systems esthetics*), développée, de manière contemporaine aux réflexions de Pask, par le critique d'art, théoricien et commissaire d'exposition Jack Burnham. Ce projet théorique, poursuivi en particulier dans les articles *Systems Esthetics*<sup>64</sup> et *Real*

---

62. Pour Pask, le Parque Güell « constitue, à un niveau symbolique, l'une des structures les plus cybernétiques qui soient », conçue pour « inspirer un dialogue productif et agréable » (*Ibid.*, p. 495, notre traduction). Pask continue ainsi : « [a]lors que vous découvrez le parc, des impressions sont formulées par des diffuseurs, votre exploration est guidée par des canaux de rétroaction spécialement préparés, et l'introduction d'une forme de variété à certains points-clés (valeur de surprise) vous incite à continuer votre exploration » (*Ibid.*, p. 495, notre traduction). Comme nous le verrons plus loin, ces remarques viennent appuyer l'idée d'une compréhension non coercitive du concept de contrôle cybernétique : le « contrôle » exercé par le Parque Güell sur ses visiteurs semble en effet n'avoir d'autre objectif que d'inviter à la découverte de la structure.

63. *Ibid.*, p. 496. Notre traduction.

64. Jack Burnham, « Systems Esthetics », *Artforum*, vol. 7, n° 1, 1968, p. 30-35.

*Time Systems*<sup>65</sup>, s'inscrit en effet dans le contexte d'une remise en cause d'une compréhension formaliste de l'œuvre d'art, dont les écrits de Clément Greenberg, depuis la fin des années 1940, avaient posé les principales fondations théoriques. Face à la théorie greenbergienne, posant le modernisme artistique comme une attitude d'affirmation positive de l'autonomie et des spécificités de chaque médium, et avançant la nécessité d'une exploration formelle et réflexive de ces spécificités — comme la planéité (*flatness*) du support dans le cas de la peinture<sup>66</sup> —, l'esthétique des systèmes affirme que l'« art ne réside pas dans les objets matériels, mais dans les relations entre les personnes, ainsi qu'entre les personnes et les composantes de leur environnement<sup>67</sup> ». Cette esthétique entend ainsi saisir la « prise de distance par rapport à l'objet d'art<sup>68</sup> » caractérisant, dans leur ensemble, les diverses pratiques « post-formalistes » apparues au cours des années 60 (antiforme, process art, art conceptuel, land art<sup>69</sup>...), et rendre compte d'un récent « changement de paradigme socio-scientifique<sup>70</sup> », consistant en la « transition d'une culture centrée sur les objets vers une culture centrée sur les systèmes<sup>71</sup> ».

Entretien des proximités fortes avec le travail de l'artiste Hans Haacke, dont Burnham était un ami proche<sup>72</sup>, l'esthétique des systèmes s'applique notamment — quoique non exclusivement — à des œuvres conçues autour de processus dynamiques, naturels ou technologiques<sup>73</sup> (figure 10.5). À l'instar de Gordon Pask, Jack Burnham lie ainsi l'adoption d'une approche systémique à la prise en compte effective d'une capacité d'évolution dynamique des œuvres ou des « environnements<sup>74</sup> » artistiques dans « temps-réel » de leur exposition,

65. Jack Burnham, « Real Time Systems », *Artforum*, vol. 8, n° 1, 1969, p. 49–55.

66. Clement Greenberg, « Modernist Painting », dans Francis Frascina et Charles Harrison (dir.), *Modern Art and Modernism: A Critical Anthology*, Londres, Paul Chapman Publishing, 1988, p. 6.

67. Jack Burnham, « Systems Esthetics », *op. cit.*, p. 31. Notre traduction.

68. Jack Burnham, « Notes on Art and Information Processing », dans *Software: Information Technology: Its New Meaning For Art*, catalogue d'exposition (New York, Jewish Museum, 16 septembre – 8 novembre 1970), New York, Jewish Museum, 1970, p. 10. Notre traduction.

69. Luke Skrebowski, « All Systems Go: Recovering Hans Haacke's Systems Art », *Grey Room*, n° 30, 2008, p. 61.

70. Luke Skrebowski, « All Systems Go: Recovering Jack Burnham's 'Systems Aesthetics' », *Tate Papers*, 5, 2006, en ligne : <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/05/all-systems-go-recovering-jack-burnhams-systems-aesthetics> (consulté le 10 août 2017). Notre traduction.

71. Jack Burnham, « Systems Esthetics », *op. cit.*, p. 31. Notre traduction.

72. Luke Skrebowski, « All Systems Go: Recovering Hans Haacke's Systems Art », *op. cit.*, p. 60.

73. Sur les liens entretenus entre Jack Burnham et Hans Haacke autour de la notion d'esthétique des systèmes, on pourra notamment se référer à l'ouvrage : Emanuele Quinz (dir.), *Jack Burnham, Hans Haacke : Esthétique des systèmes*, Dijon, Les Presses du Réel, 2015.

74. Jack Burnham, « Systems Esthetics », *op. cit.*, p. 35. Notre traduction.



Fig. 10.5 — Hans Haacke, *Rhine Water Purification Plant*, 1972 (source : Luke Skrebowski, « All Systems Go: Recovering Hans Haacke's Systems Art », *Grey Room*, n° 30, 2008, p. 61).

sous l'influence des interactions dans lesquels ceux-ci se trouvent engagés : « alors que l'objet possède presque toujours une forme et des limites figées, la cohérence d'un système peut être amenée à évoluer dans le temps et l'espace ; son comportement peut être déterminé tant par des conditions externes que par ses propres mécanismes de contrôle<sup>75</sup> ». La vision dynamique de l'œuvre d'art développée par l'esthétique des systèmes implique donc une évolution du rôle même de l'artiste : non plus producteur d'une forme matérielle définitive, l'artiste se trouve désormais compris comme « un perspectiviste prenant en considération les objectifs, les limites, la structure, les entrées et sorties, ainsi que les activités relatives à l'intérieur et à l'extérieur du système<sup>76</sup> ».

Cette idée d'un artiste *projetant* les capacités d'évolution future d'un système, sans chercher à en arrêter à aucun moment la forme définitive, renvoie directement à la vision de la conception proposée par Gordon Pask dans son article *The Architectural Relevance of Cybernetics*. Les nouveaux enjeux liés à la conception d'environnements réactifs, destinés à s'engager dans un processus d'évolution dynamique en interaction avec les habitants, conduisent en effet

75. *Ibid.*, p. 32. Notre traduction.

76. *Ibid.*, p. 32. Notre traduction.

Gordon Pask à introduire l'idée d'un « paradigme cybernétique de conception<sup>77</sup> ». Selon ce point de vue, le rôle de l'architecte est désormais de concevoir des dispositifs capables de guider, en « temps-réel », l'évolution des systèmes architecturaux vers une croissance « saine », à l'aide de « règles d'évolution », « intégrées » au dispositif :

« Systems, notably cities, grow and develop and, in general evolve (...). An immediate practical consequence of the evolutionary point of view is that architectural designs should have rules for evolution built into them if their growth is to be healthy rather than cancerous<sup>78</sup>. »

Le paradigme cybernétique de conception signale ainsi, fondamentalement, l'abandon d'une vision *prescriptive* de la conception au profit d'une vision *prédictive*<sup>79</sup>. Dans ce paradigme, l'architecte « ne peut pas simplement se contenter d'observer en retrait l'évolution des structures qu'il a conçues<sup>80</sup> » : le point de vue pensant la conception comme une spécification explicite, définitive, de la configuration d'une structure, se montre en effet insuffisant lorsqu'il s'agit de prendre en charge les évolutions imprévues nées de la rencontre entre cette structure et ses habitants. Soulignant que la « finalité » réelle d'un environnement réactif sera, par nature, presque toujours *indéterminée* lors de sa conception<sup>81</sup>, mais émergera dans le cours même de ses interactions avec ses habitants, Pask conçoit l'action initiale du concepteur comme la spécification d'un « ensemble de contraintes permettant d'obtenir certains modes d'évolution supposément désirables<sup>82</sup> », ainsi que d'un jeu de règles, ou « principes d'évolution<sup>83</sup> », permettant d'adapter ces contraintes en réponse à l'évolution émergente du système. Par ces principes, le dispositif pourra alors adapter à tout moment sa structure matérielle aux comportements de ses habitants, et, sur le long terme, engager avec ces derniers un « dialogue » visant à *maintenir*, en temps-réel, une organisation « saine » du système. Le paradigme cybernétique de conception peut dès lors pleinement être envisagé, à cet égard, en tant qu'évolution de l'activité du concepteur vers une *conception de processus de maintenance*.

Un point essentiel doit ici être noté. Les processus de maintenance (ou « principes d'évolution ») envisagés par Pask visent à maintenir l'organisa-

---

77. Gordon Pask, « The Architectural Relevance of Cybernetics », *op. cit.*, p. 496. Notre traduction.

78. *Ibid.*, p. 495.

79. *Ibid.*, p. 496.

80. *Ibid.*, p. 495. Notre traduction.

81. *Ibid.*, p. 496.

82. *Ibid.*, p. 496. Notre traduction.

83. *Ibid.*, p. 496. Notre traduction.

tion du système architectural en l'absence du concepteur : il s'agit donc bien de permettre au système architectural de *s'auto-maintenir*, d'inscrire les relations entre son dispositif et son habitants dans la perspective d'une évolution « saine ». En lieu de la notion d'autopoïèse, qui ne sera développée que quelques années plus tard, Pask qualifie ce comportement « auto-maintenu » du système architectural au moyen d'un autre concept fondamental, celui d'*auto-organisation*. Pask note ainsi :

« Urban development can be modelled as self organizing system (a formal statement of 'Evolutionary ideas in architecture') and in these terms it is possible to predict the extent to which the growth of a city will be chaotic or ordered by differentiation<sup>84</sup>. »

Cette notion d'auto-organisation, introduite dans le discours cybernétique à la fin des années 40 (notamment à travers l'homéostat de W. Ross Ashby, que nous présenterons plus loin), peut être considérée comme l'une des bases conceptuelles de la théorie autopoïétique. Chercher à rendre compte en détails de la trajectoire historique et conceptuelle conduisant de l'auto-organisation à l'autopoïèse nous entraînerait, cependant, hors du cadre de cette thèse : comme le montre Evelyn Fox Keller dans un historique publié, en deux parties, dans le journal *Historical Studies in the Natural Sciences*, la notion d'auto-organisation nous renvoie, entre autres, aux considérations de Kant sur les propriétés constitutives de l'organisation du vivant<sup>85</sup>, présentées en 1790 dans l'ouvrage *Critique de la faculté de juger*<sup>86</sup>, au développement d'un nouveau paradigme d'étude des systèmes physiques complexes, impulsé notamment par les travaux d'Ilya Prigogine sur les structures dissipatives<sup>87</sup>, ainsi qu'à un vaste ensemble de recherches interdisciplinaires menées dans les années 60, au sein duquel la cybernétique, à travers des personnalités comme Gordon Pask et Heinz von Foerster, joue un rôle majeur<sup>88</sup>. Le concept d'auto-organisation a donc connu de nombreuses applications et transformations, recouvrant des réalités scientifiques différentes. Il apparaîtra dès lors clair qu'il serait illusoire de chercher à en proposer une définition générale, y compris si nous nous restreignons à

84. *Ibid.*, p. 496.

85. Evelyn Fox Keller, « Organisms, Machines, and Thunderstorms: A History of Self-Organization, Part One », *op. cit.*, p. 47.

86. Emmanuel Kant, *Critique de la faculté de juger*, traduction d'Alain Renaut, Paris, Flammarion, 2015.

87. Evelyn Fox Keller, « Organisms, Machines, and Thunderstorms: A History of Self-Organization, Part Two. Complexity, Emergence, and Stable Attractors », *Historical Studies in the Natural Sciences*, vol. 39, n° 1, 2009, p. 3.

88. Evelyn Fox Keller, « Organisms, Machines, and Thunderstorms: A History of Self-Organization, Part One », *op. cit.*, p. 70-72.

la seule période « cybernétique » de son développement, courant de la fin des années 40 au début des années 70. Malgré cette difficulté inhérente au projet d'une définition de l'auto-organisation — au-delà de sa compréhension intuitive renvoyant à l'idée d'un « système capable de s'organiser lui-même<sup>89</sup> » —, il nous apparaît cependant indispensable de livrer une première remarque sur cette notion, que nous serons conduits — par l'intermédiaire de références à la cybernétique et de notre projet *Manœuvres* — à mobiliser fréquemment dans la suite de notre exposé.

Le rapprochement entre auto-organisation et auto-maintenance nous conduit en effet à examiner une contradiction apparente entre ces deux concepts, issue de la confrontation de l'idée d'auto-organisation avec la *définition* de l'organisation, telle que l'ont proposée Maturana et Varela dans la théorie de l'autopoïèse, sur laquelle nous nous sommes basés pour construire notre notion d'auto-maintenance. Dans sa compréhension autopoïétique, l'organisation est en effet comprise comme le réseau de processus de production dont la réalisation permet au système autopoïétique de se constituer en tant qu'unité, et dont la maintenance se donne comme la condition de survie même de ce système : à son niveau le plus fondamental, l'autopoïèse renvoie donc à la capacité d'un système à *stabiliser* son organisation constitutive. Ainsi formulée, l'autopoïèse semble fondamentalement *adverse* à l'idée même d'auto-organisation, dans la mesure où un système faisant évoluer son organisation remettrait en cause les relations productives le constituant en tant qu'unité : en d'autres termes, si l'organisation venait à changer, le système serait menacé dans sa définition même. Comment notre idée d'auto-maintenance, construite en lien avec cette compréhension autopoïétique de la notion d'organisation, pourrait elle dès lors se montrer compatible avec celle d'auto-organisation ? Nous pouvons répondre à cette question, et lever cette contradiction apparente entre les notions d'auto-organisation et d'auto-maintenance, selon deux approches distinctes, que nous allons examiner à présent.

La première approche consiste à remonter à la distinction entre *organisation* et *structure*, centrale dans la théorie autopoïétique. L'autopoïèse n'est en effet pas contraire à l'idée selon laquelle un système pourrait héberger une dynamique d'évolution interne ; mais elle localise cette possibilité d'évolution dans la *structure* de ce système, réalisation *matérielle* de son organisa-

---

89. Brian Massumi, traducteur en langue anglaise de l'ouvrage *Mille Plateaux* de Gilles Deleuze et Félix Guattari, propose la définition générale suivante de l'auto-organisation : « la production spontanée d'un niveau de réalité, doté de ses propres règles de formation et niveaux de connectivité » (Brian Massumi, « The Autonomy of Affect », *Cultural Critique*, n° 31, 1995, p. 93, notre traduction, cité dans Warren Sack, « Network Aesthetics », dans Victoria Vesna (dir.), *Database Aesthetics: Art in the Age of Information Overflow*, Minneapolis, University of Minnesota Press, 2007, p. 204).

tion, plutôt que dans son organisation elle-même. Une première solution permettant de rendre compatible la notion d'auto-organisation avec celle d'auto-maintenance serait ainsi de considérer que l'expression « auto-organisation » renverrait, en réalité, à la capacité d'un système à faire évoluer sa propre structure matérielle, à s'« auto-structurer ». Dans cette perspective, en cohérence avec notre idée d'auto-maintenance, l'évolution de la structure d'un système auto-organisateur devra alors être réalisée par les relations de production constitutives de ce système : autrement dit, c'est en se dotant, en premier lieu, d'une *organisation* adéquate, que ce système pourra s'« auto-organiser » — c'est-à-dire s'auto-structurer. Dans cette perspective, l'auto-organisation peut être comprise comme un processus *matériel* d'évolution de la structure d'un système, permettant d'en stabiliser l'organisation constitutive — par exemple, lorsque cette structure se trouve animée d'un processus de croissance interne, ou lorsque le système est placé sous l'influence de conditions extérieures (autrement dit, d'un environnement) appelant à la mise en œuvre d'un processus d'*adaptation*.

Une seconde approche consiste à remarquer que l'autopoïèse traduit non seulement la capacité d'un système à stabiliser, mais à *induire lui-même* son organisation. C'est en ce sens précis que nous pouvons parler d'autopoïèse : un système autopoïétique se produit littéralement lui-même en tant qu'unité organisée. En ce sens, tout système autopoïétique peut donc être qualifié d'*auto-organisateur*. Une fois constitué, ce système doit bien maintenir son organisation, car c'est précisément cette organisation, et non une autre, qui le définit en tant que système. Mais la « genèse » de ce système relève bien d'un processus d'auto-organisation, d'un regroupement émergent de relations productives en une unité organisée, unité que ces relations, dans leur action future, continueront de maintenir dans sa cohérence. Cette compréhension de la notion d'auto-organisation touche en fait à une propriété fondamentale de la théorie autopoïétique : la notion de système ne s'y voit pas accordée une existence en soi, mais se trouve toujours liée à la possibilité, pour un observateur externe, d'identifier une organisation maintenue stable dans les limites d'une certaine unité topologique (la structure). Nous pourrions donc, de manière analogue, considérer que nos systèmes « auto-maintenus » relèveraient, dans l'instant de leur constitution émergente en tant qu'unité spatiale (c'est-à-dire, dans l'instant de la rencontre entre dispositif et public), d'une forme d'auto-organisation.

Si ces deux approches visant à lier auto-organisation et auto-maintenance s'avèrent conceptuellement valides, les usages en vigueur de la notion d'auto-organisation dans la littérature cybernétique, à laquelle nous nous référerons fréquemment dans la suite de notre discussion, nous incitent à nous orienter vers la première des directions exposées ci-dessus. L'utilisation cybernétique du concept d'auto-organisation fait en effet le plus souvent référence à la ca-

pacité d'évolution interne d'un système « déjà défini » (comme une machine), et non à la capacité de ce système à se constituer lui-même en tant qu'unité organisée<sup>90</sup>. Par conséquent, nous conserverons par la suite l'expression originale d'« auto-organisation » lorsque nous serons conduits à la rencontrer au sein de textes cybernétiques, mais devons garder à l'esprit que cette notion s'interprète préférentiellement, dans le cadre d'inspiration autopoïétique qui est le nôtre, dans le sens d'une *auto-structuration*, renvoyant à la capacité d'un système à faire évoluer lui-même sa structure (dans l'acception autopoïétique du terme).

À la suite de ces remarques, nous pouvons ainsi, d'une part, rapporter les préoccupations exprimées par Gordon Pask sous l'angle de la notion d'auto-organisation à notre idée d'un régime productif relevant d'une forme d'auto-maintenance, et d'autre part, nous saisir de la notion d'auto-organisation pour nous interroger, à nouveau, sur les liens entre la notion d'auto-maintenance et l'idée de *contrôle* — et plus spécifiquement, sur le contrôle opéré, au sein du « système » d'une œuvre praticable, par le dispositif sur le public. Comme nous l'avons précisé ci-dessus, l'auto-organisation (dans le sens d'auto-structuration) du « système » d'une œuvre suppose, en premier lieu, la présence d'une *organisation adéquate*, disposant les relations productives nécessaires à la création et la transformation de la structure de ce système. Telle est bien la situation imaginée par Pask, dont le paradigme cybernétique de conception souligne le rôle central du dispositif, c'est-à-dire d'une unité *organisée*, pour guider (via un ensemble de « règles d'évolution ») la future auto-organisation du système.

Cette formulation présente l'intérêt de mettre en évidence le contrôle exercé par le dispositif sur l'ensemble du système, et nous incite ainsi à interroger cette fonction du dispositif en regard de l'idée de conversation, préalablement retenue par Pask pour décrire l'interaction entre l'environnement réactif et ses habitants. Peut-on, en effet, parler de « conversation » à propos des interactions entre public et dispositif, lorsque celles-ci sont régies par des « règles » visant à guider l'évolution du système vers une croissance « saine », et s'interprètent sous l'angle d'un *contrôle du public par le dispositif* ? Nous proposons de répondre à cette interrogation dans la section suivante, à travers une

---

90. Ce constat cesse d'être valable pour certains textes écrits au cours des années 60, au moment où, précisément, les discussions cybernétiques sur la notion d'auto-organisation semblent préparer le développement de la théorie autopoïétique. Cette période, marquée par une interrogation épistémologique sur la notion même de système, sera rétrospectivement décrite par l'un de ses principaux protagonistes, Heinz von Foerster, comme une transition entre une cybernétique du « premier » et du « second ordre », entre une « cybernétique des systèmes observés » et une « cybernétique de l'observation des systèmes » (Heinz von Foerster, « Cybernetics of Cybernetics », dans *Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition*, New York, Springer, 2003, p. 285, notre traduction).

discussion de la signification du concept de contrôle dans la cybernétique de Gordon Pask.

### 10.5 Contrôle et conversation

En dépit des images négatives qu'il pourrait spontanément susciter, le concept cybernétique de contrôle révèle, à l'examen, une signification plus complexe que la compréhension, usuelle, « autoritaire », de ce terme. Dans son livre *The Cybernetic Brain: Sketches of Another Future*<sup>91</sup>, Andrew Pickering avance ainsi l'idée selon laquelle le projet cybernétique (ou plus précisément sa branche anglaise, composée de Gordon Pask, Stafford Beer, W. Grey Walter et W. Ross Ashby), loin de se résumer au programme d'un accroissement de l'efficacité des systèmes de contrôle et de régulation sociaux, serait au contraire prototypique d'une pensée « non-moderne<sup>92</sup> », remettant précisément en cause le projet moderniste d'un contrôle illimité du monde. Pour Andrew Pickering, les machines construites par les premiers cybernéticiens, comme les tortues mécaniques de W. Grey Walter ou l'homéostat de W. Ross Ashby<sup>93</sup>, « mettent en scène une ontologie non-moderne<sup>94</sup> » en nous présentant « une vision du monde comme lieu d'un déploiement continu et mêlé de performances<sup>95</sup> » : les machines cybernétiques, dotées d'*agentivité*, nous incitent en d'autres termes à remettre en cause l'ontologie dualiste moderne, postulant une stricte séparation des humains et des non-humains, et nous poussent à adopter un point de vue *performatif*, plutôt que représentationnel, sur le monde.

Nous retrouvons ici une opposition conceptuelle entre performance et représentation, que nous avons déjà soulignée dans la section 6.3 à l'occasion de notre discussion de travaux antérieurs d'Andrew Pickering, portant sur la compréhension des pratiques scientifiques : en nous référant à nouveau à ces travaux, nous pouvons ainsi qualifier la cybernétique de science non-moderne, dans le sens où elle développe une vision d'un monde qui, loin de pouvoir être soumis à notre unique volonté, est formé « de systèmes excessivement complexes qui résistent immanquablement à toute tentative de domination, et avec lesquels nous devons faire en sorte de pouvoir nous entendre<sup>96</sup> ». Le monde cybernétique n'est pas composé d'entités inertes, abstraites, mais de « systèmes dynamiques » à l'évolution « imprévisible<sup>97</sup> » ; dans cette perspective, le concept

---

91. Andrew Pickering, *The Cybernetic Brain: Sketches of Another Future*, Chicago, University of Chicago Press, 2011.

92. *Ibid.*, p. 13. Notre traduction.

93. Nous proposons une présentation détaillée de ces machines dans la section 11.2.

94. *Ibid.*, p. 21. Notre traduction.

95. *Ibid.*, p. 21–22. Notre traduction.

96. *Ibid.*, p. 371. Notre traduction.

97. *Ibid.*, p. 31. Notre traduction.

cybernétique de contrôle s'éloigne dès lors nécessairement d'un sens coercitif, pour signifier une capacité à négocier avec les agents autonomes, humains et non-humains, qui nous entourent — ce qui nous conduit à une autre notion centrale, que nous préciserons par la suite : celle d'*adaptation*.

Pour Andrew Pickering, la vision cybernétique du contrôle renvoie directement à l'image de la « danse d'agentivité » convoquée dans ses travaux antérieurs<sup>98</sup> : les machines conçues par le cybernéticien ne cherchent pas à dominer leur environnement, mais à interagir et évoluer *avec* celui-ci, empruntant une trajectoire émergente et non déterminée *a priori*. Dès lors, les interactions entre un dispositif cybernétique et l'objet qu'il est sensé « contrôler » procèdent toujours d'une forme de réciprocité : le dispositif est tout autant contrôlé qu'il ne contrôle<sup>99</sup>. Cette idée de réciprocité se trouve, de fait, explicitement mentionnée dans l'article *The Architectural Relevance of Cybernetics*. Précisant le « fonctionnement » général d'un environnement réactif, Pask écrit ainsi :

« As a broad statement of what is going on, a computer controls the visual and tactile properties of environmental materials (which are available in sufficient diversity for most architectural purposes). These materials contain sensors, tactile or visual as the case may be, which return messages to the computer at several levels of generality. In the absence of a human inhabitant, the feedback leads to stabilization with respect to certain pre-programmed invariants (for example, that a body of material shall maintain mechanical stability and occupy a prescribed value), and to a search process in which the material actively looks for signs of a human being in contact with it. If there is a human being in the environment, computer, material and all, engages him in dialogue and, within quite wide limits, is able to learn about and adapt to his behaviour pattern. There is thus one sense in which the reactive environment is a *controller* and another in which it is controlled *by* its inhabitants<sup>100</sup>. »

98. Andrew Pickering, « Cybernetics and the Mangle: Ashby, Beer and Pask », *Social Studies of Science*, vol. 32, n° 3, 2002, p. 414.

99. Cette idée d'une possible réciprocité de la fonction de contrôleur (conduisant l'objet « contrôlant » à être également « contrôlé ») est peut-être suggérée par l'étymologie du terme « contrôle » : historiquement, le « contre-rolé » désigne un « registre tenu en double pour la vérification d'un autre » ([Anon.], « Contrôle », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/contrrole>, consulté le 10 août 2017). La notion de contrôle s'inscrit ainsi, à l'origine, dans une relation duale, où les deux objets « contrôleur » et « contrôlé » entretiennent un rapport d'équivalence.

100. Gordon Pask, « The Architectural Relevance of Cybernetics », *op. cit.*, p. 496. Itاليques dans le texte.

Il semble dès lors prudent de ne pas lire trop vite le projet paskien comme celui d'un contrôle social, opéré par le moyen d'une architecture « technologique ». Une critique de cet ordre se rencontre notamment dans l'article *The Fun Palace: Cedric Price's Experiment in Architecture and Technology*<sup>101</sup>, écrit par Stanley Mathews : selon l'auteur, le dispositif cybernétique conçu par Pask pour le *Fun Palace* de Cedric Price, destiné à modifier les comportements de ses habitants, posséderait ainsi des connotations « orwelliennes<sup>102</sup> ». Répondant à cette critique, Andrew Pickering considère, au contraire, ce dispositif comme prototypique de l'idée de *conversation* : loin d'opérer selon une logique coercitive et prédéterminée, le *Fun Palace* aurait été capable d'*inspirer* — et non d'imposer — des comportements nouveaux et imprévisibles à ses visiteurs, dans une logique de dialogue, voire de négociation, avec ces derniers<sup>103</sup>.

Ces remarques nous conduisent à réévaluer la notion même de dispositif au sein du paradigme de conception cybernétique imaginé par Pask. En notant, à la fin de son article, que le concepteur cybernétique « opère à un plus haut niveau dans la hiérarchie organisationnelle<sup>104</sup> » par rapport au dispositif qu'il conçoit, Gordon Pask rappelle ainsi que tout dispositif est disposé, organisé, en vue d'orienter la future auto-organisation du système dans lequel il sera amené à prendre place. Mais Pask poursuit en notant que, dans un tel contexte, le *contrôleur* — le dispositif — « ne correspond plus à l'image autoritaire suggérée par cette dénomination technique. Le contrôleur incarne plutôt un mélange étrange, à la fois catalyseur, béquille, mémoire et arbitre<sup>105</sup> ». En

---

101. Stanley Mathews, « The Fun Palace: Cedric Price's Experiment in Architecture and Technology », *op. cit.*

102. *Ibid.*, p. 86. Notre traduction.

103. Il convient cependant de souligner que Gordon Pask, énumérant à la fin de *The Architectural Relevance of Cybernetics* les avancées attendues d'une théorie cybernétique de l'architecture, annonce l'objectif d'« une formulation adéquate et systématique des modalités par lesquelles l'architecture opère une forme de contrôle social » (Gordon Pask, « The Architectural Relevance of Cybernetics », *op. cit.*, p. 496, notre traduction). À ce sujet, nous ne partageons pas entièrement le point de vue d'Andrew Pickering, selon lequel l'emploi de ce type de formulation par Gordon Pask constituerait une simple illustration du fait que les cybernéticiens se sont souvent montrés « rhétoriquement ineptes », en choisissant des termes trop connotés négativement pour communiquer fidèlement leurs idées (Andrew Pickering, *The Cybernetic Brain: Sketches of Another Future*, *op. cit.*, p. 371, notre traduction). Bien que nous souscrivions dans son ensemble à l'interprétation « non coercitive » proposée par Pickering de la *théorie* cybernétique du contrôle, il nous semble ainsi prudent de veiller, en *pratique*, à ce que nos « contrôleurs » restent fidèles à cette interprétation — un objectif dont nous tiendrons compte, par la suite, en exigeant de nos dispositifs qu'ils permettent aux spectateurs de développer une attitude *réflexive* par rapport à leur propre engagement dans une logique de maintenance (comme nous l'annoncions déjà au terme de la section 8.3).

104. Gordon Pask, « The Architectural Relevance of Cybernetics », *op. cit.*, p. 496. Notre traduction.

105. *Ibid.*, p. 496. Notre traduction.

d'autres termes, le dispositif est ici perçu alternativement comme une aide, un inspireur, ou un négociateur — trois fonctions signalant une compréhension fondamentalement *dialogique* du dispositif, en lien direct avec la notion de conversation. Le dispositif constitue donc, chez Pask, non pas tant un instrument de contrôle qu'un « agent d'émergence », capable d'inspirer et de développer de nouvelles intentions et comportements chez les habitants avec lesquels il sera conduit à entrer en interaction — et au contact desquels il pourra apprendre et évoluer. L'approche défendue par Gordon Pask poursuit ainsi, selon Usman Haque, l'objectif suivant :

« (...) designing tools that people themselves may use to construct — in the widest sense of the word — their environments and as a result build their own sense of agency. It is about developing ways in which people themselves can become more engaged with, and ultimately responsible for, the spaces they inhabit. It is about investing the production of architecture with the poetics of its inhabitants<sup>106</sup>. »

Selon Haque, les dispositifs cybernétiques imaginés par Gordon Pask participent ainsi, dans leur conception même, d'une volonté de ménager — et plus encore, de catalyser — des formes d'expression libre de l'agentivité humaine qu'ils « contrôlent ». En ce sens, l'idée paskienne d'un paradigme cybernétique de conception ne doit pas s'interpréter comme l'instrument d'un projet de contrôle social visant à limiter l'agentivité humaine, mais comme une *réévaluation* de la notion même de conception à l'aune d'une compréhension performative du monde, envisageant celui-ci non comme un univers passif à dominer, mais comme un champ actif, peuplé d'agents perçus comme des potentiels de conversation émergente. Intégrant une vision dynamique, évolutive, des rapports entre le dispositif et ses utilisateurs, la démarche paskienne s'oppose ainsi précisément, selon Usman Haque, aux approches prescriptives appliquées dans la conception de la plupart des dispositifs interactifs contemporains, soumettant l'utilisateur à des « boucles d'interaction<sup>107</sup> » prédéterminées. Pour Haque, Pask développe, en ce sens,

« a completely different notion of interaction from that used in many of today's so-called interactive systems, which are premised on unproductive and prespecified circular, deterministic reactions. In these systems, the machine contains a finite amount of information and the human simply navigates through an emerging landscape to uncover it all (...).

106. Usman Haque, « The Architectural Relevance of Gordon Pask », *op. cit.*, p. 60.

107. *Ibid.*, p. 61. Notre traduction.

The human is at the mercy of the machine and its inherent, preconfigured logical system<sup>108</sup>. »

Ces précisions relatives à la nature des dispositifs cybernétiques envisagés par Gordon Pask nous permettent désormais de répondre à l'interrogation que nous soulevions, à la fin de la section précédente, au sujet de la compatibilité entre les notions de contrôle (et plus précisément, de contrôle opéré par un dispositif) et de conversation. Comme nous l'avons montré ci-dessus, la vision paskienne de la conception, si elle s'apparente bien à un processus de spécification *a priori* de « principes d'évolution », « embarqués » dans l'unité organisée d'un dispositif, ne vise pas à circonscrire mais au contraire à catalyser et assurer l'auto-organisation future du système, autrement dit, à doter le système d'une *capacité d'adaptation* lui permettant de se maintenir dans une situation productive émergente, résultant d'interactions internes à son réseau d'agents constitutifs — ce qui rejoint précisément la vision de la conception que nous avons développée, dans la section 8.4, en regard de notre idée d'auto-maintenance. La position organisationnelle « supérieure » occupée par le concepteur cybernétique (qu'il est possible de considérer, comme nous l'avons vu, comme un *concepteur de processus de maintenance*) ne doit donc pas être comprise comme l'affirmation d'une volonté de limiter la future autonomie du système, mais traduit précisément le projet d'agir sur le système au niveau d'une « méta » organisation — de doter le système d'une organisation adéquate pour que ce dernier puisse s'auto-organiser (c'est-à-dire s'auto-structurer) dans un processus « conversationnel » d'interaction réciproque entre ses différents agents, matériels et humains.

---

108. *Ibid.*, p. 58.



## Chapitre 11

# Concevoir des dispositifs conversationnels

### 11.1 Méthodes numériques

Après avoir précisé, au cours du chapitre précédent, les enjeux liés à la mise en œuvre de notre notion d'auto-maintenance dans le contexte d'une production participative, abordé sous l'angle de la notion d'œuvre praticable, nous pouvons à présent poursuivre notre discussion des travaux de Gordon Pask pour examiner différentes modalités pratiques de conception de processus de maintenance dans ce contexte. Comme nous l'avons vu, en effet, l'idée paskienne d'une interaction « conversationnelle » entre utilisateur et dispositif constitue un angle d'approche précieux pour développer une pensée non « autoritaire » de la notion de contrôle impliquée, par nature, par la constitution de dispositifs. La perspective d'« implémenter » une telle approche conversationnelle au sein de nos processus de maintenance constitue ainsi un objectif pratique central, dont nous allons ici chercher à examiner les diverses modalités de réalisation.

Notre adoption d'approches relevant de la programmation dans la plupart des travaux précédemment présentés dans cette thèse nous conduit d'abord à imaginer une prise en charge *numérique* des scénarios conversationnels envisagés par Gordon Pask. Il semble, de fait, que Pask ait eu lui-même en tête une telle modalité d'implémentation des « règles d'évolution » embarquées par ses environnements réactifs. L'article *The Architectural Relevance of Cybernetics* mentionne ainsi, aux côtés de diverses références à l'usage d'ordinateurs<sup>1</sup>, les recherches menées par le Architecture Machine Group de Nicholas Negroponte, dont les « programmes informatiques d'intelligence artificielle<sup>2</sup> » sont présentés comme l'une des directions potentielles de développement de la nouvelle théorie cybernétique de l'architecture.

Fondé par Nicholas Negroponte et Leon Groisser au département d'architecture du MIT en 1967, et actif jusqu'à son absorption par le MIT Me-

---

1. Si Pask mentionne qu'il serait possible, en principe, d'implémenter les « principes d'évolution » d'un environnement architectural réactif sans avoir recours à un ordinateur (Gordon Pask, « The Architectural Relevance of Cybernetics », *op. cit.*, p. 496), cette proposition semble avoir une valeur essentiellement théorique : les exemples concrets donnés dans son article sont plutôt formulés à l'aide de termes tels qu'« ordinateur » ou « programme ».

2. *Ibid.*, p. 496. Notre traduction.

dia Lab, lors de la création de ce dernier en 1985, le Architecture Machine Group constituait un laboratoire de recherche interdisciplinaire, explorant des questions relatives aux environnements architecturaux réactifs, à l'interaction homme-machine et à l'intelligence artificielle (IA). Collaborateur fréquent du laboratoire d'intelligence artificielle du MIT, dirigé par Marvin Minsky, et profondément marqué par la cybernétique de Gordon Pask, le Architecture Machine Group a, dès le départ, indexé son approche des liens entre conception architecturale et computation sur l'objectif d'un dialogue « intelligent » entre l'homme et la machine. À travers un ensemble de publications théoriques, de prototypes, de démonstrateurs<sup>3</sup> et d'expositions<sup>4</sup>, Negro Ponte et son équipe expérimentent de nouvelles modalités de production architecturale, centrées sur l'idée directrice d'un ordinateur non plus perçu comme un simple outil productiviste, mais comme un véritable « partenaire de conception<sup>5</sup> » (*design partner*).

Si la plupart des « machines architecturales » développées par le Architecture Machine Group peuvent être directement rattachées au contexte d'une « production participative », dans leur mise en œuvre d'interactions entre un dispositif de production et un utilisateur (distinct du concepteur de ce dispositif), l'échelle et le type des scénarios de production abordés par le laboratoire s'avèrent variables selon les projets considérés. Ainsi, certains dispositifs, comme ceux de URBAN5 (figure 11.1) et de HUNCH (figure 11.2), respectivement conçus à partir de 1967 et 1970, ne se présentaient pas comme des solutions de production à l'échelle « architecturale » (conduisant à la réalisation d'artefacts en volume), mais proposaient à leurs utilisateurs de concevoir des plans urbanistiques et architecturaux en deux dimensions. Cependant, il était bien envisagé que ces dispositifs puissent, par la suite, se doter de capacités de production d'objets tridimensionnels : Nicholas Negro Ponte imaginait ainsi, notamment, que les dessins réalisés par l'utilisateur dans HUNCH puissent commander, en temps-réel, un système de fabrication robotisé, capable de mo-

---

3. La pratique de la « démo », déjà dotée d'une place importante dans l'approche du Architecture Machine Group, deviendra par la suite centrale au MIT Media Lab. Nicholas Negro Ponte dira ainsi qu'« [a]u sein du MIT Media Lab (...), le slogan académique "publish or perish" a été reformulé en "demo or die" » (Peter Lunenfeld, *Snap to Grid: A User's Guide to Digital Arts, Media, and Cultures*, Cambridge, MIT Press, 2001, p. 13, citation de Nicholas Negro Ponte, notre traduction).

4. Comme nous l'avons déjà noté, le Architecture Machine Group présentera notamment son projet SEEK à l'occasion de l'exposition *Software*, accueillie par le Jewish Museum de New York.

5. Nicholas Negro Ponte, « URBAN5: An On-Line Urban Design Partner », *Ekistics*, vol. 24, n° 142, 1967, p. 289-291.



Fig. 11.1 — URBAN 5 : vue de l'interface de conception (source : Nicholas Negroponte (dir.), *The Architecture Machine*, Cambridge, MIT Press, 1970, p. 80).

difier la configuration d'une maquette architecturale<sup>6</sup>. Cet horizon d'une machine architecturale prenant en charge la production en « temps-réel » de structures matérielles a été expérimenté de manière concrète dans le projet SEEK (figure 11.3), au sein duquel un « monde de blocs » (*blocks world*) physique, composé d'un ensemble de cubes modélisant un environnement urbain, était reconfiguré dynamiquement par un bras robotisé<sup>7</sup>. Ces exemples permettent

6. Molly Wright Steenson, « Architectures of Information: Christopher Alexander, Cedric Price, and Nicholas Negroponte and MIT's Architecture Machine Group », thèse de doctorat, *op. cit.*, p. 214–215.

7. SEEK occupe cependant une place à part dans les projets du Architecture Machine Group, car les « utilisateurs » du dispositif n'étaient pas des humains, mais des gerbilles.

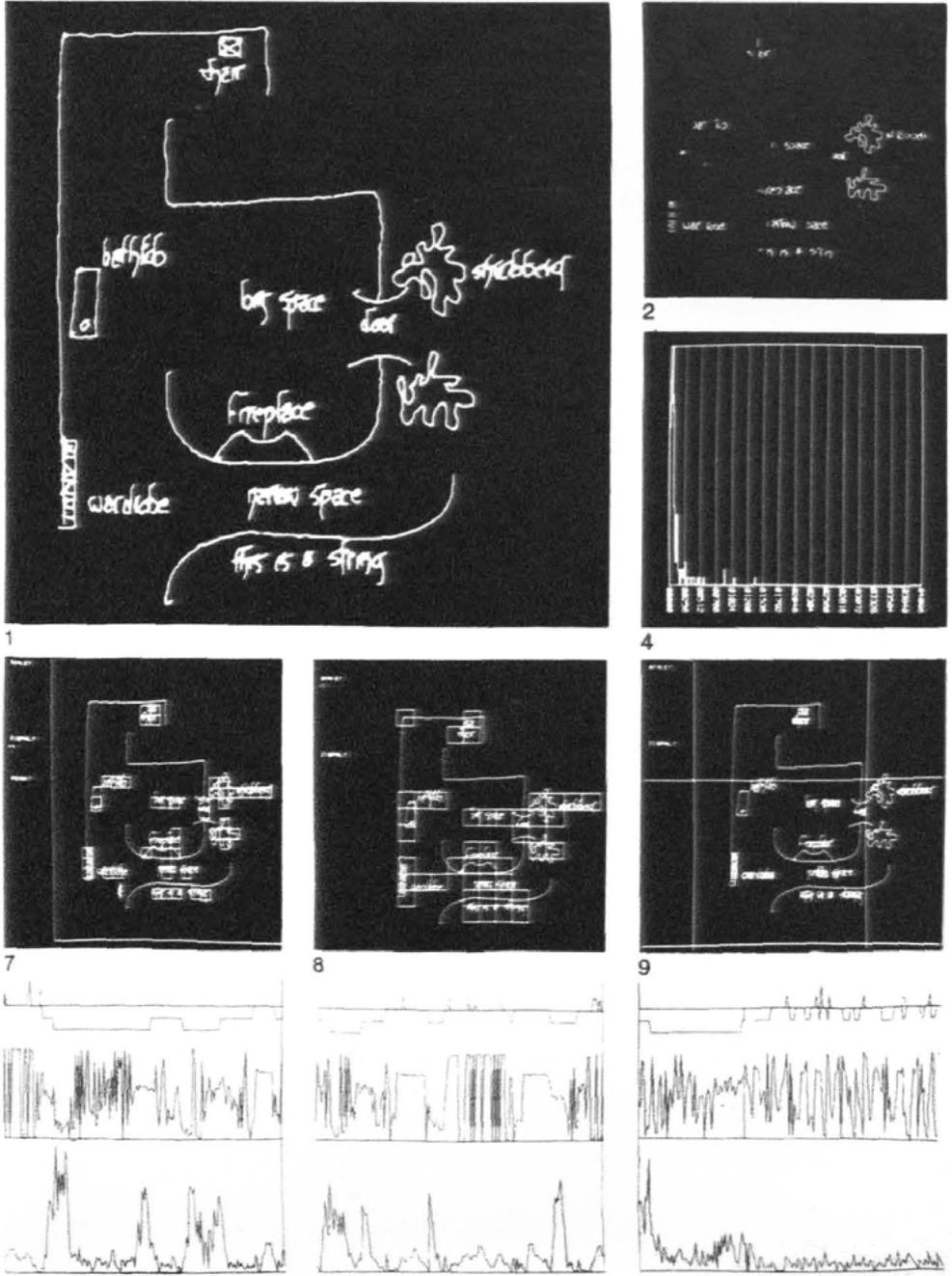


Fig. 11.2 — HUNCH : visualisation de procédures statistiques utilisées pour la reconnaissance d'annotations à partir d'un plan architectural dessiné par l'utilisateur (source : Nicholas Negroponte (dir.), *Soft Architecture Machines*, Cambridge, MIT Press, 1975, p. 70).

ainsi de rattacher les expérimentations du Architecture Machine Group à la notion d'environnement réactif, proposée par Gordon Pask en 1969.

L'influence de Gordon Pask sur le Architecture Machine Group se révèle de manière nette dans l'examen des modalités prévues d'interaction entre les machines architecturales et leurs utilisateurs : conçues pour être capables d'apprendre et de suggérer spontanément de nouvelles options, ces machines étaient en effet pensées dans la perspective paskienne de dispositifs *conversationnels*, formant avec leurs utilisateurs des systèmes émergents, en évolution permanente. Pour Negroponte, la relation homme-machine alors obtenue devait posséder un caractère *symbiotique*<sup>8</sup> : on devait voir se former, à terme, une « cohabitation entre deux espèces intelligentes<sup>9</sup> ». Telle est la vision annoncée dans les premières pages de l'ouvrage *The Architecture Machine*, publié en 1970 :

« Imagine a machine that can follow your design methodology and at the same time discern and assimilate your conversational idiosyncrasies. This same machine, after observing your behavior, could build a predictive model of your conversational performance. Such a machine could then reinforce the dialogue by using the predictive model to respond to you in a manner that is in rhythm with your personal behavior and conversational idiosyncrasies<sup>10</sup>. »

Outre les idées de « dialogue » et de « conversation », références directes à l'approche de Gordon Pask, Negroponte utilise ici la notion de *prédiction*, également introduite par le cybernéticien dans son article de 1969. Sur la base de données acquises durant l'interaction, les « modèles prédictifs » envisagés par Negroponte devaient permettre aux machines architecturales de « comprendre », voire d'anticiper les comportements et les préférences de leurs utilisateurs. Ces modèles numériques devaient ainsi doter les machines d'une capacité d'*adaptation par apprentissage*, nécessaire à la poursuite du dialogue homme-machine. Les modèles prédictifs décrits par Negroponte visaient ainsi à *stabiliser*, au sein du système de la machine architecturale, une relation mu-

---

8. Comme le souligne Molly Wright Steenson, l'idée d'une relation symbiotique entre homme et ordinateur, initialement introduite en 1960 (Joseph C. R. Licklider, « Man-Computer Symbiosis », *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, n° 1, 1960, p. 4–11) était extrêmement populaire dans la communauté de recherche en intelligence artificielle vers le début des années 70. Voir notamment : Molly Wright Steenson, « Architectures of Information: Christopher Alexander, Cedric Price, and Nicholas Negroponte and MIT's Architecture Machine Group », thèse de doctorat, *op. cit.*, p. 178.

9. Nicholas Negroponte (dir.), *The Architecture Machine*, Introduction, Cambridge, MIT Press, 1970, p. 7. Notre traduction.

10. Nicholas Negroponte, « Architect-Machine Symbiosis », dans *The Architecture Machine*, Cambridge, MIT Press, 1970, p. 11–12.

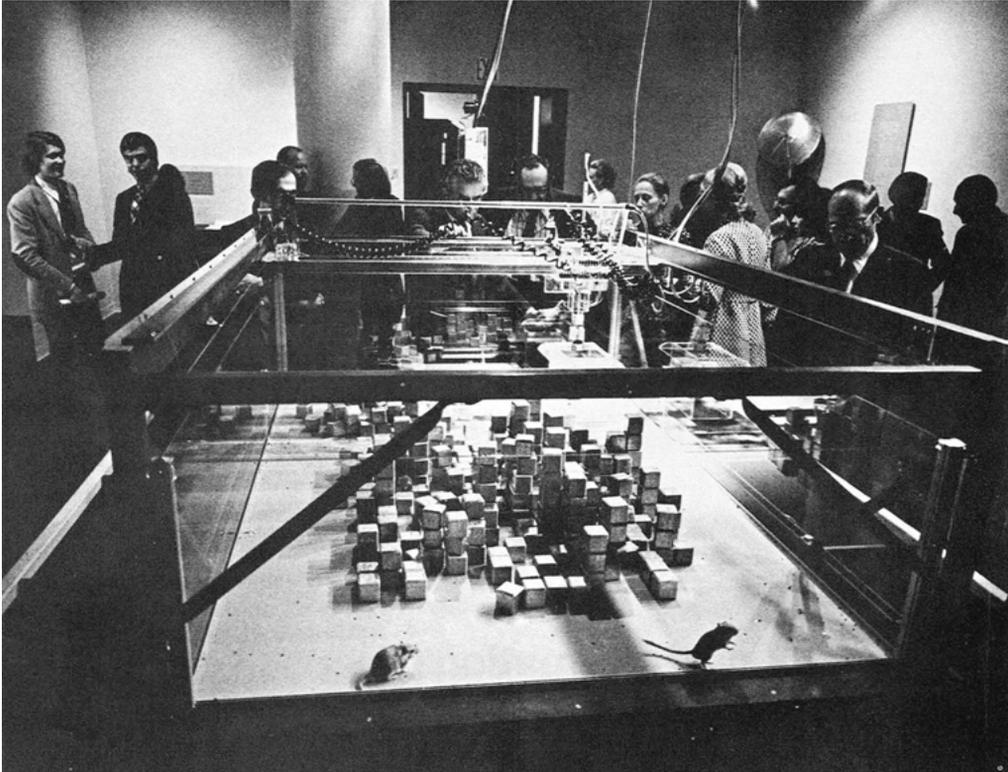


Fig. 11.3 — SEEK : vue du dispositif présenté lors de l'exposition *Software* (source : Jack Burnham (dir.), *Software: Information Technology: Its New Meaning For Art*, catalogue d'exposition (New York, Jewish Museum, 16 septembre – 8 novembre 1970), New York, Jewish Museum, 1970, p. 9).

tuellement productive entre l'utilisateur et le dispositif, dans une perspective proprement conversationnelle. En d'autres termes, la programmation de ces modèles visait à implémenter une relation de *maintenance*, dans la même perspective que celle que nous avons relevée au cours de notre discussion du « paradigme cybernétique » de conception paskien. Les méthodes d'apprentissage numériques développés par le Architecture Machine Group constituent donc, à l'égard de notre projet d'une conception de processus de maintenance dans un contexte de production participative, une première référence pratique.

Après avoir précisé l'enjeu pratique des modèles prédictifs utilisés par le Architecture Machine Group, il convient à présent de bien cerner leur portée épistémologique. Dans l'approche du Architecture Machine Group, la logique d'apprentissage rejoignait le projet d'une *modélisation computationnelle des processus cognitifs de l'utilisateur* : afin de permettre l'établissement d'une véritable conversation, les modèles construits par une machine architecturale devaient, dans le cas idéal, se faire le miroir des représentations mentales construites par l'utilisateur dans son interaction avec cette machine. L'hypothèse sous-jacente

à cette ambition, sur laquelle nous reviendrons dans un instant, était que les processus cognitifs engagés par l'utilisateur dans cette construction de représentations mentales pouvaient s'interpréter, eux aussi, comme une construction de modèles *computationnels*, de même nature que ceux implémentés dans l'ordinateur. L'ensemble du dialogue « intelligent » entre l'homme et la machine s'interprétait alors sous l'angle d'une construction *mutuelle* de modèles, dont il était envisagé que puisse émerger, à terme, une représentation cognitive commune aux deux « pôles », humain et artificiel, de la situation d'interaction — une perspective correspondant à l'idée de « symbiose » mise en avant par Negroponte. Cette approche est exemplifiée par le projet HUNCH. Dans HUNCH, la machine architecturale visait ainsi à modéliser : (I) l'utilisateur lui-même ; (II) le modèle de HUNCH construit par l'utilisateur ; (III) le modèle construit par l'utilisateur de sa propre modélisation par HUNCH<sup>11</sup>. La garantie d'une relation de « confiance<sup>12</sup> » entre l'utilisateur et la machine était alors apportée par l'égalité entre les premier et troisième niveaux de modélisation — un critère inspiré par la dynamique des relations humaines. Comme le note Negroponte, en effet, « dans les relations humaines, ce que je pense de ce que tu penses de ce que je pense de toi est aussi important (et peut être même plus important) que ce que je pense réellement de toi<sup>13</sup> ».

Cette compréhension des processus cognitifs de l'utilisateur comme une construction de modèles, de même nature que les représentations computationnelles apprises par la machine, rapproche la vision du Architecture Machine Group des recherches menées à la même époque dans le champ de l'intelligence artificielle. Dans les années 70, le champ de l'IA est en effet dominé par un paradigme *symbolique*, incarné par des personnalités telles qu'Allen Newell, Herbert A. Simon, John McCarthy et Marvin Minsky. Cette approche, désignée par le philosophe John Haugeland sous le nom de « GOFAI<sup>14</sup> » (Good Old-Fashioned Artificial Intelligence), émerge à la fin des années 50, lorsque des programmes informatiques parviennent, pour la première fois, à résoudre de manière « intelligente » des problèmes formalisés, liés au raisonnement logique ou mathématique. Le succès de ces programmes, comme le General Problem Solver de Allen Newell, John C. Shaw et Herbert A. Simon<sup>15</sup>, incitent alors les chercheurs en IA à considérer que les processus mêmes sous-tendant

---

11. Nicholas Negroponte, « Computer Graphics », dans *Soft Architecture Machines*, Cambridge, MIT Press, 1975, p. 61. Notre traduction.

12. *Ibid.*, p. 63. Notre traduction.

13. *Ibid.*, p. 61. Notre traduction.

14. John Haugeland, *Artificial Intelligence: The Very Idea*, Cambridge, MIT Press, 1985, p. 112.

15. Allen Newell, John C. Shaw et Herbert A. Simon, « Report on a General Problem Solving Program », *Proceedings of the International Conference on Information Processing*, p. 256–264.

l'intelligence pourraient correspondre à des opérations abstraites de manipulation de symboles, encodant nos représentations du monde et nos connaissances. Ces idées conduisent en 1958 au développement du langage LISP<sup>16</sup>, qui devient rapidement utilisé dans la plupart des programmes d'IA symbolique — comme le logiciel SHRDLU<sup>17</sup> développé en 1971 par Terry Winograd, un « monde de blocs » numérique dans lequel l'utilisateur pouvait converser en anglais avec une IA, afin de lui faire reconnaître et déplacer des objets (figures 11.4 et 11.5).

---

16. John McCarthy, « Recursive Functions of Symbolic Expressions and Their Computation by Machine, Part I », *Communications of the ACM*, vol. 3, n° 4, 1960, p. 184–195.

17. Terry Winograd, *Procedures as a Representation for Data in a Computer Program for Understanding Natural Language*, rapport technique, Cambridge, MIT, 1971.

1. pick up a big red block.  
OK.
2. grasp the pyramid.  
I DON'T UNDERSTAND WHICH PYRAMID YOU MEAN.
3. find a block which is taller than the one you are holding and put it into the box.  
BY "IT", I ASSUME YOU MEAN THE BLOCK WHICH IS TALLER THAN THE ONE I AM HOLDING.  
OK.
4. what does the box contain?  
THE BLUE PYRAMID AND THE BLUE BLOCK.
5. what is the pyramid supported by?  
THE BOX.
6. how many blocks are not in the box?  
FOUR OF THEM.
7. is at least one of them narrower than the one which i told you to pick up?  
YES, THE RED CUBE.
8. is it supported?  
YES, BY THE TABLE.
9. can the table pick up blocks?  
NO.

Fig. 11.4 — SHRDLU : extrait d'un dialogue type avec un opérateur humain (source : Terry Winograd, *Procedures as a Representation for Data in a Computer Program for Understanding Natural Language*, rapport technique, Cambridge, MIT, 1971, adaptation du dialogue p. 35-41).

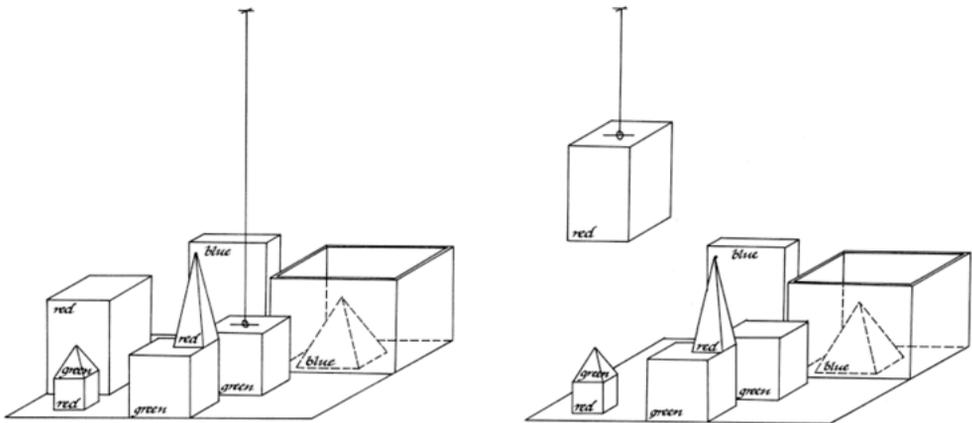


Fig. 11.5 — SHRDLU : captures d'écran présentant l'action réalisée par le logiciel en réponse à l'instruction « pick up a big red block » (source : Terry Winograd, *Procedures as a Representation for Data in a Computer Program for Understanding Natural Language*, rapport technique, Cambridge, MIT, 1971, p. 37-38).

Ces recherches en IA symbolique seront formalisées en 1976 par Allen Newell et Herbert A. Simon à travers l'« hypothèse du système de symboles physiques » (*physical symbol system hypothesis*), postulant qu'« [u]n système de symboles physiques possède les moyens nécessaires et suffisants pour agir de manière intelligente<sup>18</sup> ». Selon cette perspective, la cognition s'interpréterait alors en termes de processus de manipulation d'expressions symboliques, rendant compte de la capacité d'une entité à agir sur le monde<sup>19</sup>. L'hypothèse du système de symboles physiques explicite ainsi le présupposé fondamental, à l'œuvre dans les recherches en IA symbolique menées depuis la fin des années 50, selon lequel la cognition pourrait s'interpréter comme un processus d'ordre computationnel — et vient nourrir l'idée d'une possible implémentation *numérique* de l'activité cognitive. Dans le cadre de la position défendue par Newell et Simon, en effet, la structure même du « médium » réalisant les computations (cerveau ou ordinateur numérique) s'avère secondaire par rapport à la nature des opérations réalisées<sup>20</sup>. L'approche du Architecture Machine Group, basée sur le développement de machines intelligentes capables de « comparer » leurs modèles à ceux de leurs propres utilisateurs, se rattache ainsi pleinement, en ce sens, au programme conceptuel de l'IA symbolique<sup>21</sup>.

Largement financée, la recherche en IA symbolique donne lieu à d'ambitieuses prédictions, inspirées par le développement rapide des capacités de cal-

---

18. Allen Newell et Herbert A. Simon, « Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search », *Communications of the ACM*, vol. 19, n° 3, 1976, p. 116. Notre traduction.

19. *Ibid.*, p. 116.

20. Cette hypothèse selon laquelle les processus d'ordre symboliques tenus pour constitutifs de la cognition se montreraient capables d'opérer *indépendamment des propriétés matérielles de leur support* peut rappeler la notion controversée d'un « programme génétique », telle qu'elle a notamment pu être formulée par François Jacob à la fin des années 60 (François Jacob, *La logique du vivant : Histoire de l'hérédité*, Paris, Gallimard, 1970). Comme le montrent Michael Friedman et Wolfgang Schäffner, la réduction de l'ADN à son « code » découle en effet du postulat selon lequel cette information codée, envisagée sous un angle purement symbolique, pourrait s'interpréter indépendamment de la « complexité topologique » de son support, c'est-à-dire de la structure de la molécule d'ADN (Michael Friedman et Wolfgang Schäffner (dir.), *On Folding: Towards a New Field of Interdisciplinary Research*, Introduction, Bielefeld, Transcript, 2016, p. 7–11).

21. Les proximités du Architecture Machine Group avec le champ de l'IA symbolique s'observent également sur le plan méthodologique : des projets comme URBAN5, SEEK ou HUNCH reprennent ainsi le principe des « microworlds », introduit dans les années 60 par Marvin Minsky pour inciter les chercheurs en IA à se limiter dans un premier temps à la résolution de problèmes « restreints », tels que ceux formulables dans un « monde de blocs » (Stuart J. Russell et Peter Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Upper Saddle River, Prentice Hall, 2010, p. 20). Par son implantation au MIT, où Marvin Minsky dirige depuis 1963 un groupe de recherche en intelligence artificielle dans le cadre du projet MAC (Project on Mathematics and Computation), fondé sur la base d'un important financement de l'Advanced Research Projects Agency (ARPA, correspondant à la DARPA actuelle), le Architecture Machine Group se trouve de fait à l'épicentre de la recherche en IA symbolique.

cul des ordinateurs numériques<sup>22</sup>. En 1958, Herbert A. Simon prédisait ainsi qu'en « moins de dix ans », un ordinateur « [deviendrait] champion du monde d'échecs », « [découvrirait et prouverait] un théorème mathématique nouveau et important », et que « la plupart des théories en psychologie [prendraient] la forme de programmes informatiques, ou d'énoncés qualitatifs à propos des caractéristiques de tels programmes<sup>23</sup> ». Dix ans plus tard, les personnalités de l'IA annoncent le développement, sous un délai plus ou moins court, d'une intelligence artificielle « générale », dotée de capacités égalant — ou même surpassant — celles des êtres humains. En 1970, un article du journaliste Brad Darrach consacré aux recherches en intelligence artificielle menées à Stanford et au MIT rapporte ainsi les propos suivants, qu'il attribue à Marvin Minsky :

« In from three to eight years we will have a machine with the general intelligence of an average human being. I mean a machine that will be able to read Shakespeare, grease a car, play office politics, tell a joke, have a fight. At that point the machine will begin to educate itself with fantastic speed. In a few months it will be at genius level and a few months after that its powers will be incalculable<sup>24</sup>. »

Il convient ici de souligner que cet article, critiqué dès sa parution par plusieurs des chercheurs interviewés, dont Minsky lui-même<sup>25</sup>, ne peut être considéré comme une image fiable des ambitions et horizons temporels alors réellement envisagés par les chercheurs en intelligence artificielle. Néanmoins, le fait que la citation ci-dessus reflète fidèlement ou non les propos de Marvin Minsky a sans doute peu d'importance. L'idée d'une intelligence artificielle dépasse en effet à cette époque le strict cadre de la recherche scientifique, pour s'ériger en thème culturel majeur, prenant corps dans des visions telles que l'ordinateur HAL 9000 du film *2001: A Space Odyssey* — pour la conception duquel Stanley Kubrick sollicite d'ailleurs l'avis de Marvin Minsky<sup>26</sup>.

L'une des propriétés alors attendues d'une telle intelligence générale est la capacité de mener une conversation en langage naturel avec l'homme : cette idée, fameusement mise en scène dans *2001* et expérimentée dans des pro-

22. John Haugeland, *Artificial Intelligence: The Very Idea*, *op. cit.*, p. 168.

23. Herbert A. Simon, « Heuristic Problem Solving: The Next Advance in Operations Research », *Operations Research*, vol. 6, n° 1, 1958, p. 7. Notre traduction.

24. Brad Darrach, « Meet Shaky, the First Electronic Person: The Fascinating and Fear-some Reality of a Machine With a Mind of its Own », *Life*, vol. 69, n° 21, 1970, p. 58. Citation de Marvin Minsky.

25. Pamela McCorduck, *Machines Who Think: A Personal Inquiry into the History and Prospects of Artificial Intelligence*, Natick, A K Peters, 2004, p. 272–274.

26. Hubert L. Dreyfus, *What Computers Can't Do: A Critique of Artificial Reason*, New York, MIT Press, 1972, p. 1.

grammes comme SHRDLU, évoque directement les scénarios d'interaction envisagés par l'équipe de Nicolas Negroponte. Au sein du Architecture Machine Group, l'implémentation du projet paskien d'un « dialogue » émergent, dynamique, entre l'homme et la machine, se trouve ainsi, dès le départ, envisagée sous l'angle du développement d'une véritable intelligence artificielle *générale*. Cette ambition se retrouve notamment dans le projet URBAN5, explorant un dispositif de conception urbanistique basé sur la possibilité d'un dialogue bidirectionnel, en langage naturel, avec la machine<sup>27</sup>. Ce mode d'interaction était sensé permettre à l'utilisateur de préciser les principales contraintes de son projet de conception, au cours d'une véritable *conversation* avec l'ordinateur : il était ainsi prévu que le système puisse poser des questions, ou souligner l'existence de contradictions avec certains objectifs précédemment indiqués par l'utilisateur. Extrêmement ambitieux, non seulement au regard des connaissances disponibles à l'époque (SHRDLU ne sera développé qu'en 1971, et implémentera des modalités de dialogue beaucoup plus restreintes que celles prévues dans URBAN5) mais aussi par rapport à l'état de l'art actuel des recherches en IA, le programme d'URBAN5 semble marqué du même optimisme que celui qui animait alors la communauté de recherche en intelligence artificielle symbolique : les fonctionnalités initialement prévues pour URBAN5 n'ont ainsi, de l'aveu même de Nicholas Negroponte, jamais pu être réalisées de manière convaincante en pratique<sup>28</sup>. L'implémentation proposée par le Architecture Machine Group du paradigme conversationnel de Gordon Pask apparaît donc comme inséparable des représentations, espoirs et fantasmes qui se cristallisent alors autour de la perspective d'une intelligence artificielle programmée<sup>29</sup>.

## 11.2 Méthodes analogiques

La programmation informatique ne constitue pas la seule approche possible du problème d'une implémentation de comportements « intelligents » : jusqu'à la fin des années 60, ce problème est également exploré par la construction de machines *analogiques*. Réalisées par des cybernéticiens « avérés » (W. Grey Walter, W. Ross Ashby, Gordon Pask...) ou par des personnalités moins

27. Nicholas Negroponte, « URBAN5: An On-Line Urban Design Partner », *op. cit.*, p. 289.

28. Nicholas Negroponte, « URBAN5 », dans *The Architecture Machine*, Cambridge, MIT Press, 1970, p. 93.

29. À ce titre, l'approche du Architecture Machine Group peut être considérée comme un « hybride » entre l'IA symbolique et une cybernétique plus « traditionnelle ». Le projet du Architecture Machine Group peut ainsi être compris comme une tentative d'« implémentation » d'idées cybernétiques, et notamment de la notion de conversation de Gordon Pask, à l'aide des nouveaux outils offerts par l'intelligence artificielle symbolique.

directement liées à l'histoire de la cybernétique (Frank Rosenblatt), ces recherches s'inscrivent, dans tous les cas, dans une direction conceptuelle ouverte par la cybernétique au cours des années 40<sup>30</sup>.

Ces machines analogiques poursuivaient, par certains aspects, un objectif similaire à celui des dispositifs numériques du Architecture Machine Group : leur « intelligence » se traduisait en effet par la mise en œuvre d'une capacité d'adaptation, leur permettant de stabiliser leurs relations avec un environnement<sup>31</sup> en évolution dynamique et imprévisible. Cependant, tout en partageant cet objectif commun avec les « machines architecturales » développées au MIT, les dispositifs cybernétiques se basaient sur une vision radicalement distincte de la notion d'adaptation — ce qui nous conduit ici à les considérer en tant que second jeu de références pratiques pour notre projet d'une conception de processus de maintenance dans le contexte d'une production participative.

Comme nous l'avons vu, l'implémentation de capacités adaptatives était envisagée, pour le Architecture Machine Group, au prisme de l'objectif du développement d'une IA *générale*, idéalement dotée des mêmes capacités cognitives que l'interlocuteur humain avec laquelle elle devait entrer en conversation. Par contraste, l'approche cybernétique procédait d'une compréhension plus élémentaire de la capacité d'adaptation, au sens où cette capacité n'était pas comprise comme produite par des processus cognitifs avancés, mais était envisagée comme un mécanisme fondamental, atomique, du fonctionnement du cerveau. À la différence des tenants du paradigme symbolique, les cybernéticiens ne comprenaient pas le cerveau comme un « processeur » capable de produire, par la manipulation de processus logiques, un comportement adaptatif, mais considéraient à l'inverse le comportement adaptatif comme la base même de toute activité ou comportement « intelligent ».

Dans cette optique, la notion d'adaptation était bien liée à l'idée d'« intelligence », mais cette intelligence n'était en aucun cas envisagée dans une extension cognitive *générale* et, à vrai dire, n'était pas construite spécifiquement sur la base du modèle humain. Plus que la volonté de modéliser certains aspects précis de l'intelligence humaine, ou même d'un animal spécifique, c'était en effet la capacité d'adaptation d'une machine à son environnement *en tant que telle* qui intéressait les cybernéticiens, et qu'ils cherchaient à implémenter.

---

30. Pour simplifier, nous qualifierons ici de « cybernétiques » l'ensemble de ces dispositifs, en nous basant sur leurs fondements conceptuels communs.

31. Il importe de ne pas confondre l'utilisation du terme « environnement » faite dans cette section avec la notion d'« environnement réactif ». Le terme d'environnement désigne en effet ici l'« extérieur » d'un dispositif, ce avec quoi ce dernier entre en interaction. La notion d'environnement réactif décrit au contraire, comme nous l'avons vu dans notre analyse des idées de Gordon Pask, le dispositif lui-même : ce dispositif peut en effet être considéré comme un « environnement » du point de vue de ses habitants.

ter dans leurs dispositifs. Bien entendu, certaines machines développées dans ce contexte pouvaient exhiber un comportement présentant une ressemblance avec celui d'organismes vivants, comme les « tortues » électroniques conçues par W. Grey Walter. Mais nous souhaitons insister ici sur le fait que cette ressemblance n'était pas visée explicitement, du moins dans les premiers temps de la recherche cybernétique<sup>32</sup>. Certaines machines, comme celles de Gordon Pask et Stafford Beer, s'éloignaient ainsi délibérément de toute préoccupation réaliste pour mettre à l'épreuve des mécanismes adaptatifs inédits, pensés pour une application spécifique (comme le contrôle d'une usine) : ces expérimentations relevaient alors d'une forme d'*ingénierie* qui, cherchant à produire des artefacts à partir d'une mobilisation de comportements adaptatifs « naturels », entretenait des liens avec le domaine naissant de la bionique<sup>33</sup>. C'est précisément par la versatilité de leurs modalités de mise en œuvre de la notion d'adaptation, permise par une compréhension non anthropocentrique de cette dernière, que les dispositifs cybernétiques constituent des références pratiques importantes à nos yeux.

Avant de poursuivre notre examen des machines adaptatives cybernétiques, il convient tout d'abord de préciser en quoi celles-ci relèvent d'une orientation « analogique ». La première dimension sous-tendue par l'emploi du terme « analogique » est ici d'ordre *technique*. Tous les artefacts discutés dans cette section se caractérisent en effet par un fonctionnement techniquement analogique, au sens où leurs mécanismes ne font intervenir que des grandeurs physiques *continues* (courants, concentrations chimiques...) — par opposition aux ordinateurs numériques, basés sur une représentation discrète des quantités manipulées. Ce choix d'une réalisation technique analogique résulte sans doute, en premier lieu, des contraintes imposées par la période de création de ces machines. Les tortues mécaniques de W. Grey Walter ou l'homéostat de W. Ross Ashby, deux dispositifs sur lesquels nous reviendrons dans un instant, ont tous deux été conçus en 1948, soit l'année de la mise en service du premier ordinateur numérique moderne, la Small-Scale Experimental Machine, ou SSEM,

---

32. Par contraste, la recherche en IA symbolique, par son principe même, a immédiatement pris pour objectif le développement d'une machine implémentant une forme d'intelligence humaine, même s'il était envisagé qu'à terme, l'intelligence de la machine dépasse (en *quantité*, mais sans doute pas en *qualité*) celle de l'homme.

33. Le terme de « bionique » a été introduit en 1958 par Jack Steele, psychiatre et neurophysiologue au sein de l'US Air Force, pour désigner la science des « systèmes dont la fonction se base sur des systèmes vivants, ou qui possèdent les caractéristiques de tels systèmes, ou encore qui ressemblent à ces derniers » (Peter Asaro, « Heinz von Foerster and the Bio-Computing Movements of the 1960s », dans Albert Müller et Karl Müller (dir.), *An Unfinished Revolution? Heinz von Foerster and the Biological Computer Laboratory (BCL), 1958–1976*, Vienne, Echoraum, 2007, p. 267, notre traduction).

de l'université de Manchester<sup>34</sup> (figure 11.6). Or, dans ces premières années du développement de l'informatique, l'accès aux ordinateurs numériques reste exceptionnel et, le cas échéant, extrêmement coûteux. Par contraste, la fin de la Seconde Guerre Mondiale entraîne le démantèlement de nombreux appareils électroniques, dont les pièces se retrouvent sur le marché de l'occasion : il devient aisé de se procurer, à moindre coût, les composants nécessaires au « bricolage » de machines analogiques. Ce critère contextuel semble avoir joué un rôle décisif dans la conception de certains des dispositifs qui nous intéressent ici, comme les tortues de W. Grey Walter<sup>35</sup>.

Néanmoins, ce contexte ne permet pas d'expliquer pourquoi certains projets « cybernétiques » plus tardifs, bénéficiant d'un accès accru aux moyens de calcul numériques, continuent de privilégier une implémentation analogique. Le perceptron de Frank Rosenblatt, testé en 1957 sous la forme d'un programme pour l'ordinateur IBM 704<sup>36</sup>, sera ainsi réalisé par la suite sous la forme d'une machine analogique dédiée, le perceptron Mark I<sup>37</sup> (figure 11.7). Au-delà de toute considération pragmatique, l'adoption durable de solutions techniques d'ordre analogique traduit donc, à notre sens, une hypothèse fondamentale de l'approche cybernétique : l'idée selon laquelle la conception de machines partageant les mêmes principes *organisationnels* que les êtres vivants permettrait de faire émerger, par *analogie*, des comportements adaptatifs au sein de ces machines.

---

34. La SSEM est plus précisément considérée comme le premier ordinateur dit à « programme enregistré », c'est-à-dire doté d'une mémoire permettant le stockage et la manipulation dynamique d'instructions (B. Jack Copeland, « The Modern History of Computing », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2008, en ligne : <https://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/computing-history>, consulté le 18 août 2016).

35. Andrew Pickering, *The Cybernetic Brain: Sketches of Another Future*, *op. cit.*, p. 56.

36. Christopher M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, New York, Springer, 2006, p. 193.

37. Le perceptron était inspiré du modèle de neurone développé par les cybernéticiens Warren S. McCulloch et Walter Pitts en 1943 (Warren S. McCulloch et Walter Pitts, « A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity », *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, n° 4, 1943, p. 115-133), ainsi que des théories formulées en 1949 par Donald Hebb sur les mécanismes d'adaptation neuronale au cours du processus d'apprentissage (Donald O. Hebb, *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*, Mahwah, Lawrence Erlbaum Associates, 2002), postulant que l'excitation simultanée de deux neurones se traduisait par un renforcement de leurs interconnexions. Il est aujourd'hui considéré comme l'ancêtre des réseaux de neurones artificiels modernes. La machine perceptron Mark I était conçue pour apprendre à reconnaître des caractères typographiques, captés à partir d'une grille de 20 x 20 cellules photo-électriques (Christopher M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, *op. cit.*, p. 196).

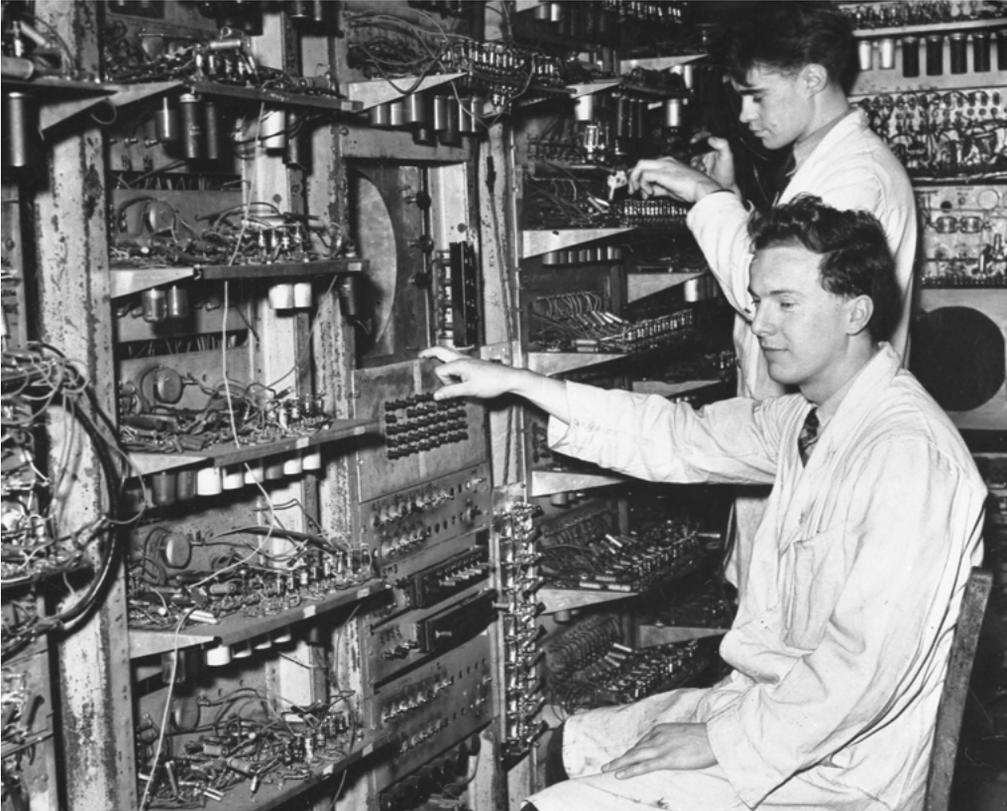


Fig. 11.6 — Dai Edwards (au premier plan) et Tommy Thomas, étudiants à l'université de Manchester, au travail sur la Small-Scale Experimental Machine (source : <http://curation.cs.manchester.ac.uk/digital60/www.digital60.org/media/index.html>).

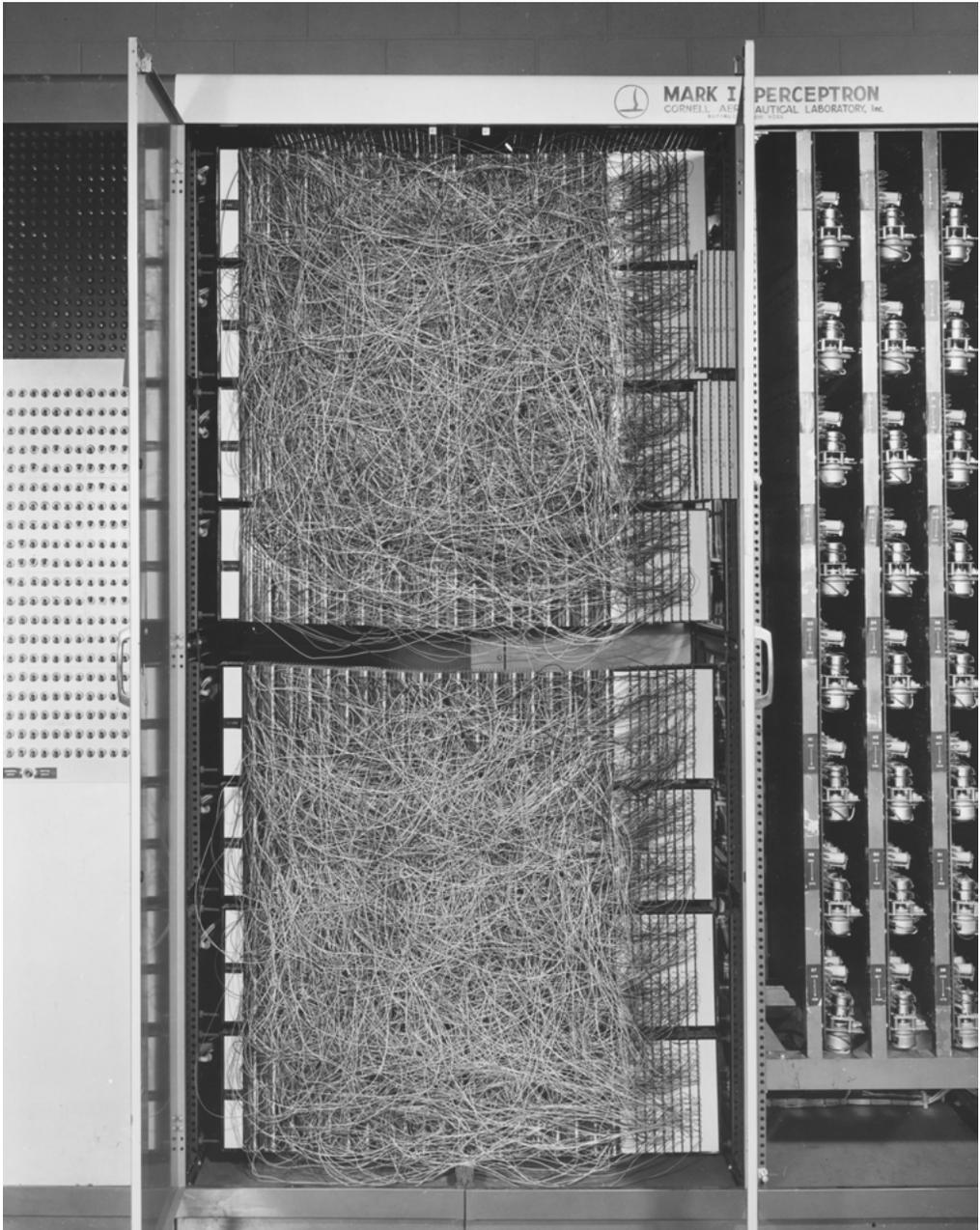


Fig. 11.7 — Le perceptron Mark I (source : <https://digital.library.cornell.edu/catalog/ss:550351>).

Plus spécifiquement, l'approche cybernétique se basait sur l'idée selon laquelle l'« intelligence » — ou, plus précisément, la capacité d'adaptation — pouvait être induite, dans une machine, par l'*organisation* adéquate d'un ensemble d'éléments fonctionnels simples, en interaction. Ce point de vue était bien évidemment construit par analogie avec l'organisation neuronale. Les machines cybernétiques cherchaient donc à se rapprocher analogiquement de l'organisation du cerveau — en visant non pas une ressemblance exacte avec sa structure physiologique, mais une « ressemblance de rapports<sup>38</sup> » avec son agencement, mise en œuvre par l'adoption d'une organisation basée sur le même type de relations entre « composants » que celles donnant lieu, dans le cerveau, à l'émergence de comportements adaptatifs<sup>39</sup>. C'est à notre sens en vertu de cette recherche d'une *analogie organisationnelle* avec le cerveau que les cybernéticiens s'orientaient préférentiellement vers la construction de machines *techniquement* analogiques, capables d'*instancier matériellement* les relations présidant à leur organisation.

Bien entendu, l'ordinateur numérique peut permettre de *simuler* ces relations et, de fait, cette technique sera mise à profit dans certaines machines, dont le perceptron de Rosenblatt. Cependant, le fait que le perceptron ait, en définitive, fait l'objet d'une implémentation sous une forme analogique, nous suggère d'avancer ici une hypothèse, sur laquelle nous reviendrons par la suite : contrairement au courant de l'IA symbolique, pour lequel le médium « exécutant » les processus cognitifs ne possédait aucune importance (ce qui permettait aux chercheurs d'espérer, un jour, implémenter les capacités cognitives du cerveau humain dans un ordinateur numérique), les approches cybernétiques s'intéressaient à la *matérialité* des dispositifs qu'elles mettaient en œuvre. Selon cette hypothèse, il s'avérerait dès lors indispensable que le comportement adaptatif exhibé par une machine puisse être *directement* lié, à l'instar du cerveau, à la structure matérielle prise par ses composants — d'où le choix indispensable d'une mise en œuvre analogique.

Après avoir précisé ces différentes nuances de notre compréhension de la nature analogique des machines cybernétiques, nous pouvons à présent examiner quelques unes d'entre elles. L'un des premiers et plus célèbres de ces dispositifs est la tortue électronique de W. Grey Walter, conçue en 1948. Baptisée *Machina speculatrix*<sup>40</sup> par Walter, la tortue était un objet mobile, de conception électromécanique, muni de deux roues arrière et d'une roue avant, motorisée et montée sur un axe rotatif (figure 11.8). L'axe de la roue avant portait éga-

38. Paul Grenet, *Les origines de l'analogie philosophique dans les Dialogues de Platon*, Paris, Boivin, 1948, p. 247.

39. Andrew Pickering, *The Cybernetic Brain: Sketches of Another Future*, op. cit., p. 45.

40. W. Grey Walter, « An Imitation of Life », *Scientific American*, vol. 182, n° 5, 1950, p. 43.

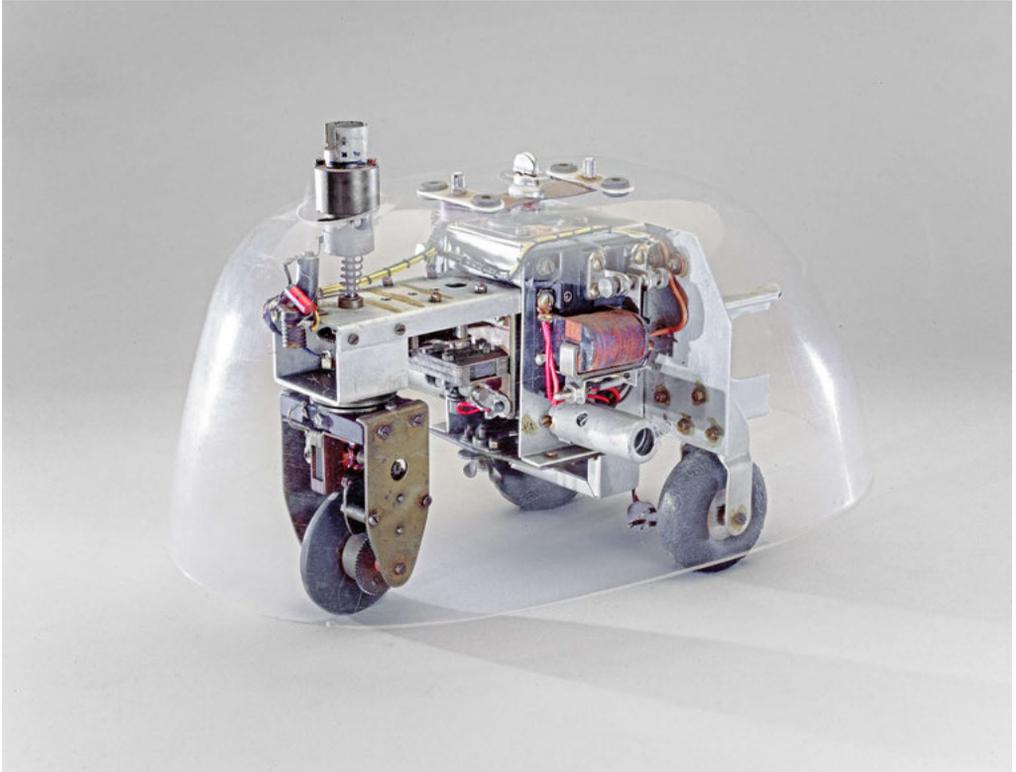


Fig. 11.8 — Modèle de tortue électronique construit par W. Grey Walter en 1951. Les premiers modèles de tortue, développés en 1948, étaient munis d'une « carapace » métallique opaque (source : [https://www.si.edu/object/nmah\\_879329](https://www.si.edu/object/nmah_879329)).

lement une cellule photoélectrique, de direction alignée à celle de la roue, qui émergeait au dessus de la « carapace » de la tortue.

Le comportement de base de la tortue la conduisait à rechercher des sources lumineuses, et à se diriger vers elles. Par défaut, l'axe avant était animé d'un mouvement de rotation continu (un comportement que Walter qualifiait de « scanning<sup>41</sup> », c'est-à-dire de balayage) : la tortue se déplaçait alors erratiquement, suivant une trajectoire cycloïdale, explorant l'environnement à sa disposition jusqu'à ce que sa cellule « accroche » une source lumineuse : lorsque cet événement se produisait, la rotation de l'axe avant s'arrêtait et la tortue adoptait alors une trajectoire dirigée vers la source (figure 11.9).

Ce comportement de base était enrichi par deux mécanismes supplémentaires, implémentant deux principes d'adaptation de la tortue à son environnement. Le premier de ces mécanismes permettait à la tortue de négocier la présence d'un obstacle sur sa trajectoire : les collisions de la tortue avec l'ob-

41. *Ibid.*, p. 44.

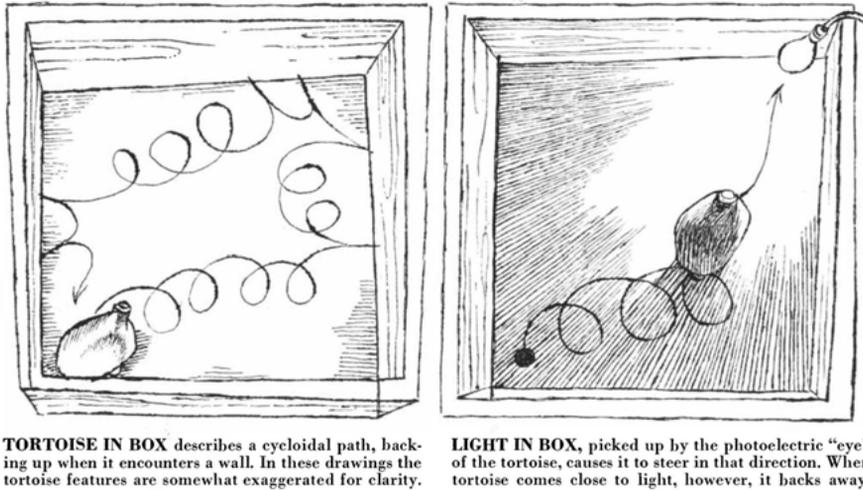


Fig. 11.9 — Illustration des principaux mécanismes du comportement de la tortue (source : W. Grey Walter, « An Imitation of Life », *Scientific American*, vol. 182, n° 5, 1950, p. 43).

jet bloquant étaient détectées à l'aide d'un contact électronique, contrôlant le déclenchement d'oscillations électriques dans l'alimentation des moteurs. Ces oscillations produisaient alors une série d'à-coups qui permettaient en général à la tortue de se désengager de l'obstacle<sup>42</sup>. Le second de ces comportements visait à garantir une certaine distance entre la tortue et les sources lumineuses rencontrées : la rotation de l'axe avant, portant la cellule photoélectrique, était rétablie lorsque l'intensité lumineuse mesurée s'avérait trop importante, ce qui conduisait la tortue à s'écarter de la lumière lorsqu'elle s'en rapprochait trop<sup>43</sup>.

Dotée de ces fonctions, la tortue s'avérait capable de produire un véritable comportement émergent, d'une richesse surprenante par rapport à la simplicité de sa conception. Les tortues de W. Grey Walter venaient ainsi appuyer l'idée cybernétique fondamentale selon laquelle tout comportement adaptatif complexe naît, au niveau physiologique, d'une interaction entre un ensemble d'unités simples et interconnectées — en amont de toute capacité d'exercice de facultés cognitives. Le comportement des tortues ne s'avérait en effet pas simplement imprévisible, mais semblait véritablement traduire une forme d'« intelligence », comprise comme la mise en œuvre d'une capacité d'adaptation à l'environnement : en dépit de leur conception simple, les machines conçues par Walter renvoyaient en ce sens une « impression étrange d'intentionnalité, d'indépendance et de spontanéité<sup>44</sup> ». Elles pouvaient ainsi

42. *Ibid.*, p. 45.

43. *Ibid.*, p. 44.

44. *Ibid.*, p. 45. Notre traduction.

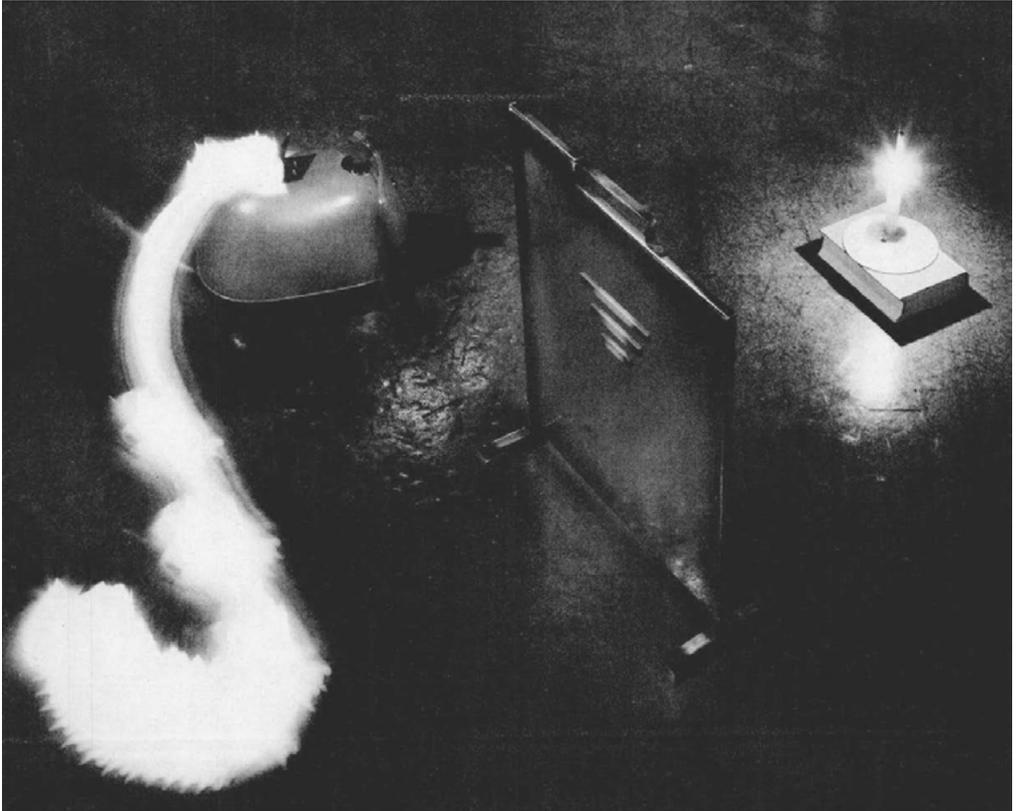


Fig. 11.10 — Photographie en pose longue d'une session expérimentale. La tortue porte ici un témoin lumineux permettant d'enregistrer sa trajectoire (source : [Anon.], « Machines Turn Turtle: Mechanical Pets Show a Low Order of Intelligence », *Life*, vol. 28, n° 20, 1950, p. 147).

chercher, par exemple, à s'approcher « prudemment » de sources lumineuses, à la manière d'un animal cherchant à s'approcher sans se brûler d'une source de chaleur<sup>45</sup>. Lorsqu'on équipait l'une d'entre elles d'une lumière et la plaçait devant un miroir, on observait alors qu'elle semblait se mettre à « sautiller » face à sa propre réflexion, « d'une manière si spécifique que, eut-elle été un animal, un biologiste aurait légitimement pu lui attribuer une capacité de reconnaissance de soi<sup>46</sup> ».

Par ces comportements, les tortues électroniques se rattachaient à une catégorie de machines totalement différente des « cerveaux électroniques » — autrement dit, des ordinateurs numériques — qui devaient héberger, quelques années plus tard, les premiers programmes de l'IA symbolique. Comme le

45. *Ibid.*, p. 44.

46. *Ibid.*, p. 45. Notre traduction.

souligne W. Grey Walter : « [d]ans une catégorie différente de celle des ordinateurs, on trouve un certain type d'appareils conçus pour imiter, avec une plus grande ressemblance, les créatures vivantes les plus simples, tant dans leurs limites (ce qui passerait pour un défaut dans le cas d'un ordinateur) que dans leurs qualités<sup>47</sup> ». De conception beaucoup plus simple que les ordinateurs numériques, les tortues faisaient preuve, malgré cette simplicité — ou peut-être grâce à elle — de comportements singulièrement plus « vivants » que ceux des programmes informatiques les plus avancés de l'époque. Cette situation devait se prolonger jusqu'au années 60 et 70 : en dépit des millions de dollars investis dans la recherche en IA symbolique, les programmes les plus célèbres de cette période, comme SHDRLU, restent par de nombreux aspects loin d'exhiber la même richesse de comportement que les tortues « bricolées » par W. Grey Walter une vingtaine d'années plus tôt. La différence la plus saillante entre ces deux catégories de machines — cybernétique et symbolique — s'exprime sans doute au niveau des *environnements* avec lesquels elles étaient respectivement amenées à s'engager : dans les années 60 et 70, les IAs symboliques agissaient le plus souvent dans des « microworlds », des univers numériques précisément contrôlés, là où les tortues de W. Grey Walter se trouvaient directement en prise avec la complexité du monde physique réel.

Par leur capacité d'engagement physique dans le monde, les tortues de W. Grey Walter nous renvoient ainsi à la notion d'agentivité, dont elles actualisent une compréhension sous l'angle de la *performance*, plutôt que de la représentation. Comme le souligne Andrew Pickering, les machines cybernétiques se rapportaient en effet à une vision *performative* du cerveau, contrastant avec la vision représentationnelle développée par le champ de l'IA symbolique<sup>48</sup>. Si l'IA symbolique ne pouvait concevoir des « agents adaptatifs » qu'en cherchant à doter ceux-ci d'une capacité générale à manipuler des représentations mentales, l'approche cybernétique se préoccupait de donner *directement* à ses dispositifs la capacité d'agir sur le monde, sans conditionner cette capacité d'action à la possession de facultés cognitives. Dans le cadre de l'approche cybernétique, la construction de machines posant la question d'une *agentivité matérielle*, comme les tortues de W. Grey Walter, revêtait donc une valeur épistémologique : cette pratique venait appuyer une vision théorique du cerveau, de même que la conception de programmes comme SHDRLU devait venir étayer les thèses de l'IA symbolique. Il était donc central, pour des raisons théoriques, que les machines cybernétiques puissent *démontrer* concrètement leurs capacités à s'adapter à l'environnement réel. Cette remarque nous ramène ainsi à l'importance accordée par la cybernétique à la matérialité de ses dispositifs :

47. *Ibid.*, p. 43. Notre traduction.

48. Andrew Pickering, *The Cybernetic Brain: Sketches of Another Future*, op. cit., p. 6.

comme le souligne N. Katherine Hayles, « [u]ne partie du pouvoir de conviction de la cybernétique était due aux appareils électromécaniques visant à en démontrer les principes, lors des conférences Macy et ailleurs. La cybernétique était puissante car elle *fonctionnait*<sup>49</sup> ».

Cette remarque nous permet de préciser le statut épistémologique de dispositifs comme les tortues de W. Grey Walter : tout en s'affranchissant du critère d'une ressemblance physiologique stricte avec le cerveau, ces machines en proposaient cependant un modèle — suggérant, par analogie avec leur propre composition, que le comportement adaptatif du cerveau pouvait être étudié en identifiant, dans sa structure, des mécanismes simples possédant une fonction adaptative. Comme le souligne Andrew Pickering, « [i]l était ainsi suggéré que le cerveau biologique puisse contenir des structures similaires à celles de la tortue — non pas des valves et des relais, bien sûr, mais quelque chose d'équivalent sur le plan fonctionnel<sup>50</sup> ». Cependant, une propriété essentielle manquait à la « modélisation » proposée par les tortues : la capacité d'*apprendre* de l'environnement, centrale dans les mécanismes d'adaptation biologique.

L'homéostat de W. Ross Ashby (figure 11.11), conçu en 1948, visait précisément à explorer ces relations entre adaptation et apprentissage<sup>51</sup>. Comme les tortues de W. Grey Walter, l'homéostat était un dispositif analogique doté de capacités adaptatives : il s'agissait d'un petit boîtier électronique dont l'organisation était pensée de sorte à maintenir dans les limites d'une valeur de consigne une tension électrique de sortie, influencée par les évolutions de trois tensions d'entrée. Contrairement aux tortues, l'homéostat n'était pas capable de se déplacer, et se trouvait couplé à son environnement par un canal purement électrique. Mais une différence plus fondamentale le distinguait des machines de W. Grey Walter : l'homéostat était doté d'une capacité d'adaptation *dynamique*, conçue par W. Ross Ashby comme un modèle général du processus d'apprentissage biologique.

Pour comprendre les raisons ayant conduit, en premier lieu, W. Ross Ashby à s'intéresser à une vision dynamique de l'adaptation, il est utile de comparer l'homéostat à d'autres dispositifs techniques adaptatifs disponibles à la même époque. Par sa fonction, l'homéostat peut être rapproché du thermostat, autrement dit d'un dispositif maintenant la température d'une enceinte dans les limites d'une valeur de consigne, à l'aide d'un mécanisme de rétroaction néga-

---

49. N. Katherine Hayles, *How We Became Posthuman: Virtual Bodies in Cybernetics, Literature, and Informatics*, op. cit., p. 62. Notre traduction, italiques dans le texte.

50. Andrew Pickering, *The Cybernetic Brain: Sketches of Another Future*, op. cit., p. 45. Notre traduction.

51. W. Grey Walter se penchera lui aussi sur cette problématique, en développant à partir de 1950 un module d'apprentissage nommé CORA, destiné à être couplé aux tortues (*Ibid.*, p. 64).

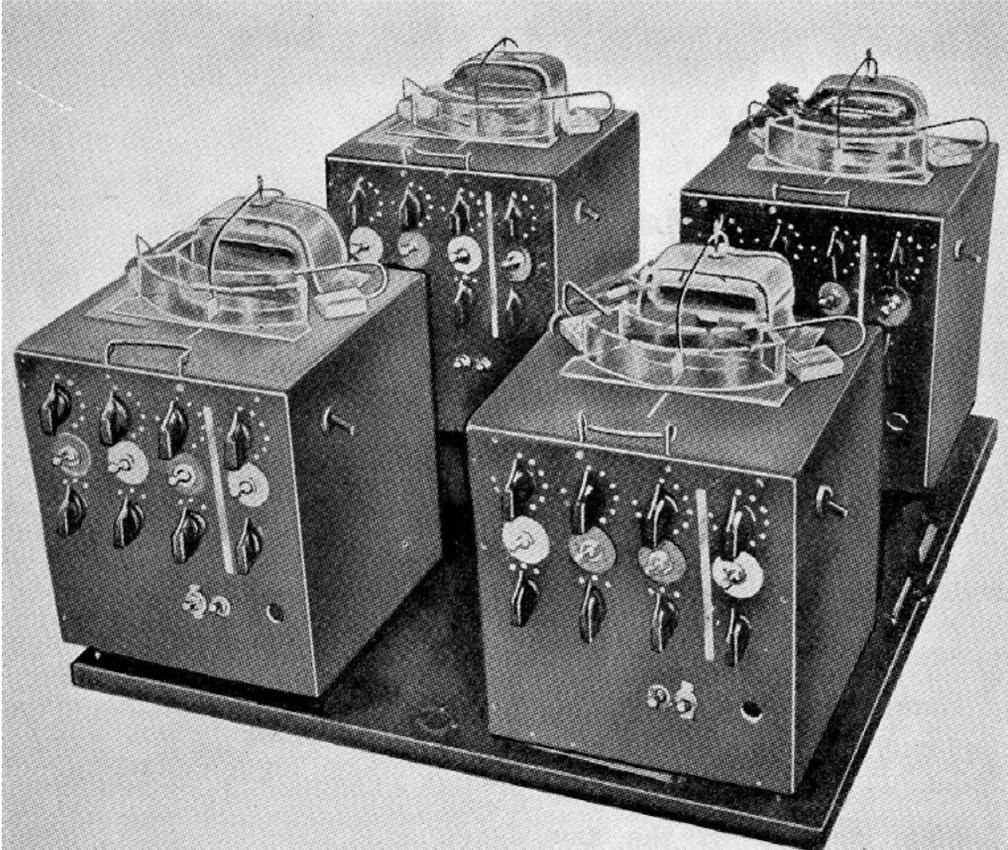


Fig. 11.11 — Assemblage de quatre homéostats (source : <http://www.rossashby.info/biography.html>).

tive ajustant l'alimentation du système de chauffage en fonction de la température mesurée. Le thermostat constitue l'un des dispositifs adaptatifs les plus élémentaires : il s'agit d'un de ces « régulateurs » électroniques qui, comme nous l'avons vu, ont inspiré les développements de la cybernétique dans les années 1940. Dans leur article fondateur de 1943, *Behavior, purpose and teleology*, Rosenblueth, Wiener et Bigelow relient, pour la première fois, le type de régulation opéré par le thermostat au comportement biologique : dans une hypothèse célèbre, les auteurs proposent d'interpréter la pathologie du « tremblement intentionnel » (*purpose tremor*), caractérisée par le déclenchement de tremblements au terme d'une action délibérée (comme porter un verre d'eau à la bouche), comme une *instabilité* due à un phénomène de rétroaction insuffisamment amorti<sup>52</sup>. Or, si cette analogie entre l'adaptation biologique et la

52. Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener et Julian Bigelow, « Behavior, purpose and teleology », *op. cit.*, p. 20.

régulation opérée par des dispositifs comme le thermostat occupe une place centrale dans le développement de la cybernétique, elle présente certaines limites — et c'est précisément là qu'intervient l'homéostat d'Ashby.

Dans une section intitulée « The Homeostat as adapter » de l'ouvrage *Design for a Brain*<sup>53</sup>, W. Ross Ashby discute une série d'expériences physiologiques, montrant les limites d'une compréhension de l'adaptation biologique développée par analogie avec des dispositifs comme le thermostat. Dans une expérience réalisée sur des singes, par exemple, le sens d'une connexion musculaire est inversé chirurgicalement : on s'attend alors à obtenir des mouvements inversés, mais, après une première phase où l'on observe effectivement ce type de comportements, le mouvement normal est bientôt rétabli<sup>54</sup>. Une telle expérience montre que des systèmes « simplement rétroactifs », comme le thermostat, ne peuvent modéliser de manière satisfaisante les capacités adaptatives du cerveau : en effet, si nous inversons, de manière analogue à l'expérience citée ci-dessus, le « câblage » du mécanisme de rétroaction d'un thermostat, de sorte que son action devienne positive et non plus négative, le dispositif de régulation *aggraver*a l'écart par rapport à la température de consigne, au lieu de le diminuer. Par contraste, les mécanismes d'adaptation biologique finissent par ajuster l'action de l'organisme à la nouvelle configuration de son environnement<sup>55</sup>, rétablissant ainsi une forme d'équilibre, comme observé dans l'expérience décrite par Ashby. En d'autres termes, les capacités adaptatives des organismes vivants se traduisent, de manière centrale, par une capacité à faire évoluer la nature des comportements « régulateurs » de ces organismes au contact de leur environnement, selon un processus d'*apprentissage*. Partant de ce constat, W. Ross Ashby fait donc l'hypothèse selon laquelle le cerveau se doit d'être organisé de sorte à pouvoir faire évoluer dynamiquement sa *structure*, dans un processus faisant écho à la nature dynamique, changeante, du comportement régulateur biologique. La modélisation *analogique* des capacités adaptatives du cerveau suppose donc, dès lors, d'être en mesure de construire des machines capables de *s'auto-structurer* dynamiquement (une propriété que W. Ross Ashby qualifie d'« auto-organisation »), ce qui nécessite de concevoir un tout nouveau type d'*organisation* — un nouveau type de machines — que

---

53. W. Ross Ashby, *Design for a Brain*, Londres, Chapman & Hall, 1952, p. 104–109.

54. *Ibid.*, p. 104–105.

55. Dans sa description des expériences réalisées avec l'homéostat, Ashby accorde un sens précis au terme « environnement », compatible avec l'idée d'une localisation du mécanisme adaptatif dans le cerveau : « [l]a moelle épinière, les nerfs périphériques, les muscles, les os (...) — tous constituent l'« environnement » du cortex cérébral » (*Ibid.*, p. 106, notre traduction). Dans cette perspective, l'opération d'inversion des connexions musculaires chez le singe, décrite précédemment, se comprend bien comme une modification de l'« environnement » du cerveau.

celui des dispositifs de régulation comme le thermostat. L'homéostat constitue le prototype de cette nouvelle classe de machines.

L'homéostat se présentait sous la forme d'un boîtier électronique doté de trois entrées et d'une sortie, muni d'un ensemble de contrôles en façade, et surmonté d'un indicateur à aiguille. Au niveau électronique, l'homéostat opérait la conversion des tensions appliquées à ses entrées (jusqu'à 3) en une unique tension de sortie. Trois bobines indépendantes (marquées A, B et C sur la figure 11.12), alimentées par les tensions d'entrée de l'appareil, généraient un champ magnétique complexe qui induisait une déviation de l'aiguille (aimantée) de l'indicateur. Cette aiguille, trempant dans un bac d'eau auquel était appliqué une tension constante, jouait ensuite le rôle d'un potentiomètre (résistance variable) contrôlant la valeur de la tension de sortie. À tout moment, la tension délivrée par le dispositif s'avérait donc proportionnelle à la position de l'aiguille sur l'indicateur, elle-même dépendante d'un champ magnétique créé par le couplage des tensions d'entrée de la machine<sup>56</sup>.

En régime de fonctionnement « stable », l'homéostat délivrait une tension de sortie constante, obtenue lorsque l'aiguille se fixait sur le milieu de l'indicateur. Ce régime de comportement ne pouvait être obtenu que si les trois champs magnétiques créés par les entrées se combinaient de manière adéquate ; dans le cas contraire, l'aiguille déviait vers la gauche ou la droite du cadran. La stabilisation de l'aiguille dans sa position médiane dépendait, en pratique, non seulement des tensions d'entrée du dispositif, mais de la valeur d'un ensemble de composants électroniques internes, affectés à chacun des canaux reliant les trois entrées aux bobines. Par ailleurs, les tensions d'entrée fournies à l'homéostat étaient en général couplées à la sortie de la machine, ce qui complexifiait grandement le mécanisme par lequel les trois champs magnétiques pouvaient se combiner de manière « stable », dans la mesure où toute modification de la tension de sortie se répercutait immédiatement sur les valeurs de ces champs. Ce couplage était en pratique obtenu en reliant l'homéostat à un, deux, ou trois autres homéostats, la sortie de chaque machine étant alors connectée à une entrée sur chacune des autres<sup>57</sup> (d'où le ratio maximum de 3 entrées pour une sortie). L'ensemble du système suivait alors une évolution complexe, impossible à prévoir de manière analytique, dans la mesure où chaque homéostat, en tentant d'ajuster sa tension de sortie à ses entrées, modifiait en retour les entrées des autres modules. Ce type de configurations avait été pensé par Ashby pour rendre compte du couplage du cerveau, représenté par l'un des homéostats de l'assemblage (que nous désignerons par le terme d'homéostat « cer-

---

56. *Ibid.*, p. 100.

57. *Ibid.*, p. 102.

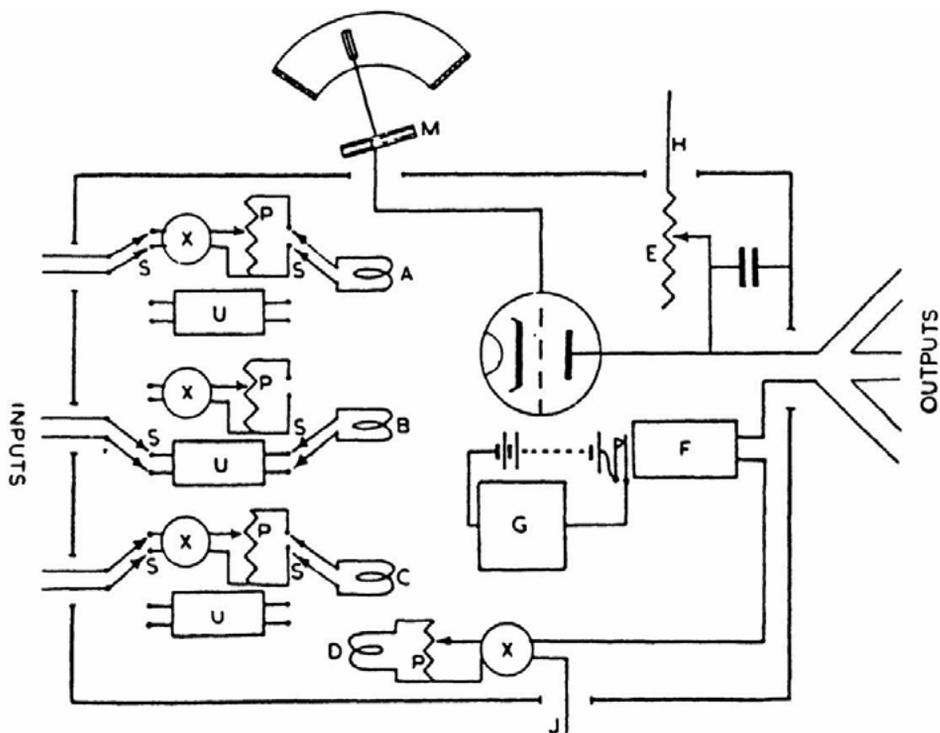


Fig. 11.12 — Schéma électrique de l'homéostat (source : W. Ross Ashby, *Design for a Brain*, Londres, Chapman & Hall, 1952, p. 102).

veau », ou « de référence »), avec un environnement en évolution *dynamique*, modélisé par les autres homéostats.

La possibilité de se doter d'un modèle dynamique d'environnement s'avérait importante, car elle permettait de tester le comportement de l'homéostat « cerveau » en réponse à différents types de perturbations environnementales. Chaque homéostat pouvait en réalité être réglé dans deux modes de fonctionnement, manuel ou automatique. Dans les configurations à plusieurs modules décrites ci-dessus, l'homéostat de référence (le « cerveau ») se trouvait ainsi typiquement réglé en mode automatique, tandis que les homéostats composant l'« environnement » étaient opérés manuellement. Il était alors possible de modifier les valeurs des composants électroniques de ces unités d'« environnement », à l'aide des contrôles en façade prévus à cet effet, dans l'objectif d'étudier comment l'homéostat « cerveau » parviendrait à s'adapter automatiquement à ces nouvelles conditions environnementales. Cette configuration permettait ainsi à Ashby de simuler des situations analogues, par exemple, à l'expérience d'inversion des connexions musculaires chez le singe : dans une configuration à deux homéostats, l'activation d'un inverseur, situé sur l'homéostat « environnement » (le « muscle »), était utilisée pour provoquer une déstabilisation d'ensemble du système : les tensions de sortie des deux homéo-

stats, auparavant alignées sur une valeur médiane, se mettaient alors à fluctuer de manière erratique<sup>58</sup>. Si l'homéostat « cerveau » avait fonctionné comme un simple thermostat, l'équilibre, atteint pour l'état précédent de l'environnement, aurait alors été irrémédiablement perdu ; mais l'homéostat se montrait capable, de manière analogue aux mécanismes d'adaptation biologique, de faire évoluer automatiquement son comportement régulateur pour tenir compte de l'inversion opérée dans son environnement<sup>59</sup>, et le « cerveau » pouvait ainsi rétablir la stabilité d'ensemble du système.

Cette évolution du comportement régulateur était induite par un changement interne de la *structure* de l'homéostat « cerveau », traduite par le remplacement automatique de certains des composants électroniques modifiant le couplage entre les entrées et la sortie de ce dernier — autrement dit, par une modification de la *qualité* même du comportement électrique de la machine<sup>60</sup>. Ce processus d'« auto-organisation » se déclenchait de lui-même, à intervalles réguliers, dans le cadre du mode de fonctionnement automatique de l'homéostat, dans lequel se trouvait typiquement placé le « cerveau ». Dans ce mode de fonctionnement, les signaux d'entrée de l'homéostat étaient dirigés vers un interrupteur rotatif (*uniselector*, ou *stepping switch*, marqué U sur la figure 11.12), un dispositif électromécanique permettant d'activer, par rotation, une configuration prédéfinie de composants parmi un ensemble de possibilités préparées aléatoirement par W. Ross Ashby<sup>61</sup>. Lorsque la tension de sortie de l'homéostat déviait trop de sa valeur de consigne, un relais déclenchait la rotation de l'interrupteur rotatif. Étape par étape, l'homéostat testait ainsi différentes structures, différentes qualités de comportement régulateur, jusqu'à ce que le lien adéquat entre entrée et sortie soit découvert, rétablissant la stabilité (figure 11.13). Au terme d'une série plus ou moins longues de ces modifications structurelles, comprises comme un processus « d'apprentissage », l'homéostat parvenait systématiquement à rétablir la stabilité de ses relations avec son envi-

---

58. *Ibid.*, p. 105.

59. Plutôt que de parler d'environnement dynamique, il serait plus exact de parler ici d'environnement évoluant « par paliers » : une fois l'inversion réalisée sur l'homéostat « environnement », la valeur des composants de ce dernier n'était plus modifiée jusqu'à ce que l'homéostat « cerveau » rétablisse l'équilibre d'ensemble du système.

60. En cohérence avec la terminologie adoptée dans cette thèse, et rappelée à la fin de la section 10.4, nous comprenons ici le processus d'« auto-organisation » de l'homéostat comme un changement de *structure*. L'organisation de la machine, au sens où nous l'entendons, reste en effet stable au cours du processus d'« auto-organisation », car elle se trouve précisément définie par l'ensemble des possibilités de « mise en relation » entre les composants de l'homéostat, dont seules certaines seront actualisées au cours de l'adaptation sous la forme d'un établissement de connexions électriques — modifiant ainsi le trajet de signal actif de la machine, c'est-à-dire sa structure.

61. *Ibid.*, p. 103.

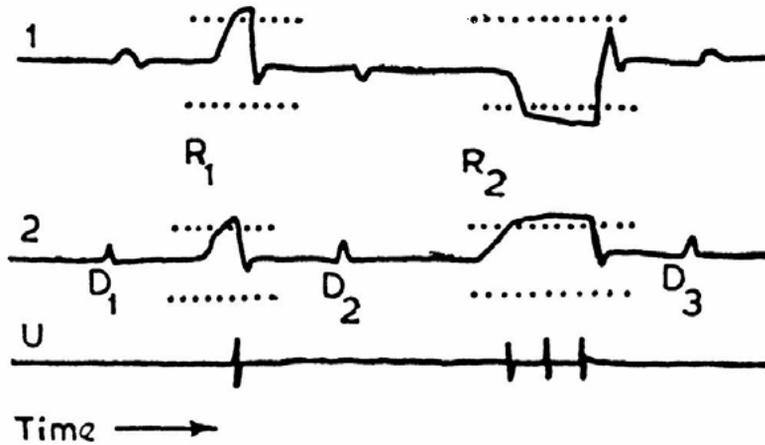


Fig. 11.13 — Déclenchement du mécanisme d'adaptation automatique d'un homéostat « cerveau » suite à plusieurs perturbations successives d'un homéostat « environnement ». Les tracés 1 et 2 indiquent respectivement les tensions de sortie des homéostats « cerveau » et « environnement ». Les inscriptions  $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$  signalent des perturbations de la sortie de l'homéostat « environnement », provoquées manuellement par un opérateur. La ligne U indique les points de déclenchement du mécanisme d'adaptation de l'homéostat « cerveau ». Suite à la perturbation  $D_1$ , les valeurs des tensions des homéostats augmentent (zone  $R_1$ ), jusqu'à ce que la sortie du « cerveau » dépasse une valeur de consigne (en pointillés) : le mécanisme d'adaptation se déclenche alors et trouve immédiatement une configuration électronique adéquate, alignant à nouveau les tensions de sortie des deux homéostats sur une valeur médiane. La perturbation  $D_2$  provoque ensuite un second déséquilibre du système (zone  $R_2$ ) : trois déclenchements du mécanisme d'adaptation sont alors nécessaires à la découverte d'une configuration électronique du « cerveau » rétablissant l'équilibre d'ensemble (source : W. Ross Ashby, *Design for a Brain*, Londres, Chapman & Hall, 1952, p. 105).

ronnement : il constituait ainsi, selon Ashby, un dispositif « ultrastable<sup>62</sup> », là où des dispositifs comme le thermostat, incapables d'apprentissage, s'avéraient « simplement » stables.

Tout en obéissant à un principe de fonctionnement purement déterministe, l'homéostat se montrait capable d'induire *lui-même* un renouvellement de sa structure interne, dans l'objectif de stabiliser ses relations avec son environnement — un processus dont la finalité présente un caractère analogue au processus biologique d'*homéostasie*, introduit en 1926 par Walter B. Cannon pour décrire la capacité des organismes à maintenir constantes certaines propriétés de leur état interne (comme la concentration de certaines molécules) en ré-

62. *Ibid.*, p. 108. Notre traduction.

ponse aux perturbations de leur environnement<sup>63</sup>. À travers le choix du nom d'homéostat, Ashby suggérait ainsi que le comportement « auto-organisateur » implémenté dans sa machine reproduisait un mécanisme fondamental d'adaptation du vivant (l'homéostasie), garant de la survie d'un organisme dans des conditions environnementales fluctuantes. En s'« auto-organisant » (c'est-à-dire en s'auto-structurant) l'homéostat se montrait capable d'assurer sa « survie », c'est-à-dire d'assurer la *maintenance* de son organisation constitutive.

Cette remarque nous permet de souligner une idée importante : elle nous montre qu'au sens strict, la notion d'« auto-organisation » n'a de sens qu'au sein d'un *système* : c'est par son couplage avec l'environnement extérieur (modélisé par un ou plusieurs autres homéostats) que l'homéostat s'engageait dans un processus de restructuration interne, visant, en retour, à stabiliser ce couplage. En d'autres termes, l'« auto-organisation » de l'homéostat de référence ne pouvait véritablement se concevoir que comme auto-organisation d'un système plus large, incluant l'ensemble des autres homéostats auquel il était connecté. Cette exemple souligne le fait que la notion d'auto-organisation, dans le cas général, traduit l'existence d'un couplage entre un système adaptatif et son environnement — une idée que nous avons déjà rencontrée lors de notre discussion de l'article *The Architectural Relevance of Cybernetics* de Gordon Pask, dans lequel l'auto-organisation se trouvait envisagée à l'échelle de l'ensemble du « système architectural », et non du seul dispositif adaptatif. Ces propriétés générales de la notion d'auto-organisation dessinent une trajectoire conceptuelle liant les expérimentations pionnières de W. Ross Ashby avec les dispositifs imaginés, plus tardivement, par Gordon Pask. Par sa mise en œuvre d'une capacité d'auto-organisation, l'homéostat prépare ainsi, en un sens, la perspective d'une implémentation *analogique* de la notion paskienne de dispositifs conversationnels.

Nous allons à présent conclure cette section en précisant les liens entre la notion d'adaptation et l'approche conversationnelle paskienne, à travers l'exemple d'un dispositif analogique développé par Gordon Pask à la fin des années 50 — soit une dizaine d'années avant le « tournant numérique » opéré dans la recherche de l'auteur, annoncé par la publication de l'article *The Architectural Relevance of Cybernetics* et mis en pratique, notamment, par ses collaborations ultérieures avec le Architecture Machine Group<sup>64</sup>. Les travaux

---

63. Evelyn Fox Keller, « Organisms, Machines, and Thunderstorms: A History of Self-Organization, Part One », *op. cit.*, p. 61–62.

64. À compter des années 70, il semble en effet que Gordon Pask, tant dans recherches personnelles que dans ses collaborations avec le Architecture Machine Group, se soit orienté en priorité vers des moyens numériques pour mettre à l'épreuve ses idées. Cependant, ces aspects pratiques de la recherche « tardive » de Gordon Pask nous semblent avoir été moins analysés que les contributions théoriques introduites par l'auteur à la même époque, portant

relatifs à ce dispositif sont notamment discutés dans un article intitulé *The Natural History of Networks*<sup>65</sup>, présenté lors de la première conférence sur les systèmes auto-organiseurs, la Interdisciplinary Conference on Self-Organizing Systems, organisée en mai 1959 au Museum of Science and Industry de Chicago par l'Office of Naval Research et la Armour Research Foundation. De manière parlante, la préface des actes de cette conférence justifie l'intérêt de l'auto-organisation en tant que thème de recherche en établissant, à l'instar de la discussion réalisée en ouverture de cette section, un contraste entre les approches numérique et analogique du problème de la conception de machines « intelligentes ». Tout en notant les progrès récents des ordinateurs numériques, cette préface souligne ainsi que le développement de machines analogiques, « exhibant un haut niveau d'apprentissage ou une capacité d'auto-organisation », pourrait s'avérer indispensable au traitement de problèmes « impliquant des types d'information intrinsèquement non numériques », tels que le « contrôle de systèmes complexes de grande ampleur<sup>66</sup> ». Telle est précisément la direction explorée par Gordon Pask dans son article.

*The Natural History of Networks* présente une série d'expérimentations réalisées par Gordon Pask et Stafford Beer à la fin des années 50, portant sur la possibilité de développer des dispositifs adaptatifs basés sur les capacités d'auto-organisation de systèmes *matériels*, d'origine biologique (Beer) ou électrochimique (Pask). Ces dispositifs, développés de manière indépendante par chacun des deux cybernéticiens<sup>67</sup>, devaient être couplés à divers objets techniques, afin de stabiliser les relations de l'assemblage ainsi formé avec un environnement à l'évolution imprévisible : l'une des applications envisagées concernait, par exemple, la stabilisation des relations productives d'une « usine automatique » avec l'environnement, économique et matériel, dans lequel s'inscrivait

---

notamment sur la formalisation du concept de conversation. Il serait pourtant intéressant de se pencher sur les réalisations informatiques entreprises par Gordon Pask à partir des années 70, et d'étudier plus en détails les termes de sa collaboration avec le Architecture Machine Group. De premiers éléments utiles en ce sens peuvent notamment être trouvés dans un texte publié en 2001 par Paul Pangaro, ancien collaborateur de Gordon Pask et de Nicholas Negroponte : Paul Pangaro, « THOUGHTSTICKER: An Idiosyncratic History of Conversation Theory in Software, and its Progenitor, Gordon Pask », 2001, en ligne : <http://www.pangaro.com/history-conversation-theory.html> (consulté le 29 mars 2017).

65. Gordon Pask, « The Natural History of Networks », dans Marshall C. Yovits et Scott Cameron (dir.), *Self-Organizing Systems: Proceedings of an Interdisciplinary Conference*, New York, Pergamon Press, 1960, p. 232-263.

66. Marshall C. Yovits et Scott Cameron (dir.), *Self-Organizing Systems: Proceedings of an Interdisciplinary Conference*, Préface, New York, Pergamon Press, 1960, p. v. Notre traduction.

67. Dans un texte que nous citerons par la suite, Beer semble cependant indiquer avoir été ponctuellement conduit à participer aux expériences de Gordon Pask.

sa production<sup>68</sup>. Afin de se doter d'une capacité d'adaptation aux diverses fluctuations possibles de cet environnement — comme, par exemple, une perturbation de grande ampleur des marchés économiques<sup>69</sup> —, il s'agissait alors de concevoir un « contrôleur » qui, une fois couplé à l'usine, se montrerait capable de stabiliser les relations entre les capacités de production de cette dernière et un ensemble de variables économiques et matérielles (coût et disponibilité des matières premières, stocks, ressources financières...). Un tel contrôleur devait donc modéliser, de manière analogique, l'*organisation* du « système » de l'usine<sup>70</sup>, et présenter une capacité à s'auto-structurer (s'« auto-organiser ») afin de « découvrir », de manière autonome, les « connexions » adaptées entre les variables de fonctionnement de l'usine et diverses opérations de production<sup>71</sup>. Gordon Pask et Stafford Beer entreprendront tous deux de développer des dispositifs capables de jouer le rôle de ce contrôleur, atteignant des degrés différents de réussite dans cette tâche; la direction empruntée par Gordon Pask, basée sur un processus électrochimique, semble avoir été la plus fructueuse.

---

68. Cette direction applicative sera par la suite formalisée par Stafford Beer; voir notamment : Stafford Beer, « Towards the Automatic Factory », dans Heinz von Foerster et George W. Zopf (dir.), *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium on Self-Organization*, New York, Pergamon Press, 1962, p. 25–89. Au début des années 70, Stafford Beer mettra à l'épreuve ses idées lors d'une mission réalisée pour le gouvernement chilien de Salvador Allende, visant à développer un système cybernétique de gestion de l'économie. Connu sous le nom de *Proyecto Cinco*, ou *Project Cybersyn*, ce projet devait déboucher sur un « ambitieux système de communications et de régulation de l'économie chilienne inspiré par le système nerveux » (Francisco J. Varela, « The Early Days of Autopoiesis: Heinz and Chile », *op. cit.*, p. 413, notre traduction). *Cybersyn* cherchait ainsi à mettre en place des flux d'information entre les différentes infrastructures économiques du pays — incluant, notamment, les usines — et une salle de contrôle centralisée — le « cerveau » —, afin de permettre une régulation en temps-réel de l'activité de production (Andrew Pickering, « Cybernetics and the Mangle: Ashby, Beer and Pask », *op. cit.*, p. 424). Fournissant à Stafford Beer, dans un premier temps, l'opportunité d'appliquer à échelle réelle ses théories sur « l'usine automatique » et le management des entreprises, ce projet sera brutalement interrompu par le coup d'état de 1973.

69. Andrew Pickering, « Beyond Design: Cybernetics, Biological Computers and Hylozoism », *Synthese*, vol. 168, n° 3, 2009, p. 475.

70. Nous désignons ici par ce terme la réunion de l'usine et de son environnement économique et matériel. L'ensemble du système ainsi formé se trouve couplé au contrôleur, et constitue donc l'« environnement » de ce dernier.

71. En raison du couplage *analogique* du contrôleur à l'usine, l'établissement de ces connexions au sein du contrôleur devait se traduire par la réalisation d'actions *concrètes* sur la chaîne de production.

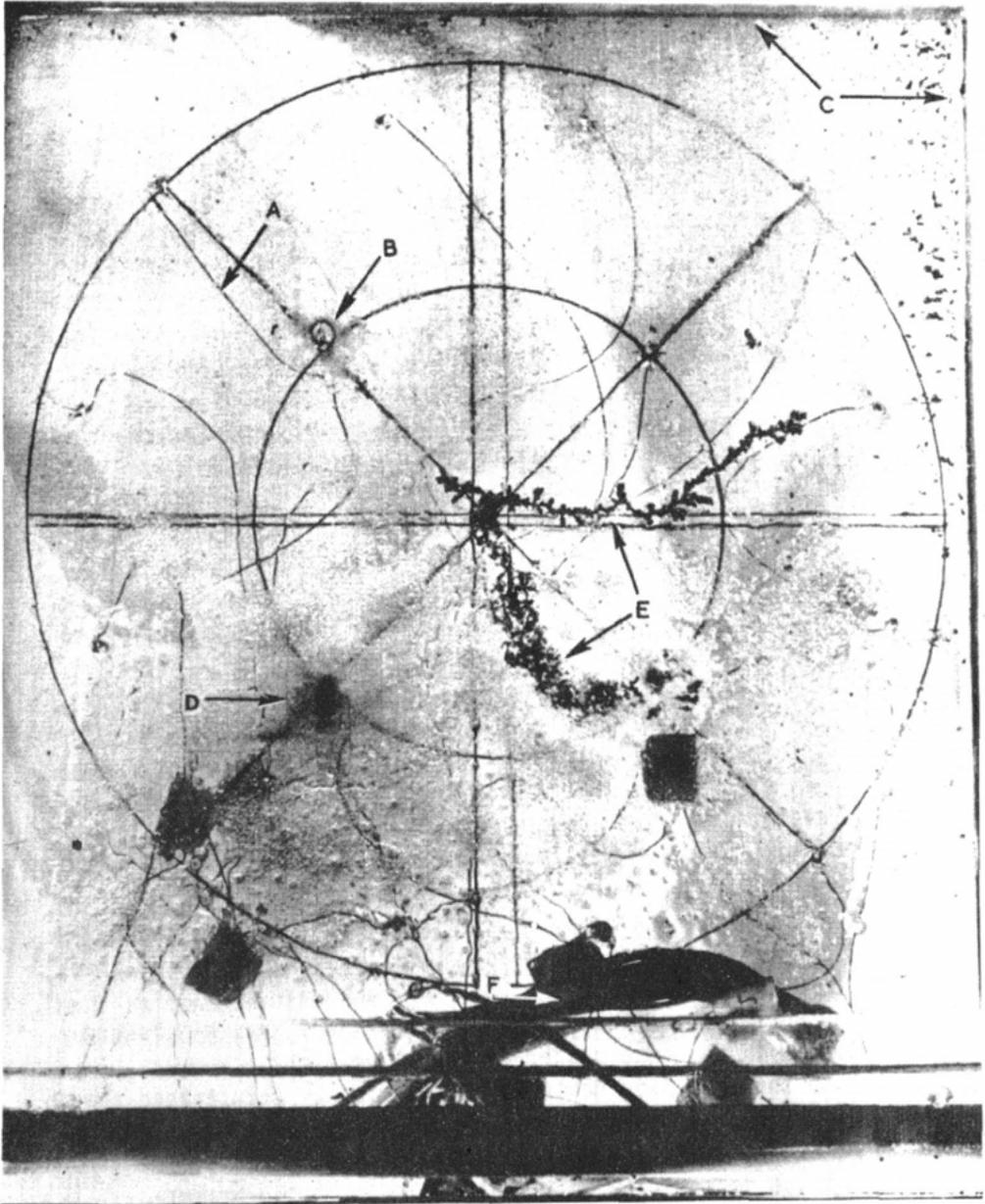


Fig. 11.14 — Vue zénithale du contrôleur électrochimique : (A) câbles de connexion des électrodes, (B) piliers en platine des électrodes, (C) parois de la cuve contenant la solution ferreuse, (D) réaction chimique en cours, (E) structures filaires en formation, (F) câbles de connexion (source : Andrew Pickering, « Beyond design: cybernetics, biological computers and hylozoism », *Synthese*, vol. 168, n° 3, 2009, p. 483).

Concrètement, le contrôleur développé par Pask prenait la forme d'une cuve remplie d'une solution électrolytique ferreuse (figure 11.14), dans laquelle étaient immergés deux ensembles d'électrodes, représentant respectivement, sous formes de tensions, les variables de fonctionnement de l'usine, et les instructions directement utiles au pilotage de cette dernière (contrôle des chaînes de production, de la logistique...). Sous l'influence des courants circulant entre le premier et le second jeu d'électrodes, des « structures filaires » (*threads*) métalliques se formaient progressivement dans la solution, modifiant en retour ses propriétés conductives<sup>72</sup>. À tout moment, l'état de la « connexion » électrique entre les variables d'« entrée » et de « sortie » du contrôleur, entre le premier et le second jeu d'électrodes, dépendait ainsi de la configuration des structures filaires : la structuration de la solution permettait donc d'adapter dynamiquement le couplage entre les électrodes, c'est-à-dire la qualité même du comportement du contrôleur. En l'absence de courant, les structures filaires finissaient par se dissoudre, laissant le champ libre au développement de nouvelles structures, de nouveaux comportements. De manière similaire à l'homéostat, les capacités adaptatives du contrôleur étaient donc ici implémentées sous la forme d'un processus d'auto-organisation, capable d'un ajustement permanent aux fluctuations de l'« environnement » du contrôleur (le « système » de l'usine). Cependant, le dispositif imaginé par Gordon Pask répondait à une compréhension plus « ouverte » de la notion d'adaptation que celle mise en œuvre dans l'homéostat, dans un sens que nous allons discuter à présent.

Pour expliciter ce point, il est utile de revenir sur les bases *analogiques* du dispositif électrochimique conçu par Gordon Pask. Comme nous l'avons déjà souligné, l'organisation du système de l'usine se trouvait reproduite, de manière analogique, dans les relations entre les deux ensembles d'électrodes baignant dans la solution ferreuse. Par analogie, toute structuration de cette solution, aboutissant à la stabilisation des relations physico-chimiques induites par les électrodes, devait alors nécessairement stabiliser l'organisation du système productif « réel » (le système de l'usine). En un sens, les capacités de *maintenance* du dispositif imaginé par Gordon Pask se basaient sur l'idée d'une « diffusion » d'un processus auto-organisateur « local », observé au niveau du contrôleur, vers le système « extérieur » de l'usine : le « médium riche en possibilités structurelles<sup>73</sup> » du contrôleur (la solution ferreuse) permettait ainsi d'amorcer un comportement auto-organisateur (la formation des structures filaires) destiné à s'étendre, dans son action stabilisatrice, à l'ensemble de l'usine. En d'autres termes, l'opération structurante du processus auto-organisateur de-

72. *Ibid.*, p. 481.

73. Peter A. Cariani, « To Evolve an Ear: Epistemological Implications of Gordon Pask's Electrochemical Devices », *Systems Research*, vol. 10, n° 3, 1993, p. 3. Notre traduction.

vait se propager *du contrôleur à son environnement* — une idée importante que nous rencontrerons, à nouveau, dans la section 11.5.

Ce point, essentiel, explique l'intérêt de Gordon Pask pour le développement de contrôleurs basés sur des formes *matérielles* d'auto-organisation, mobilisant des processus physico-chimiques. En effet, en vertu de la tendance de tout système physico-chimique à évoluer spontanément vers un état de *stabilité*, l'emploi de tels processus auto-organisateur devait nécessairement structurer le contrôleur dans le sens d'une stabilisation de ses relations constitutives<sup>74</sup>, et provoquer, par conséquent, la stabilisation du système « réel » couplé au contrôleur. En d'autres termes, contrairement au mécanisme artificiel de l'homéostat, basé sur une série de possibilités préconfigurées par Ashby, le processus « naturellement » auto-organisateur du dispositif électrochimique de Gordon Pask devait lui permettre de *développer* lui-même ses propres stratégies adaptatives, dont la viabilité aurait alors été spontanément garantie.

Cette propriété du processus électrochimique d'auto-organisation répondait à l'un des principaux objectifs que s'était fixé Gordon Pask : concevoir un dispositif capable de « développer ses propres critères de pertinence et de mettre en œuvre toute forme de relation à l'égard de son environnement<sup>75</sup> ». Par sa nature matérielle, le processus de formation de structures métalliques possédait en effet suffisamment de « degrés de liberté » pour « choisir, indépendamment du concepteur, les aspects de l'environnement extérieur auxquels il réagirait<sup>76</sup> ». En d'autres termes, si l'organisation du dispositif électrochimique était décidée *a priori* par Gordon Pask, lequel sélectionnait la composition chimique de la solution, ainsi que les « variables » qui, par l'intermédiaire d'électrodes, y seraient mises en relation, le processus d'auto-organisation de la solution pouvait conduire le dispositif à « choisir », de manière *autonome*, les relations qui s'y trouveraient effectivement réalisées sous une forme matérielle, à travers la croissance de structures filaires. Dans un texte publié en 2001, Stafford Beer décrit ainsi une expérience réalisée avec Gordon Pask autour de 1956, dans laquelle la structure filaire du dispositif électrochimique se serait montrée capable d'« apprendre » à réagir à une stimulation électrique provenant d'un

---

74. L'organisation de la solution est ici comprise dans le sens strict de l'ensemble des relations électrochimiques valides en son sein (exprimables, notamment, sous la forme d'équations chimiques et thermodynamiques), tandis que sa structure concerne les quantités molaires des réactifs réellement observées dans le système, ainsi que les valeurs des tensions mesurées aux électrodes. Le processus de formation des structures filaires métalliques peut donc bien être qualifié d'opération stabilisatrice d'un ensemble de relations électrochimiques, au sens où ces structures correspondent à la réalisation d'une configuration matérielle *stable* de ces relations.

75. Gordon Pask, « The Natural History of Networks », *op. cit.*, p. 252. Notre traduction.

76. Peter A. Cariani, « To Evolve an Ear: Epistemological Implications of Gordon Pask's Electrochemical Devices », *op. cit.*, p. 2. Notre traduction.

microphone<sup>77</sup>, en développant une formation analogue à une « oreille » (selon les termes de Gordon Pask).

Dans un tel contexte, le processus de conception, c'est-à-dire d'*organisation* du dispositif, prend ainsi le sens d'une disposition de potentialités, dont seules certaines trouveront ensuite à s'actualiser matériellement par l'intermédiaire d'une production de structures *non anticipées* par le concepteur, tant dans les détails de leur forme que dans leurs fonctions. En d'autres termes, le dispositif électrochimique de Pask annonce une vision émergente de la production, caractérisée par l'exercice « collaboratif » de l'agentivité du concepteur aux côtés de l'agentivité matérielle autonome du dispositif — une vision au demeurant très proche de celle que nous développons nous-mêmes dans la section 6.3, et qui anticipe bien entendu le développement futur de la notion de *conversation* dans la pensée de Gordon Pask<sup>78</sup>.

Fondamentalement, le dispositif électrochimique de Gordon Pask se caractérisait ainsi par une approche plus « ouverte » de la notion d'adaptation que l'homéostat de W. Ross Ashby. En se montrant capable de sélectionner les « canaux » réalisant matériellement ses capacités adaptatives, ce dispositif pouvait faire évoluer ses fonctionnalités en fonction des transformations, imprévisibles, de l'environnement avec lequel il se trouvait en contact. Par contraste, l'homéostat cherchait à réaliser un objectif fixe, défini *a priori* par W. Ross Ashby : l'alignement de sa tension de sortie sur une valeur de consigne. En d'autres termes, si les capacités adaptatives de l'homéostat se montraient tournées vers la maintenance de ses relations avec un environnement en évolution émergente, cette adaptation se réalisait matériellement dans la poursuite d'un fonctionnement *stationnaire*, lissant les fluctuations environnementales (d'où la référence au concept d'homéostasie). À l'inverse, le dispositif électrochimique de Pask était précisément construit autour de la possibilité de voir « dériver » ses fonctions et ses objectifs au contact de son environnement — ce en quoi ce dispositif relevait pleinement, là encore, d'une orientation conversationnelle. La notion de conversation, telle qu'elle sera développée plus tard par Gordon Pask, suppose en effet une *évolution mutuellement émergente* du dispositif adaptatif et de son environnement, considérant l'environnement non comme un élément à « maîtriser », mais comme un agent susceptible d'entraîner le dispositif dans une trajectoire évolutive nouvelle, émergente et pleinement acceptée comme telle.

Ainsi, si l'homéostat et le dispositif électrochimique de Gordon Pask incarnent tous deux, au sens strict, l'idée d'une *auto-maintenance* (dans le sens où ils opèrent la stabilisation de leurs relations de production constitutives

77. Stafford Beer, « A Filigree Friendship », *Kybernetes*, vol. 30, n° 5–6, 2001, p. 553–555.

78. Rappelons que la notion de conversation n'a été formalisée par Gordon Pask, au sens strict, que dans les années 70.

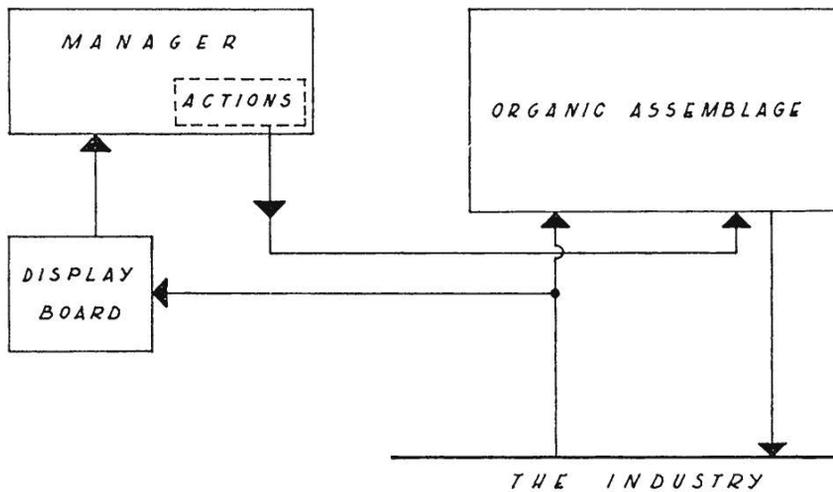


Fig. 11.15 — Schéma du processus d'interaction entre le manager de l'usine et le contrôleur électrochimique, représenté par l'élément « organic assemblage » (source : Andrew Pickering, « Beyond design: cybernetics, biological computers and hylozoism », *Synthese*, vol. 168, n° 3, 2009, p. 484).

par l'intermédiaire d'une forme d'« auto-structuration »), le second de ces dispositifs nous semble constituer une référence plus adaptée au contexte d'une production participative — autrement dit, à une situation où les interactions adaptatives entre le dispositif et son « environnement » (le public) ne sauraient être envisagées sous l'angle d'une régulation « normative » et directionnelle (telle qu'elle se réalise dans l'homéostat), mais plutôt dans la perspective d'une évolution mutuellement émergente, relevant de l'idée paskienne de conversation.

Le dispositif électrochimique imaginé par Gordon Pask prévoyait, de fait, la possibilité d'être couplé à un « environnement » incluant des acteurs humains, dans un scénario de fonctionnement qui l'aurait alors rapproché explicitement de notre idée d'une production participative. Plus précisément, il était envisagé que le « manager<sup>79</sup> » de l'usine à laquelle devait être couplé le dispositif puisse interagir directement avec le processus d'auto-organisation de ce dernier, afin d'orienter ce processus vers une structuration à même de présenter les qualités adaptées au « contrôle » de usine (figure 11.15). Concrètement, le manager pouvait activer sélectivement certaines des électrodes baignant dans la solution, afin de stimuler la formation de structures renforçant « certaines

79. Gordon Pask, « Organic Control and the Cybernetic Method », *Cybernetica*, vol. 1, n° 3, 1958, p. 169. Cité dans Andrew Pickering, « Beyond design: cybernetics, biological computers and hylozoism », *op. cit.*, p. 484.

tendances positives dans l'évolution de la machine<sup>80</sup> ». Bien évidemment, ce scénario ne saurait être compris comme une tentative d'imposer au dispositif, de manière unidirectionnelle, un comportement spécifié à l'avance : dans une logique proprement conversationnelle, Pask envisageait l'interaction du manager avec le dispositif comme un processus émergent, « à la fois compétitif et collaboratif », produisant, après un temps, « un schéma de comportement que le manager pourrait accepter comme un compromis, même si ce schéma n'aurait pas nécessairement reçu son approbation de prime abord<sup>81</sup> ». Lorsque ce compromis<sup>82</sup> était atteint, le manager pouvait alors se retirer du « circuit » et laisser le dispositif contrôler l'usine de manière autonome. Cette dernière phase où le dispositif devait fonctionner en autonomie s'avère pour nous moins intéressante que son « entraînement » préliminaire par un utilisateur humain : de manière essentielle, cet entraînement correspond en effet à une *implication directe de l'utilisateur au sein des opérations de maintenance* du dispositif, une notion que nous développerons dans la section 11.5.

### 11.3 Deux objectifs pratiques

Ces discussions font émerger deux modalités spécifiques de réalisation de l'approche conversationnelle imaginée par Pask, traçant deux directions distinctes pour le programme d'une implémentation d'une forme d'auto-maintenance dans le contexte d'une production participative. La première de ces directions est l'approche numérique suivie, notamment, par le Architecture Machine Group, sous l'influence des réflexions publiées par Gordon Pask à la fin des années 60. La seconde de ces directions est l'approche analogique suivie par la cybernétique, et incarnée plus spécifiquement par les expériences réalisées par Gordon Pask à la fin des années 50, exploitant des processus d'auto-organisation matérielle. Nous allons à présent, au cours des deux prochains chapitres, évaluer chacune de ces approches dans une perspective pratique. Dans ce contexte, pour que le « contrôle » exercé par le dispositif d'une œuvre praticable sur le public puisse bien être compris dans le sens paskien d'une *conversation*, il nous semble essentiel de poursuivre deux objectifs.

Le premier objectif concerne, avant tout, la possibilité de laisser s'établir une interaction *mutuellement émergente* entre public et dispositif, garantissant

---

80. Andrew Pickering, « Beyond Design: Cybernetics, Biological Computers and Hylzoism », *op. cit.*, p. 484. Notre traduction.

81. Gordon Pask, « Organic Control and the Cybernetic Method », *op. cit.*, p. 169. Notre traduction.

82. Nous devons nous garder ici de voir dans ce terme une connotation péjorative : pour Gordon Pask, il était bien entendu possible, et même probable, que les comportements ainsi implémentés de manière semi-autonome par la solution se révèlent supérieurs, par leurs performances, à des procédures explicitement spécifiées par le manager.

la régénération continue d'une condition de métastabilité, d'une dynamique de tension et d'indétermination interne à l'œuvre. Cet objectif ne saurait se résumer dans la conception de dispositifs « simplement » adaptatifs, mais suppose de pouvoir concevoir des processus de maintenance « ouverts » à la prise en compte de comportements « environnementaux » (liés au public) non anticipés *a priori*. Ce critère s'inscrit pleinement dans la perspective de l'approche conversationnelle de Gordon Pask, comme nous l'avons souligné dans nos discussions précédentes.

Le second objectif vise à concevoir des dispositifs offrant des « prises » au développement, au sein du public, d'un point de vue réflexif sur les procédures de maintenance qu'ils réalisent. Ce critère marque une exigence supplémentaire par rapport aux idées développées par Gordon Pask à la fin des années 60 (notamment dans l'article *The Architectural Relevance of Cybernetics*), et traduit, par certains aspects, une évolution de notre positionnement à l'égard de la technologie. Notre recul par rapport à la dimension *culturellement construite* des dispositifs techniques nous impose en effet de considérer l'idée d'une « conversation » entre des humains et des machines « intelligentes » avec plus de précautions qu'elle n'était sans doute abordée alors — et tout particulièrement lorsque de telles machines se présentent, comme dans les travaux du Architecture Machine Group, comme *véritablement* intelligentes, c'est-à-dire capable de s'adapter *sans biais* au comportement de leurs utilisateurs. Contre l'idée neutralisatrice d'une technologie « intelligente », il nous paraît important d'exiger que toute forme d'interaction avec nos dispositifs puisse être interrogée, de manière réflexive, par le public qui y participe.

Ces deux objectifs étant précisés, nous pouvons commencer notre discussion par une *critique* de la direction empruntée par le Architecture Machine Group, et plus précisément, par une critique de son approche *généraliste* de l'IA : par ce moyen, nous nous proposons d'inscrire dans une perspective historique le spectaculaire regain d'intérêt récemment observé pour la notion d'intelligence artificielle, susceptible d'applications directes dans le contexte d'une production participative — afin d'en réévaluer la crédibilité au-delà de tout effet d'annonce. Nous montrerons en particulier que les systèmes « intelligents » contemporains, s'ils réactivent la vision culturelle d'une IA générale, émergent cependant de l'échec historique du courant symbolique lié à cette idée, et sont à ce titre fondamentalement éloignés d'une approche généraliste de l'intelligence.

#### 11.4 Vers des dispositifs numériques « intelligents » ?

Comme nous l'avons souligné dans la section 11.1, l'approche du Architecture Machine Group s'inscrit résolument dans une compréhension généraliste de l'intelligence artificielle : la perspective d'une implémentation numérique

du paradigme conversationnel paskien, telle qu'elle est suggérée dans des scénarios comme URBAN5 ou HUNCH, s'avère liée à la possibilité de parvenir à doter les « machines architecturales » d'une IA générale, douée de facultés cognitives égalant ou surpassant celles de leurs interlocuteurs humains.

Or, ce leitmotiv du paradigme symbolique devait rapidement se heurter à d'importantes difficultés. À partir de 1973, la nature optimiste des prédictions réalisées par les tenants de l'IA symbolique commence à apparaître de manière évidente : alors que les résultats spectaculaires annoncés depuis la fin des années 50 tardent à se réaliser, un certain nombre de critiques s'élèvent pour dénoncer l'incapacité des chercheurs à atteindre leurs objectifs, et condamnent le projet même du développement d'une IA générale, jugé irréaliste et voué à l'échec. Parmi ces critiques, on peut notamment citer le célèbre rapport réalisé en 1973 par James Lighthill à la demande du Science Research Council, l'un des principaux organismes de financement britanniques pour la recherche universitaire<sup>83</sup>. Porteur d'un regard extrêmement critique sur les résultats atteints par la recherche britannique en intelligence artificielle, ce rapport entraîne une suppression des subventions pour la recherche en IA dans la plupart des universités<sup>84</sup>. Des critiques similaires s'élèvent également aux États-Unis<sup>85</sup>, et la recherche américaine en IA subit elle aussi d'importantes coupes budgétaires — aggravées par le vote du Mansfield Amendment au Congrès en 1969, appelant à une concentration des investissements du Department of Defense (DoD<sup>86</sup>) sur des projets de recherche possédant « un lien direct et apparent avec une fonction ou une opération militaire spécifique<sup>87</sup> ». Quelles qu'en soient les causes, les effets produits par ces coupes budgétaires s'avèrent identiques : au cours des années 70, de nombreuses équipes de recherche en IA choisissent de se concentrer sur des sujets plus applicatifs<sup>88</sup>, davantage susceptibles d'attirer des financements dans le nouveau climat « IA-sceptique » de l'époque<sup>89</sup>. La vision

---

83. James Lighthill, « Artificial Intelligence: A General Survey », *Artificial Intelligence: A Paper Symposium*, 1973.

84. Stuart J. Russell et Peter Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, *op. cit.*, p. 22.

85. On peut notamment mentionner ici le livre d'Hubert Dreyfus, *What Computers Can't Do* : Hubert L. Dreyfus, *What Computers Can't Do: A Critique of Artificial Reason*, *op. cit.*

86. Via son agence ARPA, le DoD constituait jusqu'à la fin des années 60 l'une des principales sources de financement de la recherche fondamentale en IA. Il soutenait ainsi, par exemple, le projet MAC du MIT.

87. Nils J. Nilsson, *The Quest for Artificial Intelligence*, Cambridge, Cambridge University Press, 2009, p. 203, extrait du texte de l'amendement. Notre traduction.

88. *Ibid.*, p. 207.

89. Financé en partie par l'ARPA, le Architecture Machine Group est lui aussi contraint de faire évoluer ses activités. En 1975, dans la préface du livre *Soft Architecture Machines*, Nicholas Negroponte note ainsi : « [c]onsidérer l'architecture assistée par ordinateur comme un problème d'intelligence artificielle nous place dans une position inconfortable. Même si

généraliste et théorique de la « GOFAI » se trouve progressivement remplacée par des recherches centrées sur la résolution de problèmes concrets, comme la reconnaissance de la parole<sup>90</sup>. Ces nouvelles préoccupations vont conduire au développement de modèles d'IA alternatifs par rapport aux modèles symboliques, remettant en cause l'hégémonie de ces derniers. En particulier, les problématiques de reconnaissance de la parole conduisent les chercheurs en IA à se tourner vers des modèles *statistiques*, comme les modèles de Markov cachés (*hidden Markov models*, ou HMM), utilisés pour la première fois dans le système DRAGON développé par James Baker en 1975<sup>91</sup>.

Les modèles statistiques, comme les HMMs, présentent d'importantes différences conceptuelles par rapport aux modèles symboliques. Ces différences s'observent notamment sur le traitement réservé au processus d'apprentissage, c'est-à-dire d'adaptation, dans chacune de ces classes de modèles. L'apprentissage, pour une IA générale, prend la forme d'un processus de *développement* analogue à celui d'une intelligence humaine : l'IA peut étendre ou affiner dynamiquement ses connaissances ou ses aptitudes, par exemple en dialoguant avec un instructeur humain. Le point important à noter est qu'une telle IA doit être dotée *dès l'origine* de facultés cognitives générales : telle est en effet la condition à laquelle elle pourra échanger avec son instructeur et apprendre de cet échange. Le programme SHRDLU, mentionné précédemment, embarquait ainsi un modèle grammatical complet de l'anglais ainsi qu'un dictionnaire, afin de réaliser une analyse des instructions saisies en langage naturel par l'utilisateur. Confronté à un mot inconnu, le logiciel identifiait alors sa fonction grammaticale et sollicitait l'utilisateur afin d'en obtenir la signification.

Par contraste, dans les modèles statistiques, l'apprentissage (fréquemment qualifié d'« entraînement ») revêt une dimension plus *constructive* : le modèle, souvent initialisé de manière aléatoire, est progressivement calibré à la tâche à accomplir par son concepteur, qui lui fournit des exemples de données représentatives de cette tâche. DRAGON était ainsi entraîné à partir d'une séquence

---

je crois sincèrement à la pertinence de cette idée, les paradoxes et les difficultés rencontrées par le chercheur sont telles que cette position s'avère réellement contre-productive » (Nicholas Negroponte (dir.), *Soft Architecture Machines*, Préface, Cambridge, MIT Press, 1975, p. x, notre traduction). En conséquence, Negroponte opère alors un réajustement du programme du Architecture Machine Group : il ne s'agira désormais plus de chercher à développer une « véritable » intelligence artificielle, c'est-à-dire de répliquer l'intelligence humaine, mais de concevoir des formes plus spécialisées d'intelligence (Nicholas Negroponte, « Computer-Aided Participatory Design », dans *Soft Architecture Machines*, Cambridge, MIT Press, 1975, p. 108). Ces recherches prendront notamment forme dans le projet HUNCH, au sein duquel la notion de « partenaire de conception » (*design partner*) cède la place à celle d'« amplificateur de conception » (*design amplifier*).

90. Nils J. Nilsson, *The Quest for Artificial Intelligence*, op. cit., p. 209.

91. James K. Baker, « The DRAGON System — An Overview », *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 23, n° 1, 1975, p. 24–29.

de phrases de tests, « étiquetées à la main<sup>92</sup> », de sorte qu'en phase d'apprentissage, le modèle dispose de la référence des mots à reconnaître dans chacune des phrases écoutées (on parle dans ce cas d'« apprentissage supervisé »). On constate ici qu'à aucun moment, le processus d'apprentissage ne présuppose l'exercice de réelles capacités cognitives : les modèles statistiques ne prétendent donc pas posséder une capacité générale d'adaptation, mais visent à acquérir, par entraînement, des comportements *spécialisés*, destinés à s'exercer dans des cadres applicatifs précis. Il va sans dire, par ailleurs, que l'entraînement de tels modèles s'avère unidirectionnel, et ne s'inscrit aucunement dans le schéma dialogique envisagé pour l'apprentissage d'une IA symbolique.

Ces compréhensions distinctes de la notion d'apprentissage manifestent une différence épistémologique fondamentale entre les modèles symboliques et statistiques. Les modèles symboliques visent en effet, dans l'idéal, à implémenter les *mêmes* processus computationnels que ceux qui, selon l'hypothèse du système de symboles physiques, président à l'activité cognitive humaine. Par contraste, les modèles statistiques adoptent un point de vue plus pragmatique : pour les chercheurs qui les manipulent, il ne s'agit en aucun cas de chercher à accéder à la réalité des processus cognitifs, mais de *construire* des systèmes visant à accomplir avec le plus de précision possible une tâche donnée. À aucun moment, les chercheurs ne prétendent que la structure de leurs modèles n'est réellement impliquée dans la cognition humaine : cette structure est conçue de manière spécifique par rapport au problème à résoudre, et peut être librement ajustée afin d'augmenter les performances du modèle. Les modèles statistiques correspondent donc à des IA « spécialisées », et il serait en ce sens préférable de parler plutôt à leur sujet de modèles d'« apprentissage automatique » (*machine learning*) ou encore de « reconnaissance de motifs » (*pattern recognition*), plutôt que de modèles d'intelligence artificielle.

À partir du milieu des années 70, le tournant applicatif opéré par la recherche en IA provoque ainsi une évolution du statut épistémologique accordé à la notion de modèle dans cette discipline. À l'orientation *réaliste* des modèles symboliques, idéalement pensés comme la reproduction même des mécanismes — supposés computationnels — de la cognition, se substitue, dans les modèles statistiques, une dimension purement *opératoire*, relevant d'une compréhension de la notion de modèle que Giuseppe Longo et Nabil Zakhama qualifient de « non thétique », au sens d'« absence de thèse ou d'assomptions particulières sur la réalité et sa nature<sup>93</sup> ». Ce tournant opératoire, amplifié

92. *Ibid.*, p. 28. Notre traduction.

93. Giuseppe Longo et Nabil Zakhama, « Le modèle comme regard organisateur du réel », dans Marie-Ange Brayer et Frédéric Migayrou (dir.), *Naturaliser l'architecture : Archilab 2013*, catalogue d'exposition (Orléans, Les Turbulences – Frac Centre, 14 septembre 2013 – 30 mars 2014), Orléans, HXX, 2014, p. 162.

dans les années 80 avec le boom de l'industrie des « systèmes experts<sup>94</sup> », se prolonge ensuite, des années 90 jusqu'à nos jours, par le développement d'un grand nombre de classes de modèles (statistiques, neuronaux, multi-agents...), abandonnant la plupart du temps tout critère de simulation des processus cognitifs humains. Ainsi, même les récents modèles de « réseaux de neurones profonds » (*deep neural networks*), largement responsables du spectaculaire regain d'intérêt, médiatique et financier<sup>95</sup>, dont a fait preuve ces dernières années le champ de l'intelligence artificielle, constituent fondamentalement des modèles d'*apprentissage statistique* : entièrement tournés vers la recherche d'une efficacité maximale dans un domaine d'application spécialisé (reconnaissance d'image, de parole...), ces modèles ne cherchent en aucun cas à développer des capacités cognitives d'ordre général, quoi qu'ils s'avèrent capables d'égaliser, voire de surpasser largement l'humain dans le cadre strict des tâches pour lesquelles ils ont été conçus<sup>96</sup>.

Ces remarques soulignent la nature éminemment spécialisée, *construite*, de l'essentiel des modèles d'intelligence artificielle en usage aujourd'hui. Si l'intelligence désigne l'« [e]nsemble des fonctions psychiques et psychophysiologiques concourant à la connaissance, à la compréhension de la nature des choses et de la signification des faits<sup>97</sup> », l'expression même d'« intelligence artificielle » semble bel et bien usurpée pour qualifier les propriétés de ces modèles qui relèvent essentiellement, comme nous l'avons souligné, de systèmes de *reconnaissance* — et non de « compréhension » — de motifs. Notre analyse nous conduit donc à considérer avec précaution les résurgences de la notion d'« intelligence » dans le discours technologique contemporain<sup>98</sup>, et tout particulièrement lorsque le recours à cette notion est justifié par l'emploi de mo-

---

94. Stuart J. Russell et Peter Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, op. cit., p. 24.

95. Un article du New York Times, publié en 2016, note que le marché pour les produits d'IA, estimé à 8 milliards de dollars en 2016, pourrait atteindre 47 milliards en 2020 (Steve Lohr, « IBM Is Counting on Its Bet on Watson, and Paying Big Money for It », *The New York Times*, 17 octobre 2016, en ligne : <https://www.nytimes.com/2016/10/17/technology/ibm-is-counting-on-its-bet-on-watson-and-paying-big-money-for-it.html>, consulté le 24 mars 2017).

96. Comme l'a montré en 2016 le programme AlphaGo, développé par l'entreprise DeepMind, en remportant à quatre parties contre une le match organisé contre le coréen Lee Sedol, considéré comme l'un des meilleurs joueurs mondiaux (Demis Hassabis, « What We Learned in Seoul with Alphago », 16 mars 2016, en ligne : <https://blog.google/topics/machine-learning/what-we-learned-in-seoul-with-alphago>, consulté le 22 avril 2017).

97. [Anon.], « Intelligence », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/intelligence> (consulté le 28 mars 2017).

98. Comme le montre la popularité récente de notions telles que « smart home », « smart city »... Sur le sujet des « villes intelligentes », voir notamment : Antoine Picon, *Smart Cities: A Spatialised Intelligence*, Hoboken, John Wiley & Sons, 2015.

dèles informatiques abusivement qualifiés, à notre sens, d'« intelligents ». En effet, dans un domaine autant en proie aux spéculations et effets d'annonce que l'intelligence artificielle, le recours à une notion d'« intelligence » cache le plus souvent une volonté rhétorique : l'idée même d'un algorithme « intelligent » produit un effet d'objectivation qui tend à masquer la dimension *culturellement construite* des modèles d'« IA », laissant dès lors de côté la question des choix et des biais (sans parler d'éventuelles erreurs) nécessairement encodés dans ces modèles par leurs concepteurs, lors des phases de développement ou d'apprentissage<sup>99</sup>. Or, la question du biais algorithmique constitue aujourd'hui un enjeu social et politique majeur, comme l'ont notamment montré les récents débats sur la question d'une possible influence des algorithmes de génération du « flux d'actualités » de Facebook dans l'issue des élections présidentielles américaines de 2016<sup>100</sup>. La remise en cause de l'objectivité supposée des systèmes « intelligents » s'avère dès lors centrale, dans nos sociétés où une part toujours plus grande de dispositifs dérivent leurs capacités opératoires de moyens algorithmiques.

Le contexte « artistique » des œuvres praticables (par lequel nous avons abordé la question d'une production participative) pose sans doute avec moins d'acuité cette question du biais algorithmique que d'autres secteurs de la société, comme les domaines politique ou financier. Cependant, il nous semble tout aussi important d'y cultiver une position réflexive à l'égard de l'utilisation d'algorithmes « intelligents » que dans ces autres secteurs<sup>101</sup>. De fait, si des

---

99. Dans la mesure où l'apprentissage des modèles statistiques s'opère la plupart du temps de manière supervisée, ou semi-supervisée, la constitution du corpus de données d'apprentissage constitue l'un des premiers facteurs susceptibles d'introduire un biais dans le fonctionnement du modèle.

100. Mike Isaac, « Facebook, in Cross Hairs After Election, Is Said to Question Its Influence », *The New York Times*, 12 novembre 2016, en ligne : <https://www.nytimes.com/2016/11/14/technology/facebook-is-said-to-question-its-influence-in-election.html> (consulté le 27 mars 2017).

101. D'autant que les champs de l'art et du design, à travers des travaux comme l'ouvrage *The Language of New Media*, de Lev Manovich (Lev Manovich, *The Language of New Media*, Cambridge, MIT Press, 2001), sont parmi les premiers à s'être interrogés sur la dimension culturelle de la computation. L'art et le design occupent aujourd'hui une importance centrale dans le champ des « software studies », auquel le MIT Press consacre depuis 2008 une série de publications (<https://mitpress.mit.edu/books/series/software-studies>, consulté le 30 mars 2017), et que Lev Manovich définit comme l'étude *générale* des « programmes » (*software*) en tant que constructions culturelles (Lev Manovich, *Software Takes Command*, New York, Bloomsbury, 2013, p. 10). Cet accent placé sur l'étude des logiciels en tant qu'objets culturels — et non simplement techniques — justifie, pour Matthew Fuller, l'importance de l'art et du design pour les recherches relevant des *software studies*, dans la mesure où « l'art et le design ont eu l'intuition, depuis un temps raisonnablement long, que les objets, appareils et autres entités matérielles possédaient une dimension politique — autrement dit, que ces objets s'engageaient dans des arrangements et compositions d'énergies, et pouvaient autoriser,

scénarios de production participative tels que nous les envisageons dans cette partie étaient conduits à se développer, non seulement dans le domaine de l'art, mais aussi dans ceux du design et de l'architecture, la question du biais algorithmique se poserait alors de manière sensible pour l'ensemble de ces champs — car ce serait notre environnement *physique* immédiat qui serait concerné par ses effets.

Ces remarques nous conduisent à porter un regard critique sur la direction pratique incarnée par l'exemple historique du Architecture Machine Group, dont les recherches envisageaient l'idée d'une production participative sous l'angle du développement d'une véritable « intelligence » algorithmique. À aucun moment, le Architecture Machine Group ne semble avoir considéré la possibilité d'un biais algorithmique intrinsèque à ses machines architecturales : l'adaptation de ces machines à l'utilisateur était comprise comme un processus entièrement auto-déterminé, permettant au système composé de ces deux entités, humaine et artificielle, d'évoluer sans biais vers un état « symbiotique ». Il s'avère à ce titre parlant que l'image retenue par Negroponte pour décrire ce processus soit celle d'une « cohabitation entre *deux* espèces intelligentes<sup>102</sup> » : à aucun moment, la « troisième » intelligence représentée par le concepteur du dispositif (toujours impliqué, consciemment ou non, dans la construction du biais algorithmique) n'apparaît dans cette union. Dans ses écrits, Negroponte semble de fait suggérer la possibilité d'une disparition complète de la figure du concepteur dans l'équation productive, une perspective reflétée par son adoption progressive d'une position « anti-architecte ». Dans le livre *Soft Architecture Machines*, publié en 1975 et faisant suite à l'ouvrage *The Architecture Machine* de 1970, Negroponte note ainsi :

« The reader will recognize in the following chapters an underlying theme that is anti-architect. This must not be confused with an anti-architecture bias. Each chapter removes the architect and his design function more and more from the design process; the limit of this pro-

---

encourager ou bloquer certains types d'actions » (Matthew Fuller (dir.), *Software Studies: A Lexicon*, Cambridge, MIT Press, 2008, p. 7, notre traduction). De manière plus fondamentale, le livre *The Software Arts* du théoricien, artiste et concepteur de logiciels Warren Sack défend l'idée selon laquelle l'informatique elle-même, dans ses « idées fondatrices et ses pratiques », serait issue d'une convergence entre les « arts libéraux » et les « arts mécaniques », autrement dit, en termes actuels, entre l'art, le design, les humanités et la technologie (Warren Sack, *The Software Arts*, Introduction, Cambridge, MIT Press, à paraître).

102. Nicholas Negroponte (dir.), *The Architecture Machine*, Introduction, *op. cit.*, p. 7. Notre traduction, nos italiques.

gression is giving the physical environment the ability to design itself, to be knowledgeable, and to have an autogenic existence<sup>103</sup>. »

Sous ses dessous humanistes, et quoique présentée comme un horizon spéculatif, cette idée s'avère à notre sens problématique dans sa souscription même à la possibilité d'une technologie « neutralisée ». Elle devient d'autant plus problématique si nous nous plaçons, comme certains projets du Architecture Machine Group<sup>104</sup>, dans la perspective *pratique* d'une conception de dispositifs destinés à s'engager réellement dans le monde, et condamnés, par conséquent, à se baser sur les opérations d'IAs *réelles* — c'est-à-dire imparfaites — et non idéalisées. Cette remarque s'applique précisément à l'utilisation des modèles contemporains d'apprentissage statistique, qui ne peuvent être considérés, comme nous l'avons vu, que comme des « IAs » spécialisées, nécessairement vouées à rester tributaires des choix, explicites ou implicites, opérés par leurs concepteurs. Le problème des dispositifs numériques dits « intelligents » réside ainsi, à notre sens, dans la contradiction entre l'image objective véhiculée par la notion d'« intelligence artificielle », et la réalité concrète d'artefacts culturellement construits qui caractérise ces dispositifs — une contradiction qui, malheureusement, se résout le plus souvent par une objectivation du comportement algorithmique de ces artefacts, plutôt que sur le développement d'un regard réflexif par rapport à leurs modes d'opération.

À l'heure d'une multiplication et d'une miniaturisation sans précédent des dispositifs de contrôle « intelligents », ce problème d'objectivation se double, de fait, de la possibilité d'une disparition pure et simple des indices matériels du fonctionnement algorithmique. Dans un texte publié en 2007, Usman Haque soulignait déjà les défis posés par la prolifération de dispositifs informatiques « ubiquitaires », dont le détail des processus opérationnels, et enfin la présence matérielle même, finissent par devenir si masqués que ces processus se soustraient entièrement à l'attention de leurs utilisateurs — finissant, par conséquent, par ne plus susciter aucune interrogation quant aux présupposés et décisions présidant à leur opération :

« Also known as the “disappearing computer” approach, [ubiquitous computing] aims to hide from us the complexities of technology, but in fact removes what little control we might have had over our environ-

---

103. Nicholas Negroponte (dir.), *Soft Architecture Machines*, Introduction, Cambridge, MIT Press, 1975, p. 1.

104. Voir à ce titre la critique du projet *INTERACT*, proposé par Molly Wright Steenson : Molly Wright Steenson, « Architectures of Information: Christopher Alexander, Cedric Price, and Nicholas Negroponte and MIT's Architecture Machine Group », thèse de doctorat, *op. cit.*, p. 208–212.

mental conditions and requires us to place all faith in the presumptions of the original system designers<sup>105</sup>. »

Dans ce passage, ciblant le champ de l'« informatique ubiquitaire » (*ubiquitous computing*), Haque se réfère en priorité à des applications liées à la domotique et aux « objets connectés ». Mais en réalité, un dispositif comme le haut-parleur « intelligent » Echo<sup>106</sup>, développé par Amazon et capable de contrôler des systèmes domotiques à travers une interaction vocale avec l'utilisateur, n'est sans doute plus si éloigné technologiquement du type de contrôleur que Pask pouvait imaginer pour ses « environnements réactifs », introduits dans son article de 1969 : on parle d'ailleurs « d'informatique conversationnelle » pour désigner des dispositifs qui, à l'instar d'Echo et son « intelligence artificielle » Alexa, exploitent le paradigme d'une interaction prenant la forme d'un dialogue avec leur utilisateur. Rappelant directement les notions utilisées par Gordon Pask, cette terminologie s'applique, de fait, à des objets dont la technologie « intelligente » s'inscrit en droite lignée des expérimentations réalisées par le Architecture Machine Group au début des années 70<sup>107</sup>. Néanmoins, contrairement aux projets du Architecture Machine Group, des dispositifs comme *Echo* n'ont rien de spéculatif, et s'ils annoncent l'avènement d'un paradigme « conversationnel » de l'informatique, c'est à l'aide de technologies d'apprentissage statistique qui, pour les raisons mentionnées précédemment, nous paraissent peu à même d'honorer l'idée originale de Gordon Pask d'une interaction *mutuellement émergente* entre humains et machines. Placé dans la perspective historique d'une cinquantaine d'années de développement des domaines de l'IA et de l'informatique, le projet d'une implémentation *numérique* du paradigme conversationnel paskien, conduisant Negroponte à annoncer la perspective d'un « [h]umanisme par des machines intelligentes<sup>108</sup> », nous paraît ainsi teinté d'un profond optimisme.

105. Usman Haque, « The Architectural Relevance of Gordon Pask », *op. cit.*, p. 60.

106. <https://www.amazon.com/Amazon-Echo-Bluetooth-Speaker-with-WiFi-Alexa/dp/B00X4WHP5E> (consulté le 25 octobre 2017).

107. Le MIT Media Lab, héritier direct du Architecture Machine Group, a d'ailleurs joué un rôle central dans la révolution médiatique contemporaine, caractérisée — comme nous l'avons déjà noté précédemment — par une « érosion des frontières entre la production et la consommation, la transmission et la réception, la manufacture et l'usage » (Samuel Bianchini et Erik Verhagen, « Practicable—Art in the Conditional », *op. cit.*, p. 1, notre traduction).

108. Nicholas Negroponte (dir.), *The Architecture Machine*, Introduction, *op. cit.*, p. 1. Notre traduction.

## 11.5 Maintenance et auto-organisation matérielle

Notre critique d'une d'implémentation numérique de l'approche conversationnelle nous conduit ainsi à nous pencher, de manière alternative, vers les expérimentations *analogiques* réalisées par Gordon Pask lui-même à la fin des années 50. En d'autres termes, nous faisons le pari, à l'heure d'un intérêt renouvelé pour le développement de systèmes informatiques « intelligents », de revenir à l'« intelligence matérielle » de processus analogiques — incarnée, notamment, dans la mise en œuvre de processus matériels d'auto-organisation. Comme nous le verrons dans la suite de cette section et dans la présentation ultérieure de notre projet *Manœuvres*, cette position ne relève en rien d'une attitude passéiste, ou contradictoire par rapport à l'orientation résolument numérique adoptée dans la plupart de nos projets précédents : la démarche que nous défendons ici rejoint en effet, comme souligné dans la section 10.1, des perspectives de recherches très prospectives dans le domaine des matériaux, comme celle liée à la question d'une « programmation matérielle », dans l'exploration desquelles l'usage de méthodes de conception numérique s'avère le plus souvent indispensable. C'est ainsi grâce au développement récent des moyens de simulation informatique et de prototypage, mobilisés dans une phase de *conception* de processus de maintenance (et non dans la *mise en œuvre* opératoire de ces processus), que la direction analogique dont nous faisons ici l'hypothèse nous paraît aujourd'hui pouvoir constituer une alternative crédible au contrôle numérique<sup>109</sup>.

---

109. En ce sens, l'idée même d'une distinction entre « numérique » et « analogique » n'est peut-être plus pertinente de manière générale : les matériaux « programmables », déployant des modes opératoires analogiques tout en étant conçus à l'aide des méthodes computationnelles les plus récentes, s'avèrent ainsi emblématiques d'une condition matérielle que certains critiques n'hésitent pas à qualifier de « post-numérique » (sur ce sujet, voir notamment : Ron T. Labaco (dir.), *Out of Hand: Materializing the Postdigital*, catalogue d'exposition (New York, Museum of Arts and Design, 16 octobre 2013 – 1er juin 2014), Londres, Black Dog Publishing, 2013). Il convient donc de préciser que notre emploi des termes « analogique » et « numérique » doit être compris, dans les dispositifs que nous considérons, en lien strict avec la question de la *mise en œuvre* des processus de maintenance, et ne saurait qualifier ces dispositifs dans leur « nature » d'ensemble — même si, pour des raisons de commodité d'écriture, nous pouvons être amenés à parler ici de « dispositifs analogiques » et de « dispositifs numériques ». Sur la question d'un dépassement de la séparation conceptuelle entre « numérique » et « analogique », mentionnons également l'ouvrage collectif récent *On Folding*, dans l'introduction duquel Michael Friedman et Wolfgang Schäffner argumentent en faveur d'une compréhension renouvelée du code numérique comme version « réduite » d'une opération fondamentale, le « pli » (Michael Friedman et Wolfgang Schäffner (dir.), *On Folding: Towards a New Field of Interdisciplinary Research*, Introduction, *op. cit.*). Structure spatiale, la figure du pli constitue un « support matériel pour les opérations symboliques » (*Ibid.*, p. 19, notre traduction), et trouve notamment à s'incarner dans les molécules « pliées » du monde biologique (comme l'ARN ou l'ADN), porteuses d'un « code » que l'on ne saurait réduire à une pure entité immatérielle — tant son

La première raison de notre intérêt pour les dispositifs adaptatifs analogiques réside tout d'abord dans leur *matérialité* intrinsèque. Il nous paraît en effet important d'affirmer cette qualité dans le contexte des œuvres praticables, confronté, lui aussi, à un phénomène d'invisibilisation des dispositifs de contrôle, suivant en cela l'approche de l'« informatique ubiquitaire » critiquée par Usman Haque. Le contraste que nous établissons ici entre la matérialité des approches analogiques, et la tendance à la « dématérialisation » des dispositifs numériques, pourrait cependant être interprété comme le signe d'une fascination nostalgique pour la matérialité d'artefacts technologiques passés<sup>110</sup>. Mais comme nous l'avons noté dans la section 11.2, ce contraste pouvait déjà être ressenti dans les années 50 et 60 : l'approche « désincarnée » de l'IA symbolique, postulant une indépendance des processus cognitifs (considérés comme computationnels) par rapport au médium capable de les « exécuter » (cerveau ou ordinateur), s'opposait alors à l'idée cybernétique d'un lien direct entre organisation et capacités adaptatives, supposant, par contraste, la construction de machines dotées de *structures matérielles* spécifiquement ajustées au problème à résoudre. Le contraste entre les points de vue cybernétique et symbolique, ou « computationnaliste », est souligné de manière exemplaire par Marvin Minsky, dans une interview accordée à Pamela McCorduck et publiée en 1979 dans l'ouvrage *Machines Who Think* :

« Most young people in this field had been strongly influenced by the writing of McCulloch and Pitts in the 1940s. It took me a long time to switch from trying to understand how the brain works to understanding what it does; in particular to try and make up theories of how any kind of thinking machine might work (...).

« Just as in computing, we now know enough not to worry about what the flipflops and resistors and wires do in the computer, but instead

---

opération s'avère dépendante, par exemple, des propriétés topologiques de son support. Tout en invitant à reconsidérer les dimensions matérielles régissant les opérations du code numérique, le concept de pli suggère ainsi, dans un même mouvement, à considérer la notion d'un « code » analogique, lié à la notion matérielle de *structure*. Cette approche nous paraît ouvrir de riches possibilités conceptuelles en lien avec la notion d'une matière « programmable ».

110. Comme nous l'observons dans différents secteurs de production culturelle, et tout particulièrement dans le champ musical : voir notamment Simon Reynolds, *Retromania: Pop Culture's Addiction to its Own Past*, Londres, Faber & Faber, 2011. Nous avons nous-même discuté de ces questions à l'occasion de deux interventions réalisées en 2013 et 2014 au Collège international de philosophie et au Centre parisien d'études critiques, dans le cadre des séminaires « *The Song Remains The Same?* : à l'écoute des musiques électriques » et « *Welcome to the machines* : musiques électriques / machines musicales », organisés par la revue *Oscillations* et le Collège international de philosophie.

we try to describe what the procedures should do, and get at what's essential to those procedures<sup>111</sup>. »

Cette citation, dans laquelle Minsky décrit sa propre transition du point de vue cybernétique au point de vue symbolique<sup>112</sup>, constitue un témoignage précieux pour notre propos : en défendant le point de vue abstrait des approches symboliques, l'auteur avance des arguments qui, appliqués au contexte des œuvres praticables, nous conduiraient plutôt à défendre l'approche matérielle favorisée par la cybernétique. Dans le contexte d'un dispositif artistique, en effet, les éléments matériels rejetés par Minsky (les « flipflops », « resistors » et « wires ») peuvent être considérés comme une *opportunité*, plutôt que les avatars d'une matérialité « encombrante » : à notre sens, de tels éléments matériels peuvent jouer un rôle central dans le développement d'une appréciation *matérielle* de l'action des dispositifs artistiques, en se donnant comme autant de « prises » permettant au public de développer un engagement physique direct avec les opérations de ces derniers. Ce point de vue nous incite alors, à rebours de la trajectoire historique prise par le champ de l'intelligence artificielle, à nous pencher à nouveau sur une approche analogique de la conception de dispositifs adaptatifs.

En vertu de notre objectif général visant à nous orienter vers une approche « conversationnelle » de l'adaptation, la remarque précédente nous conduit ainsi à nous tourner vers le contrôleur électrochimique développé par Gordon Pask à la fin des années 50. Pour Peter Cariani, ce dispositif possède en effet, par sa dimension matérielle, un avantage « pédagogique » par rapport aux

---

111. Pamela McCorduck, *Machines Who Think: A Personal Inquiry into the History and Prospects of Artificial Intelligence*, *op. cit.*, p. 101.

112. Au tout début de sa carrière, Marvin Minsky se consacrait en effet à une approche « neuronale » du problème de l'intelligence artificielle, directement liée aux expérimentations cybernétiques décrites dans la section 11.2. En 1950, Minsky, alors encore étudiant au MIT, construit ainsi avec Dean Edmonds une machine analogique nommée Snarc, permettant de simuler le comportement de quarante neurones artificiels (Stuart J. Russell et Peter Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, *op. cit.*, p. 16). Cette machine s'inspirait, à l'instar du perceptron développé plus tard par Frank Rosenblatt, du modèle de neurone artificiel introduit en 1943 par Warren S. McCulloch et Walter Pitts. En 1969, Marvin Minsky publie avec Seymour Papert le livre *Perceptrons*, proposant une étude mathématique du perceptron et démontrant certaines de ses limites (Marvin Minsky et Seymour Papert, *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*, Cambridge, MIT Press, 1969). Ce livre est fréquemment considéré comme le point de rupture définitive de Minsky avec la tradition cybernétique : sa publication semble en effet avoir joué un rôle réel dans le tarissement progressif des sources de financement du perceptron. Il n'est cependant pas clair que ses auteurs l'aient rédigé à cette fin, son propos relevant essentiellement de considérations mathématiques (Christopher M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, *op. cit.*, p. 193).

expérimentations numériques ultérieures de Gordon Pask, réalisées dans les années 70 :

« In contrast to his evolutionary simulations and his later highly formalized, abstract discussions of entailment meshes and consciousness, Pask's electrochemical assemblage has the distinct pedagogical advantage of concreteness: it grounds us in the realm of the sensuously apprehendable material world<sup>113</sup>. »

L'idée de pédagogie n'est pas exactement celle que nous retiendrons pour le contexte d'une production participative — et tout particulièrement pour le contexte des œuvres praticables que nous avons ici considéré en particulier. Mais cette idée possède le mérite, d'une part, de convoquer l'image de la possible rencontre d'un *public* avec le dispositif de Gordon Pask, et d'autre part de contraster nettement avec la rhétorique objectivante des dispositifs numériques « intelligents ». L'« avantage pédagogique » offert par des dispositifs analogiques comme celui de Gordon Pask traduit en effet leur capacité à s'offrir *directement* à l'appréhension du spectateur, en lui permettant de s'engager de manière sensible, par l'intermédiaire de « contacts » visuels et surtout tactiles, avec le mécanisme de leurs opérations. Par ces qualités, les dispositifs analogiques constituent donc une ressource intéressante à l'égard de notre objectif, annoncé dans la section 11.3, de concevoir des dispositifs offrant des « prises » au développement, au sein du public, d'un rapport réflexif aux opérations de maintenance qu'ils réalisent. Nous reviendrons sur ce point dans la suite de notre raisonnement, après avoir détaillé un autre avantage, fondamental, lié à la matérialité des dispositifs adaptatifs analogiques : leur capacité à s'inscrire dans une conception *mutuellement émergente* de l'interaction avec le public, par lesquelles ces dispositifs s'avèrent à notre sens davantage compatibles avec une approche *conversationnelle* que leurs homologues numériques.

Pour commencer cette discussion, il convient tout d'abord de qualifier, pour référence, les procédures numériques d'adaptation utilisées dans la plupart des œuvres praticables contemporaines. Dans ces œuvres, les mécanismes adaptatifs ne se trouvent pas usuellement au contact *direct* du public, mais supposent l'intervention de médiations techniques diverses, le plus souvent des périphériques de captation (caméras, dalles tactiles, capteurs de pression, capteurs de mouvements, capteurs biométriques...), pour « convertir » les actions des spectateurs en des quantités manipulables sous une forme computationnelle. En d'autres termes, ces capacités adaptatives ne se basent pas di-

---

113. Peter A. Cariani, « To Evolve an Ear: Epistemological Implications of Gordon Pask's Electrochemical Devices », *op. cit.*, p. 11.

rectement sur les *performances* du public, mais sur des *représentations* numériques de ces performances, construites, après captation, par l'intervention de modèles d'« intelligence artificielle<sup>114</sup> ». Nous retrouvons ici l'opposition entre performance et représentation, déjà notée à plusieurs reprises au cours de notre exposé : suivant un processus qu'Andrew Pickering qualifie de « détour représentationnel<sup>115</sup> », les dispositifs numériques s'éloignent de l'agentivité réelle du public, pour travailler avec des *modélisations* de cette agentivité. Une telle approche restreint alors nécessairement les capacités d'évolution du « système » de l'œuvre (dispositif et public) aux trajectoires accessibles à la modélisation réalisée.

Bien entendu, cette restriction n'opère pas de réelle coercition sur les spectateurs : le public de l'œuvre praticable reste évidemment libre d'agir comme bon lui semble, en accord ou non avec la logique du fonctionnement interne du dispositif mis à sa disposition. Néanmoins, la restriction des capacités d'évolution du système aux directions prévisibles par ses modèles donne typiquement naissance à des problèmes de *maintenance*, où d'ailleurs les deux compréhensions de cette notion, liée à notre notion d'auto-maintenance et à son acception pratique usuelle, se rejoignent. Plus précisément, on observe usuellement une déficience des œuvres praticables « numériques » à se maintenir d'elles-mêmes *en tant qu'œuvres actives* (dans un double sens esthétique et technique), lorsque le comportement du public dépasse, ou remet en cause, les situations d'interaction anticipées par les concepteurs de ces œuvres aux moments de la mise au point ou de l'entraînement de leurs modèles.

Ces situations de remise en cause, voire de « profanation » des dispositifs par le public, apparaissent comme autant d'états *métastables* dont nous souhaitons absolument préserver la possibilité dans notre pratique. Ces tensions se rapportent parfois à des questions, parfois à des « provocations », et dans tous les cas expriment une *attente de réponse* de la part du public. Pour que

---

114. Comme souligné dans la section précédente, le terme d'« intelligence artificielle » renvoie le plus souvent, dans ce cadre, à des modèles statistiques. Un exemple élémentaire, mais bien connu, est celui des algorithmes de détection de points d'intérêt (*blob detection*), que nous avons déjà introduits lors de la discussion de notre projet *Unspecified Clay*. Ces algorithmes sont typiquement utilisés pour détecter les positions spatiales des utilisateurs interagissant avec un dispositif. Notons, ici, que ces modèles ne font intervenir aucune étape d'apprentissage ; d'autres modèles statistiques, intégrant une étape d'apprentissage supervisée, sont couramment utilisés dans le contexte d'œuvres praticables : on peut citer, à ce titre, les travaux menés à l'Ircam sur l'utilisation des modèles de Markov cachés. Voir par exemple : Frédéric Bevilacqua, Bruno Zamborlin, Anthony Sypniewski, Norbert Schnell, Fabrice Guédy et Nicolas Rasamimanana, « Continuous Realtime Gesture Following and Recognition », dans Stefan Kopp et Ipke Wachsmuth (dir.), *Gesture in Embodied Communication and Human-Computer Interaction: 8th International Gesture Workshop*, Berlin – Heidelberg, Springer, 2010, p. 73–84.

115. Andrew Pickering, *The Cybernetic Brain: Sketches of Another Future*, *op. cit.*, p. 27. Notre traduction.

l'ensemble du système d'une œuvre praticable puisse se maintenir en activité dans une logique d'auto-maintenance, il s'agit donc que son dispositif puisse « répondre » au public, non seulement en résolvant, mais aussi en régénérant les tensions auxquelles il se trouve confronté : en d'autres termes, l'évolution du système doit prendre le chemin d'une résolution et d'une production continues d'une succession d'états métastables. Or, les dispositifs praticables numériques, conçus en présupposant un ensemble de comportements *détectables* par leurs modèles, fonctionnent « mal », voire « buggent » dans les situations de trop forte tension — autrement dit, lorsque le comportement du public s'avère « trop émergent<sup>116</sup> ». Ces œuvres perdent alors leur qualité d'œuvres *actives*, non pas dans le sens où elles sont conduites à « bugger<sup>117</sup> », mais dans le sens où le public *perçoit* que le dispositif a quitté son régime de fonctionnement « normal », prévu par le concepteur — ce qui annonce, dans la plupart des cas, la fin des tensions, car le dispositif n'oppose alors pour ainsi dire plus aucune résistance à sa remise en cause. Incapable de « répondre » au public, le dispositif ne peut prolonger la logique de *conversation* dont nous aimerions, pourtant, qu'elle soit à la base de ses interactions avec le public.

Il convient de souligner que par certains aspects, la situation décrite ci-dessus correspond à une approche des œuvres praticables que nous pourrions qualifier de « naïve » : de nombreuses œuvres se concentrent ainsi précisément sur les écarts et les tensions entre représentation numérique et réalité, et peuvent en ce sens pleinement tirer profit des dysfonctionnements induits

---

116. Cette incapacité de nombreux systèmes « intelligents », même avancés, à s'adapter à des situations non « traitables » par leurs modèles, s'est historiquement manifestée de manière saillante dans le champ de la robotique. Comme le souligne Warren Sack, les recherches en robotique inscrites dans la continuité du paradigme symbolique de l'IA se sont heurtées à de multiples difficultés, liées à l'instauration d'une stricte séparation — ou d'un *détour* — entre les principes moteurs internes du robot et son environnement : « [d]e manière peu surprenante, les robots intelligents conçus sur le principe d'une séparation stricte entre intérieur et extérieur pouvaient faire preuve de comportements extrêmement erratiques en cas d'imprécision, même minime, de leurs systèmes de captation du monde extérieur » (Warren Sack, « Network Aesthetics », *op. cit.*, p. 189, notre traduction). Dans les années 80, les limitations de tels systèmes conduiront notamment le roboticien Rodney Brooks — qui dirigera plus tard le Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory du MIT — à se tourner vers une approche « non représentationnelle » de la robotique, citant explicitement comme inspiration les tortues électroniques de W. Grey Walter. Sur ces questions, voir notamment : Rodney Brooks, « A Robust Layered Control System for a Mobile Robot », *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 2, n° 1, 1986, p. 14–23 et Rodney Brooks, « Intelligence Without Representation », *Artificial Intelligence*, vol. 47, n° 1–3, 1991, p. 139–159.

117. Sauf, bien entendu, lorsque ces « bugs » provoquent un plantage complet du système technique. Nous nous référons cependant ici en priorité à l'idée d'une apparition de « mauvais fonctionnements », clairement discernables comme tels sans pour autant mettre en danger le fonctionnement technique du dispositif — une idée que nous retrouvons peut-être, en anglais, dans certaines acceptions de la notion de *glitch*.

par un comportement non prévisible du réel, afin de mieux questionner leur propre tendance à l'abstraction technique. Ces « œuvres en lutte avec leurs conditions de représentation<sup>118</sup> », en rapport direct avec l'héritage de l'art conceptuel, adoptent ainsi, pour mieux les déjouer, les présupposés des processus contemporains de simulation et de modélisation numériques<sup>119</sup>. Cependant, l'approche conversationnelle envisagée dans cette dernière partie de notre thèse nous incite davantage à chercher à atteindre une forme de *réciprocité* dans la relation entre public et dispositif, plutôt qu'à instaurer, à dessein, une incomensurabilité entre le comportement du public et sa représentation sous forme numérique. Notre projet ne vise donc pas tant à questionner l'usage de ces représentations qu'à éviter autant que possible de recourir à ces dernières, pour privilégier un engagement *direct* du dispositif avec l'action du public. Cette remarque renforce ainsi notre choix de nous tourner, de manière alternative aux procédures de contrôle numérique, vers une approche analogique, directe, des interactions entre le dispositif et son environnement (c'est-à-dire, dans notre cas, entre le dispositif et son public).

Il est important de souligner que cet objectif d'éviter tout « détour » représentationnel, prolonge, sur le plan conceptuel, l'approche qui nous a conduits, à partir du chapitre 8, à dépasser la vision d'un processus productif séparé en deux étapes de conception et de fabrication, pour nous orienter vers l'idée d'une production maintenue, en « temps-réel » : de même qu'il s'agissait pour nous, alors, d'imaginer un processus de production ouvert à l'expression autonome de formes matérielles d'agentivité, non contraintes *a priori* par les représentations qu'en possédait le concepteur (correspondant aux concepts hylémorphiques abstraits de « forme » et de « matière »), nous souhaitons envisager ici toute situation de production participative comme une interaction émergente entre agents humains et matériels. Ainsi, en cohérence avec la logique qui nous avait alors incités à ne pas réduire l'agentivité de la « matière » et des instruments de production — computationnels et « mécaniques » — à leurs *représentations* en tant qu'entités passives, infiniment soumises à l'intention

---

118. Samuel Bianchini, « De l'agencement à l'agentivité : Opérer en contexte, opérer avec le contexte », dans Jean-Paul Fourmentraux (dir.), *Images interactives : Arts, Sciences et Cultures du visuel*, Bruxelles, La lettre Volée, 2016, p. 89-116.

119. On peut notamment citer ici l'œuvre *Discontrol Party* (2009-2011) de Samuel Bianchini (<http://dispotheque.org/fr/discontrol-party>, consulté le 22 avril 2017). Prenant à la fois la forme d'un dispositif de surveillance et d'une soirée de concerts, l'œuvre organise autant la surveillance des spectateurs qu'elle les incite à mettre en échec son fonctionnement en tant que dispositif de contrôle. En dansant, c'est-à-dire en se livrant à l'activité pour laquelle ils ont été conviés, les spectateurs mettent en effet à mal la plupart des modèles numériques utilisés par le dispositif, comme les algorithmes de *blob detection* mentionnés dans une note précédente. Il se joue alors un décalage entre l'espace réel de la fête et les représentations numériques inférées par le dispositif, projetées en grand format sur les murs de la salle de concerts.

auctoriale du concepteur, nous cherchons ici, à travers l'orientation *performative* des processus de maintenance analogiques, à ne pas « réduire » l'agentivité du public en lui substituant des modèles d'interaction prédéterminés<sup>120</sup>.

Notre discussion des dispositifs cybernétiques analogiques, réalisée dans la section 11.2, nous a de fait permis de souligner leur orientation performative, traduite par leur capacité à développer des comportements adaptatifs en l'absence de toute tentative de représentation de leur environnement. Le dispositif électrochimique de Gordon Pask, par exemple, ne cherchait pas à développer un modèle abstrait des évolutions suivies par son environnement (le système de l'usine), mais se trouvait concrètement impliqué dans cette évolution par l'auto-organisation d'un support matériel, adoptant une structure analogue à celle de l'usine. Ce dispositif évitait ainsi tout « détour représentationnel » pour s'engager, *directement*, avec les performances de son environnement — une propriété lui permettant de faire preuve d'une capacité de maintenance accrue par rapport aux approches numériques. Plus largement, les machines de Gordon Pask et de W. Ross Ashby démontrent que la mise en œuvre de mécanismes simples, basés sur l'idée d'un couplage analogique direct avec l'environnement, s'avérait suffisante pour doter ces dispositifs d'une propriété d'« ultrastabilité », comprise comme une capacité d'adaptation non soumise aux prédictions de leur concepteur quant aux « tendances » futures d'évolution environnementale, et par là ouverte à toute trajectoire émergente tracée par ces tendances. En d'autres termes, de tels dispositifs analogiques ne « buggaient » jamais, mais s'avéraient toujours capables de *s'adapter*, d'une manière ou d'une autre, aux interactions émergentes auxquelles les confrontait leur environnement. Cependant, si l'homéostat de W. Ross Ashby se montrait capable, lui aussi, de stabi-

---

120. Cette tension entre représentation et performance, mise en évidence à plusieurs reprises dans notre discussion, peut être rapportée aux préoccupations exprimées par un certain nombre d'expérimentations et de recherches récentes dans le champ du design. Dans un article publié en 2013, présentant les résultats d'une série d'ateliers réalisés à l'École nationale supérieure des Arts Décoratifs, Sara Franceschelli défend ainsi l'idée d'une exploration *performative* de l'image du paysage épigénétique de Conrad Hal Waddington, selon une logique contrastant avec sa mobilisation antérieure dans les écrits de concepteurs numériques (Sara Franceschelli, « Morphogenesis and Dynamical Systems: A View Instantiated by a Performative Design Approach », dans Michele Emmer (dir.), *Imagine Math 2: Between Culture and Mathematics*, Milan, Springer, 2013, p. 117–126). Contrairement à Greg Lynn, par exemple, pour qui la notion de paysage épigénétique fournissait (dans *Animate Form*) le cadre théorique d'une mise en œuvre de méthodes de conception numérique, fondées sur des processus de représentation et de simulation, Sara Franceschelli cherche ici à développer des dispositifs permettant un engagement direct avec les performances *réelles* de processus morphogénétiques : par la construction de modèles analogiques de l'image du paysage épigénétique, les propriétés de matériaux comme des ferrofluides ou des membranes textiles peuvent ainsi être mobilisées, selon une logique performative, dans le cadre d'une production de structures matérielles variables, évitant toute forme de représentation numérique.

liser en toutes circonstances ses relations productives, seul le dispositif imaginé par Gordon Pask développait cette capacité technique dans le cadre d'une vision *mutuellement émergente* des interactions avec son environnement — un critère que nous avons ici repris en tant qu'objectif pratique pour nos propres expérimentations, comme souligné dans la section 11.3. C'est en ce sens que nous souhaitons nous tourner en priorité dans nos travaux vers les méthodes expérimentées par Gordon Pask à la fin des années 50.

Après avoir examiné la perspective d'une interaction mutuellement émergente entre public et dispositif, il convient à présent, comme annoncé plus haut, de revenir au second objectif adopté dans la section 11.3 — en d'autres termes, d'examiner comment la mise en œuvre de dispositifs analogiques peut s'avérer susceptible d'offrir aux spectateurs des « prises » matérielles leur permettant de développer un point de vue réflexif sur les procédures de maintenance dans lesquelles ils se trouvent impliqués. En termes de références pratiques, ce second moment de notre argumentaire va, à nouveau, nous conduire à nous orienter en priorité vers la forme d'auto-organisation mise en œuvre dans le dispositif électrochimique de Gordon Pask, par rapport notamment à celle expérimentée par W. Ross Ashby avec son homéostat.

Nous pouvons en effet remarquer immédiatement que l'homéostat, par sa conception, n'offrait aucune « prise » concrète sur les opérations de maintenance qu'il devait réaliser : son mécanisme adaptatif n'était pas pensé pour impliquer directement un utilisateur humain. Les expériences présentées par W. Ross Ashby relevaient, de fait, d'une forme de simulation de situations d'adaptation environnementale « réelles », dans la mesure où l'homéostat n'était jamais couplé à un environnement doté d'une organisation arbitraire, mais à un assemblage composé de un à trois autres homéostats. Or, dans toutes ces situations, l'utilisateur devait intervenir en agissant sur les homéostats figurant l'« environnement », de sorte que son intervention ne s'effectuait jamais au contact direct du dispositif adaptatif de référence (le « cerveau »), mais passait par la *médiation* de machines (*externes* au processus adaptatif, car configurées, comme nous l'avons vu, dans leur mode d'opération manuel). Par ailleurs, les capacités d'adaptation de l'homéostat de référence, mises en œuvre sous une forme électronique, étaient dans tous les cas vouées à échapper à l'appréciation de son utilisateur : le processus d'« auto-organisation » électronique de l'homéostat ne se traduisait en aucune altération *sensible* de la structure matérielle de la machine, au-delà du mouvement de l'interrupteur rotatif utilisé dans le circuit électronique de cette dernière; et, en réalité, ce mouvement même s'avérait masqué par la construction *fermée* de l'homéostat. Le processus d'adaptation s'appréciait donc, dans ce cadre, par la seule évolution de la tension de sortie délivrée par la machine, affichée sur l'indicateur surmontant son boîtier.

Les deux remarques précédentes permettent ainsi d'envisager l'homéostat comme un exemple typique de « boîte noire » cybernétique, c'est-à-dire comme un dispositif connu seulement par son comportement « externe », et non par les détails de son mécanisme intérieur. Or, si la notion de boîte noire s'avère, par son orientation « comportementaliste », profondément liée à la vision performative de l'adaptation recherchée ici<sup>121</sup>, il nous semble cependant nécessaire, dans la perspective d'offrir au spectateur de véritables « prises » sur les opérations de maintenance dans lesquelles celui-ci se trouve impliqué, de nous orienter vers la conception de boîtes noires « ouvertes » — autrement dit, de dispositifs qui, tout en conservant leur dimension performative, rejettent la forme *littérale* de la boîte noire (adoptée par l'homéostat) pour *exposer* les opérations réalisées par leurs processus de maintenance à l'appréciation, et plus encore, à la *manipulation* du public.

À cet égard, les dispositifs basés sur un comportement auto-organisateur *matériel*, tels que la machine électrochimique développée par Gordon Pask autour de la fin des années 50, constituent pour nous des références plus directement mobilisables que l'homéostat de W. Ross Ashby. Contrairement à l'homéostat, le dispositif de Gordon Pask ne dérivait pas ses capacités adaptatives d'un assemblage « opaque » de composants électroniques, mais d'une mise en œuvre concrète de « composants » matériels (en l'occurrence, des structures filaires croissant dans une solution ferreuse), engagés dans un processus d'« auto-organisation » à l'échelle macroscopique. La différence est essentielle : si le mécanisme conçu par Ashby, du fait de son abstraction technique et de son opacité, peut évoquer certaines caractéristiques du contrôle numérique, un processus d'auto-organisation matérielle du type de celui expérimenté par Gordon Pask possède les propriétés d'être visible à l'œil nu, appréciable temporellement, et potentiellement manipulable de manière *directe* par le spectateur. Ce sont précisément ces qualités que nous voulons développer dans nos dispositifs.

Cette remarque nous incite ainsi, dans la lignée des expériences électrochimiques de Gordon Pask, à nous orienter vers une implémentation de processus de maintenance prenant non seulement une forme analogique, mais *exploitant les propriétés d'un processus d'auto-organisation matérielle*. Ce programme représente, tout d'abord, une opportunité de renouer avec la vision paskienne originale d'une interaction conversationnelle entre le dispositif et ses utilisateurs, et explore une voie alternative à la prise en compte des relations entre public et dispositif par des méthodes numériques « intelligentes ». Il traduit ensuite l'idée

---

121. Ce lien apparaît tout particulièrement, selon Andrew Pickering, dans la formulation proposée par W. Ross Ashby du concept de boîte noire, renvoyant fondamentalement à l'idée d'« un système destiné à être exploré de manière performative » (Andrew Pickering, *The Cybernetic Brain: Sketches of Another Future*, op. cit., p. 49, notre traduction).

d'une participation physique directe du public à la maintenance de l'œuvre, affirmant ainsi le développement d'un *engagement réflexif* du spectateur comme l'un des critères centraux de mise en pratique de la notion d'auto-maintenance dans le contexte d'une production participative.

Sur le plan pratique, l'adoption d'un programme basé sur une notion d'auto-organisation matérielle nous conduit à considérer une question fondamentale : comment impliquer le public dans le processus d'auto-organisation réalisé « localement » au sein du dispositif — au sens où, dans l'expérience de Pask, l'auto-organisation matérielle des structures filaires s'opérait à l'échelle « locale » de la solution ferreuse —, de sorte que ce processus, par « diffusion », conduise à l'auto-organisation (c'est-à-dire, la structuration) d'ensemble du système de l'œuvre — dispositif et public<sup>122</sup> ?

Le projet *Manœuvres*, présenté dans le chapitre suivant, présente une forme de réponse possible à cette problématique. Le dispositif qui s'y trouve mis en œuvre exploite en effet, comme élément central, un processus physique auto-organisateur, assurant la maintenance d'ensemble de l'œuvre dans la « catalyse », et la stabilisation, d'une relation avec le public, réalisée par la possibilité d'une manipulation directe de ce processus. Le régime d'auto-maintenance ainsi mis en place est implémenté de manière analogique, à l'aide d'une approche de *programmation matérielle* de certains des composants du dispositif (formant, comme nous le verrons, une population d'agents « marcheurs »). À ce titre, *Manœuvres* concrétise l'idée, annoncée dans la section 8.4, d'une compréhension *étendue* de la pratique de la programmation, et donne véritablement corps à l'idée d'une « implémentation » analogique de processus de maintenance. Outre sa capacité à répondre, de ce fait, aux enjeux pratiques et esthétiques de la maintenance dans le contexte des œuvres praticables, la direction de programmation matérielle que nous proposons ici s'inscrit dans une direction de recherche très actuelle, liée notamment à la question des matériaux « responsifs », à laquelle *Manœuvres* entend ainsi apporter une contribution expérimentale.

---

122. Nous avons déjà introduit une première fois cette idée de « diffusion » du comportement auto-organisateur du dispositif dans notre discussion de la machine électrochimique de Pask, présentée dans la section 11.2.

## Chapitre 12

# *Manœuvres* : programmation matérielle

### 12.1 Contexte du projet et intention artistique

*Manœuvres* est un projet réalisé en collaboration avec Olivier Dauchot et l'équipe de recherche EC2M (Effets Collectifs & Matière Molle), membre de l'Unité Mixte de Recherche 7083 du CNRS et basée à l'ESPCI ParisTech. Ce projet, développé d'avril 2014 à juin 2016, a tout d'abord été motivé par l'existence de points de convergence entre nos recherches, menées au sein de l'axe Responsive Matter d'EnsadLab, et le thème de recherche « matière active » exploré par l'équipe EC2M. Avant de préciser plus en détails la nature de notre collaboration avec Olivier Dauchot et l'équipe EC2M, il convient donc de préciser, brièvement, le contexte institutionnel et scientifique dans lequel cette dernière a trouvé à s'inscrire.

L'axe de recherche Responsive Matter, soutenu depuis 2015 par l'université de recherche Paris Sciences et Lettres, vise à explorer la conception et l'utilisation de matériaux dits « intelligents » dans le cadre de dispositifs artistiques interactifs : l'un de ses enjeux principaux est ainsi d'imaginer comment des matériaux « responsifs », dotés d'une capacité d'*adaptation*<sup>1</sup> à leur environnement, peuvent être mobilisés pour induire des relations sensibles (visuelles et tactiles) avec le public, selon des modalités que nous avons précédemment pu qualifier d'*analogiques* — c'est-à-dire, sans nécessairement faire intervenir la médiation de systèmes de captation et de contrôle numériques. Outre cette ouverture sur la possibilité d'une mise en œuvre analogique de dispositifs interactifs, l'inves-

---

1. L'adjectif « responsif » recouvre, en français, une idée d'adaptation : on parle ainsi de « design adaptatif » pour traduire l'expression anglaise « responsive design », désignant la capacité d'un média numérique — site internet, application — à s'adapter à des supports d'affichage de dimensions et de résolutions différentes. Le terme « responsif » s'avère cependant plus précis que la simple idée d'adaptation : cet adjectif renvoie en effet initialement à la propriété de « [contenir] une réponse » ([Anon.], « Responsif », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/responsif>, consulté le 28 mars 2017). Le terme s'inscrit ainsi, en ce sens, dans une conception *dialogique* de l'adaptation, qui le rend particulièrement pertinent par rapport à la notion de *conversation*, à travers laquelle nous avons choisi d'approcher l'idée d'une situation de production participative. Sur la question des matériaux responsifs, et leur utilisation dans les champs de l'art et du design, on pourra notamment consulter : Dominique Peysson, *L'image-matière : Matériaux émergents et métamorphoses imaginaires*, Paris, Dis Voir, 2016.

tissement d'une « capacité d'action » interne de la matière, donnant lieu à la notion d'une matière *active*, rattache clairement les travaux menés dans cette thèse à l'axe Responsive Matter. Cette notion de matière active se rapporte également aux problématiques explorées par l'équipe EC2M dans sa thématique de recherche du même nom.

L'équipe EC2M décrit le champ de la « matière active » comme un « nouveau domaine interdisciplinaire[, englobant] l'étude d'une grande variété de systèmes, dont les composants individuels ont la capacité de transformer l'énergie en une forme ou une autre de travail<sup>2</sup> ». Concrètement, les systèmes matériels étudiés par le laboratoire EC2M se composent d'un grand nombre d'unités en interaction (grains, gouttes, particules colloïdales...), soumises à une « entrée » d'énergie (transmise par le milieu dans lequel elles évoluent), et réagissant par la production de mouvements ou de contraintes matérielles au sein de leur milieu : dans une expérience menée sur des colloïdes actifs, publiée en 2013 dans le journal *Nature*<sup>3</sup>, l'équipe d'EC2M a par exemple utilisé un champ électrique pour induire la mise en mouvement d'un très grand nombre de particules isolantes, immergées dans un liquide conducteur. Lorsqu'un grand nombre d'unités individuelles se trouvent ainsi mises en mouvement, le système peut donner lieu à l'émergence de « comportements collectifs », caractérisés par la formation de groupes plus ou moins denses au sein desquels les unités se déplacent de façon cohérente. Les systèmes artificiels étudiés par EC2M font en ce sens preuve de propriétés d'*auto-organisation*, et se rapprochent ainsi, par leur comportements, de nombreux systèmes naturels : on peut notamment penser aux différents phénomènes d'agrégation observés dans le monde animal, comme ceux de la formation de nuées d'oiseaux ou d'essaims d'insectes. Les recherches menées par EC2M, rattachées aux domaines de la physique statistique, de la thermodynamique et de la physique des systèmes complexes, visent à développer une compréhension expérimentale et théorique de ces phénomènes d'émergence.

Au-delà de la convergence d'intérêts de recherche développés, au niveau institutionnel, dans les axes Responsive Matter et Matière active des laboratoires EnsadLab et EC2M, notre rencontre avec Olivier Dauchot a été motivée par notre intérêt personnel, présent de longue date, pour les phénomènes d'agrégation naturels, et leur simulation à l'aide de systèmes multi-agents<sup>4</sup>. Ces

---

2. EC2M, « Matière active », en ligne : <https://www.ec2m.espci.fr/accueil/la-recherche/matiere-active> (consulté le 5 mai 2017).

3. Antoine Bricard, Jean-Baptiste Caussin, Nicolas Desreumaux, Olivier Dauchot et Denis Bartolo, « Emergence of Macroscopic Directed Motion in Populations of Motile Colloids », *Nature*, vol. 503, n° 7474, 2013, p. 95–98.

4. Les projets *Two* et *Unspecified Clay* mobilisent, comme nous l'avons vu, des systèmes multi-agents afin de produire, respectivement, des comportements lumineux et des trajectoires spatiales. Outre ces projets, ainsi que d'autres non présentés dans cette thèse, notre intérêt

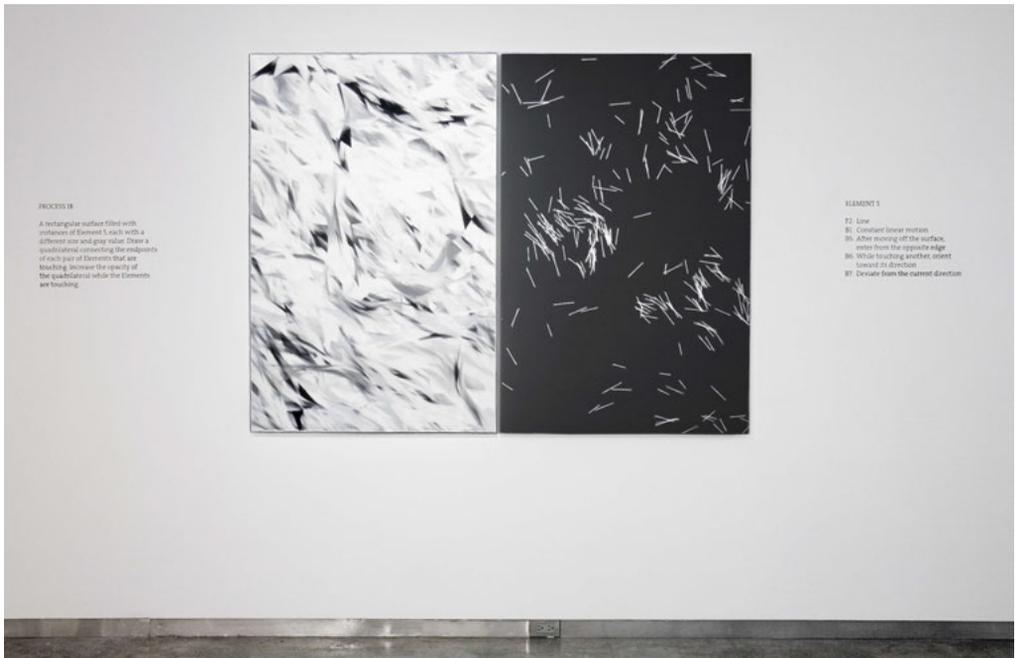


Fig. 12.1 — Casey Reas, *Process 18 (Software 3)*, 2010. Vue d'une installation vidéo présentant les trajectoires individuelles du système multi-agents (à droite) et la forme graphique obtenue (à gauche) (source : <http://www.thegundgallery.org/2011/10/c-e-b-reas>).

systèmes numériques, fréquemment utilisés dans les champs de l'art<sup>5</sup> (figure 12.1) et de l'architecture<sup>6</sup>, s'avèrent directement liés aux problématiques de recherche d'EC2M, bien que leurs comportements dérivent en général de processus moins complexes que ceux expérimentés par Olivier Dauchot et son équipe. Notre collaboration avec EC2M s'est donc basée, à cet égard, sur l'identification de la notion de « système multi-agents » comme point de convergence entre des problématiques de recherche relevant, d'une part, de l'art et du design, et de la physique expérimentale contemporaine d'autre part. Notre expé-

---

pour ce type de systèmes se traduit également dans différentes activités d'enseignement. Nous enseignons ainsi un cours sur ces méthodes à l'école HETIC (<https://www.hetic.net>, consulté le 5 mai 2017) depuis 2013, et avons été invités, en 2015, à diriger un atelier de trois jours sur le thème « Design génératif et systèmes d'agents », dans le cadre de la manifestation Processing Paris.

5. Voir notamment la série *Process* de Casey Reas, l'un des deux créateurs de Processing : [http://reas.com/compendium\\_a\\_p](http://reas.com/compendium_a_p) (consulté le 5 mai 2017).

6. Le champ de la recherche architecturale a vu se développer au cours des dernières années de très nombreuses applications des systèmes multi-agents; nous nous bornerons simplement ici à mentionner le travail de l'agence Kokkugia, fondé par Robert Stuart-Smith et Roland Snooks : <http://www.kokkugia.com> (consulté le 5 mai 2017).

rience des pratiques de conception basées sur les systèmes multi-agents a ainsi joué un rôle essentiel dans notre manière d'« aborder » les expériences de physique qu'Olivier Dauchot nous a présentées lors de nos premières visites de son laboratoire et, en retour, notre contact avec ces expériences scientifiques a contribué à modifier durablement notre pratique et nos réflexions. Notre investissement approfondi de la notion d'auto-organisation, au cours des chapitres 10 et 11, doit ainsi sans doute autant à nos lectures de références cybernétiques qu'au travail pratique réalisé dans le cadre du projet *Manœuvres*, amorcé relativement tôt dans notre thèse ; mais le principal apport conceptuel de notre rencontre avec Olivier Dauchot réside certainement dans l'idée d'une mise en œuvre *analogique* d'une telle notion d'auto-organisation. Cette idée, à laquelle nous avons également donné une place centrale dans le chapitre 11, va à présent nous permettre d'introduire plus précisément le contexte de recherche scientifique à l'origine du projet *Manœuvres*.

Au-delà du constat de l'existence d'un lien conceptuel fort entre nos propres expérimentations à l'aide de simulations multi-agents et les recherches menées par l'équipe EC2M, nous avons en effet été frappés, lors de nos premières visites du laboratoire, par la « simplicité » des dispositifs expérimentaux utilisés par l'équipe afin de mettre en évidence des comportements collectifs d'une grande complexité. Nous n'employons évidemment pas ici le terme de simplicité pour renvoyer à l'idée d'une quelconque « facilité » de conception et de mise en œuvre de ces dispositifs : les effets impliqués dans les expériences d'EC2M s'avèrent au contraire extrêmement difficiles à contrôler et mesurer précisément, et requièrent l'utilisation d'instruments précisément conçus et calibrés, ainsi qu'un travail expérimental exigeant. Notre emploi de la notion de simplicité renvoie plutôt à l'idée d'une certaine « économie de moyens », mise en œuvre par ces dispositifs afin d'induire, au sein de systèmes *matériels*, des comportements extrêmement complexes, qui s'avèrent le plus souvent très difficiles à reproduire dans des simulations numériques. Nous pouvons d'ores et déjà illustrer cette idée d'une économie de moyens en reprenant l'exemple, mentionné ci-dessus, de l'expérience menée sur les colloïdes actifs, dans laquelle l'équipe EC2M s'est montrée capable d'induire des effets collectifs au sein d'un très grand nombre de particules à l'aide d'un « simple » champ électrique ; mais cette caractéristique de l'approche expérimentale d'EC2M nous est apparue plus clairement encore dans une seconde expérience, relative à l'émergence de mouvements collectifs dans un ensemble de « grains marcheurs », sur laquelle s'est basé le projet discuté dans ce chapitre.

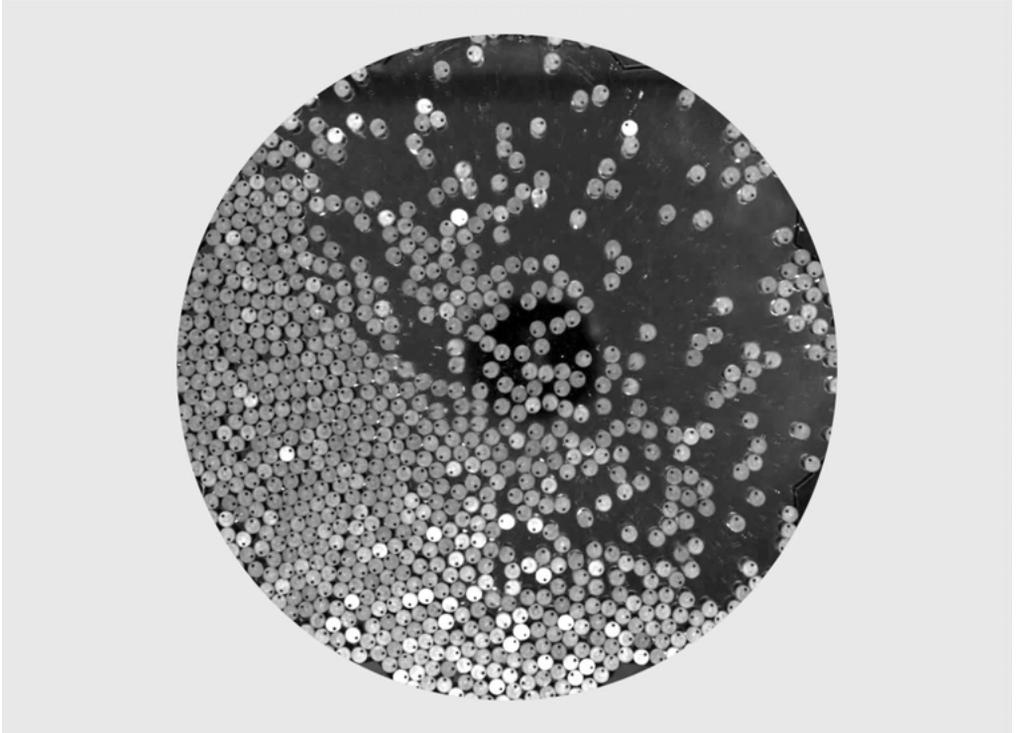


Fig. 12.2 — Vue zénithale du plateau du dispositif expérimental et de sa population de « marcheurs » (source : documentation interne de l'équipe EC2M).

Cette expérience, présentée notamment dans la revue *Physical Review Letters* en 2010<sup>7</sup>, se concentre sur l'étude de systèmes composés de plusieurs centaines de petits disques métalliques, disposés sur un plateau vibrant (figure 12.2). Chacun de ces disques métalliques, couramment appelés « marcheurs », possède la capacité de convertir l'énergie transmise par le plateau en un mouvement directionnel<sup>8</sup> : sous l'effet de ces comportements individuels, le système de marcheurs donne alors naissance à des mouvements collectifs de grande ampleur, conduisant à la formation de structures cohérentes à une échelle supérieure à celle de ses constituants élémentaires. Le système de marcheurs mis en œuvre dans cette expérience s'avère ainsi doté de propriétés d'auto-organisation (c'est-à-dire, comme précisé dans la section 10.4, d'« auto-structuration »), résultant uniquement des comportements mécaniques élé-

7. Julien Deseigne, Olivier Dauchot et Hugues Chaté, « Collective Motion of Vibrated Polar Disks », *Physical Review Letters*, vol. 105, n° 9-27, 2010, p. 1-4.

8. Nous désignons ici par l'expression « mouvement directionnel » un mouvement caractérisé par une direction de déplacement cohérente au cours du temps, par opposition à un mouvement erratique (de type brownien).

mentaires de ses constituants, et mobilisant un principe de conversion analogique de l'énergie transmise par la plaque vibrante.

L'« économie de moyens » caractérisant cette expérience la rendait, à nos yeux, doublement remarquable. Nous ne connaissions, d'une part, que peu d'expériences *matérielles* basées sur la mise en œuvre de systèmes « multi-agents » : pour des raisons pratiques, l'exploration de tels systèmes, tant dans le champ artistique que scientifique, se trouve le plus souvent réalisée par l'intermédiaire de simulations numériques. Dans les champs de l'art et du design, par exemple, la plupart des expérimentations exploitant les propriétés émergentes de systèmes multi-agents à des fins de création de forme donnent typiquement lieu à une production d'images ou de vidéos<sup>9</sup>. La dimension matérielle du système d'EC2M rattachait par conséquent l'expérience des « grains marcheurs » à une catégorie déjà sélective de travaux, incluant des projets comme les expériences de robotique « par essaim » menées au Harvard Wyss Institute<sup>10</sup>. Mais au sein de cet ensemble restreint d'expériences, l'approche suivie par EC2M s'illustre plus encore par son choix d'une mise en œuvre technique purement *analogique*, caractérisée par l'absence de système de contrôle informatique centralisé, ou d'une motorisation des « agents » (c'est-à-dire des marcheurs). Cette forme de mise en œuvre analogique nous a immédiatement intéressée, dans la mesure où elle se rapportait directement à nos idées relatives à la notion de maintenance, dont nous commençons alors à poser les bases au sein de notre réflexion.

Concrètement, la capacité de déplacement des marcheurs se trouve liée à leurs propriétés matérielles : la géométrie et les propriétés mécaniques de leurs points de contact avec la plaque vibrante sont précisément étudiées pour réaliser la conversion de l'énergie vibratoire en mouvement directionnel. La figure 12.3 présente un schéma du modèle de marcheur utilisé par EC2M dans la version originale de son expérience. Ces marcheurs se composent d'une partie métallique, produite par micro-usinage d'un alliage cuivre-béryllium, sur laquelle est collé un patin en caoutchouc (en noir sur la figure). Lors de l'usage, la partie métallique se trouve dotée, sur sa face inférieure, d'une pointe constituant l'un des deux points de contact du marcheur avec la plaque, le second point de contact étant fourni par le patin de caoutchouc. Les formes respectives de ces points de contact, ainsi que leurs propriétés mécaniques, s'avèrent décisives dans la détermination de la capacité des marcheurs à se déplacer : les capacités opératoires mises en œuvre par l'ensemble du dispositif résultent donc de sa capacité à implémenter, au niveau de chaque marcheur, le comportement

---

9. À l'instar de la série *Process* de Casey Reas, mentionnée plus haut.

10. Voir notamment : Michael Rubenstein, Christian Ahler, Nick Hoff, Adrian Cabrera et Radhika Nagpal, « Kilobot: A Low Cost Robot With Scalable Operations Designed for Collective Behaviors », *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, n° 7, 2014, p. 966–975.



Fig. 12.3 — Modèle de marcheur utilisé dans l'expérience originale d'EC2M.

unitaire adéquat. Cette implémentation matérielle d'une capacité d'action élémentaire au sein de chaque unité du système rejoint notre idée, développée dans le chapitre 11, d'un dispositif auto-organisateur « programmé matériellement » ; les axes de recherche des mouvements collectifs et de l'émergence sont d'ailleurs très fortement liés à des thématiques comme celle de l'« auto-assemblage », à travers laquelle nous avons introduite, dans la section 10.1, la notion d'une « matière programmable ». Dans la mesure où le système de marcheurs se trouve ici doté, par l'interaction des propriétés individuelles de chacun de ses constituants, d'un comportement cohérent à différentes échelles, la population de marcheurs s'avère de fait conceptuellement plus proche d'un *matériau* que d'un assemblage de composants séparés.

Lors de nos premières visites du laboratoire, l'expérience des « grains marcheurs » nous a frappés non seulement par le comportement physique remarquable qu'elle permettait de produire, mais également par sa capacité à s'offrir, spontanément, à des interprétations d'ordre symbolique. En d'autres termes, nous avons été surpris par notre tendance à projeter mentalement des formes d'organisation vivantes — et plus particulièrement humaines — sur le système de marcheurs, pourtant composé uniquement d'éléments inertes. Outre l'analogie, déjà notée précédemment, entre le comportement de ce système et les phénomènes d'agrégation du monde animal, nous avons ainsi tout particuliè-

rement été intéressés par les résonances *politiques* de l'expérience. Les mouvements collectifs adoptés par les marcheurs rappelaient directement, à nos yeux, des mouvements de foule de grande ampleur, comme ceux susceptibles de se produire lors d'une émeute ou d'un concert ; simultanément, la petite taille des marcheurs, ainsi que le point de vue zénithal et distant que nous pouvions adopter sur leur mouvement, nous plaçaient dans un rapport à ces « mouvements de foule » rappelant le point d'observation que nous aurait offert, par exemple, une caméra montée sur un drone, ou une vue par satellite. Ces résonances symboliques nous ont paru d'autant plus intéressantes qu'elles trouvaient à s'inviter dans le contexte d'une expérience de physique, c'est-à-dire au sein d'un cadre appelant précisément à l'exercice d'un regard objectif et apolitique sur les phénomènes observés. Nous nous trouvions ainsi en présence d'une situation où la pratique d'une science « dure », objective, se révélait capable de donner lieu, « malgré elle », à de nombreuses associations symboliques.

Ce constat nous a paru constituer une bonne direction d'approche pour la collaboration art-science que nous souhaitons mener avec EC2M : nous avons donc proposé à Olivier Dauchot de baser notre travail sur les résonances symboliques induites par cette expérience des « grains marcheurs ». Notre proposition s'est ainsi construite autour des *projections mentales*, d'ordre politique, que nous avait spontanément inspirées ce dispositif expérimental. Nous nous sommes plus spécifiquement intéressés à la connexion symbolique entre le comportement collectif des marcheurs et l'observation distante, « en hauteur », d'un mouvement de foule. Ce processus de projection mentale nous est apparu comme un « point de bascule », un moment où notre regard objectif et apolitique sur le phénomène physique observé cédait la place à un rapport symbolique, induit par les qualités sensibles de ce phénomène.

L'œuvre que nous avons imaginée, *Manœuvres*, se base sur cette idée d'une « oscillation » du point de vue porté sur le système de marcheurs : elle propose de faire à la fois l'expérience directe de ce système, à l'aide d'un dispositif inspiré de l'expérience originale d'EC2M, et d'observer sa traduction sensible dans une image lumineuse évoquant une foule métaphorique, dans laquelle le spectateur se trouverait immergé « à hauteur d'œil ». La figure 12.4 présente l'un de nos premiers croquis, posant les bases de notre dispositif. Plusieurs marcheurs, évoluant sur un plateau vibrant, portent de petites tiges verticales dont les ombres sont projetées sur un mur à l'aide d'une source lumineuse placée à côté du plateau. Le comportement collectif des marcheurs se trouve ainsi « projeté en perspective » dans le plan vertical du mur, créant une image d'ombres en mouvement. Quoi qu'abstraite, cette image se donne spontanément à voir comme une assemblée de silhouettes humaines. Cet effet résulte, en partie, de la dimension et de la forme des ombres : projetées à échelle humaine, elles ne laissent voir que la tige des marcheurs, produisant ainsi des

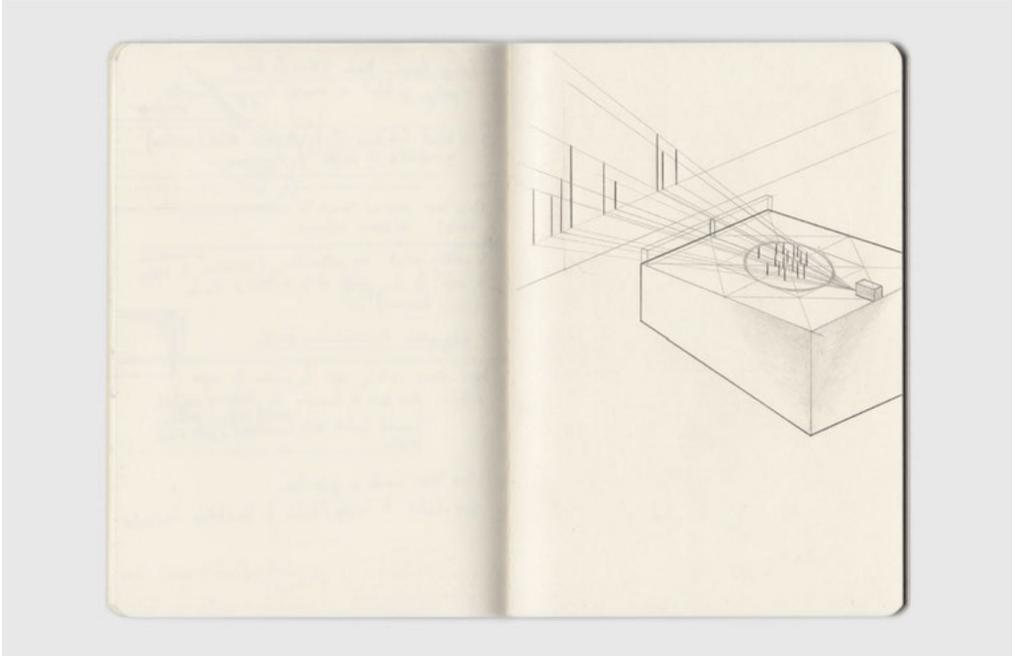


Fig. 12.4 — Croquis initial du projet *Manœuvres*.

formes allongées aux connotations anthropomorphiques. Mais la composante principale de cette association symbolique réside dans le mouvement même de l'image, induit par les déplacements des marcheurs sur le plateau : en fonction de la position de chaque marcheur par rapport à la source lumineuse, les ombres se croisent, s'allongent ou diminuent en taille, adoptant des contours plus ou moins nets. Un mécanisme de projection (optique) se joue ici de notre projection (mentale) d'un comportement sur un ensemble d'objets inertes : par un changement d'échelle et de point de vue, le spectateur fait désormais face à un groupe de silhouettes, comme s'il se tenait immobile au sein d'une foule en mouvement.

Il était essentiel, dans ce projet, que les ombres des marcheurs soient produites « en exposition » par un dispositif matériel, basé sur les mêmes principes physiques que l'expérience originale d'EC2M : il n'était ainsi pas question de filmer la projection lumineuse « en laboratoire », afin d'en réaliser la diffusion ultérieure. Notre intention artistique se basait en effet, comme nous l'avons souligné plus haut, sur la possibilité d'induire une « oscillation » du point de vue du spectateur, entre détachement objectif et regard sensible, sur un même phénomène physique à forte résonance symbolique. Il s'avérait donc essentiel que le dispositif artistique permette une circulation du regard entre la structuration matérielle du système et sa traduction en image lumineuse, entre une position d'observation « en hauteur », et un point de vue frontal, « à la première personne », sur la foule des marcheurs.

La nécessité de nous doter d'un dispositif matériel permettant la production en temps-réel de la projection lumineuse se rapportait également à notre intérêt pour la notion de *production participative*. Cette idée a joué un rôle central dans le développement du projet *Manœuvres* : nous imaginions en effet, dès le départ, que le public puisse participer physiquement à la création de l'image lumineuse, à travers la manipulation directe du système de marcheurs responsable de sa production.

Nous possédions, de fait, une expérience précédente dans la mise en œuvre de situations de production d'images impliquant le public : en 2012, nous avons ainsi conçu avec Anaïs Tondeur une installation intitulée *Vibrations from a graphite core* (figure 12.5), offrant la possibilité d'une production « en exposition » de dessins numériques, sur la base d'une interaction physique directe du public avec des échantillons de graphite naturel. Travaillant les échantillons à l'aide d'outils (grattoir, maillet...), les spectateurs produisaient des vibrations acoustiques qui étaient ensuite analysées par un logiciel, pour créer des représentations visuelles construites selon un principe inspiré du sismographe : une ligne déformable parcourait verticalement la zone de dessin, enregistrant temporellement les vibrations captées sur les échantillons de graphite. Une fois la zone de dessin « remplie », l'image numérique correspondante était directement imprimée, de façon automatique, sur le lieu même de l'exposition.

*Manœuvres* nous permettait en un sens de « dépasser » cette première expérimentation pratique, en adoptant, d'une part, un principe de mise en œuvre purement analogique, offrant la possibilité d'un engagement direct du public avec la forme visuelle produite<sup>11</sup>, et en doublant, d'autre part, cette production visuelle d'une production de structures *matérielles*, induites par l'auto-organisation du système de marcheurs. Ce critère d'une production de structures matérielles, que nous avons utilisé dans la section 10.1 pour préciser le type d'œuvres praticables mobilisé dans notre examen de la notion de production participative, constituait l'un des principaux enjeux pratiques que nous souhaitions explorer dans *Manœuvres*. C'est également au niveau de cet enjeu que nos recherches sur ce projet ont produit, à notre sens, leurs résultats les plus partageables et génériques : notre idée générale d'auto-maintenance s'est ainsi trouvée confirmée, comme nous le verrons, par les capacités *structurantes* du système de marcheurs que nous avons développé. Cette remarque ne signifie pas que la projection lumineuse n'a été amenée à jouer aucun rôle *pratique*

---

11. Notre description du principe opératoire de *Vibrations from a graphite core* souligne en effet l'influence centrale du modèle numérique convertissant les « vibrations » des échantillons de graphite en forme visuelle. En d'autres termes, le mode d'interaction proposé dans ce projet ne relevait pas d'un engagement direct avec les performances du public, mais d'une forme de *médiation*, et se rapporte ainsi à un schéma que nous avons été conduits à critiquer dans la section 11.4.



Fig. 12.5 — Vue de l'installation *Vibrations from a Graphite Core* : performance à la galerie GV Art (Londres), le 4 octobre 2012.

sur le plan de la capacité de l'œuvre à s'« auto-maintenir<sup>12</sup> » : mais il nous paraît important de distinguer ici le cas de cette projection lumineuse, avant tout justifiée conceptuellement par le contexte artistique du projet, des méthodes *génériques* de conception de processus de maintenance que nous avons pu mettre à l'épreuve à travers le développement du système de marcheurs — inscrites dans le cadre méthodologique, énoncé dans la section 11.5, d'une approche visant à « implémenter » des processus de maintenance à partir des propriétés d'un processus d'auto-organisation matérielle.

## 12.2 Expérimentations

Suite à la formalisation de nos premières intentions relatives au projet, nous avons à nouveau rencontré Olivier Dauchot en avril 2014 pour mener plusieurs séances de travail, destinées à clarifier les directions pratiques à explorer. Ces discussions nous ont tout d'abord permis de mieux prendre conscience des spécificités du comportement physique de l'expérience originale de l'équipe

---

12. Nous préciserons plus en détails cette composante « pratique » du rôle de la projection lumineuse dans la section 12.4.

EC2M, ainsi que des défis techniques rencontrés durant la réalisation de cette dernière.

Dès le début du projet, il nous paraissait central que le dispositif réalisé dans le cadre de *Manœuvres* trouve à s'inscrire, au-delà de sa singularité artistique, dans la continuité de l'expérience scientifique avec laquelle il entendait dialoguer. Nous disposions en effet, avec le dispositif expérimental conçu par EC2M, d'un « modèle » de comportement auto-organisateur dont nous avons déjà apprécié les qualités dynamiques et visuelles, et dont la portée symbolique nous avait inspiré notre idée même d'un dispositif proposant un « changement de perspective » sur ses propres opérations, par l'intermédiaire d'une projection lumineuse. Il était donc essentiel pour nous de chercher à nous rapprocher, dans le dispositif que nous concevrions pour *Manœuvres*, du type de comportement physique exhibé dans l'expérience originale d'EC2M.

L'axe de la collaboration art-science que nous avons entreprise avec Olivier Dauchot et EC2M s'est donc centré, dès le départ, sur l'idée de réinvestir la « physique » d'une expérience relativement mature (car publiée à plusieurs reprises) dans le nouveau contexte d'un dispositif artistique. Mais ce choix de nous baser sur un type de comportement physique éprouvé ne devait en aucun cas entraîner une simplification de nos recherches pratiques : comme nous le verrons par la suite, notre travail n'a à aucun moment consisté en la simple « transposition » des développements expérimentaux d'EC2M, et a nécessité un véritable investissement expérimental. Dès notre première discussion, Olivier Dauchot a en effet attiré notre attention sur la nature excessivement « couplée » du système mécanique mis en œuvre dans l'expérience, impliquant, à chaque changement de « paramètre » (taille des marcheurs, géométrie, propriétés mécaniques...), de procéder à un étalonnage d'ensemble du système. Si l'équipe avait procédé à plusieurs simulations numériques de son expérience, le comportement physique impliqué s'avérait en pratique trop complexe pour qu'il soit envisageable d'utiliser cette approche de manière systématique, dans l'optique de prédire l'effet de chaque modification des paramètres du système sur son comportement d'ensemble : il est donc apparu clairement que chaque modification apportée à l'expérience originale se devrait d'être mise à l'épreuve de manière empirique, et que nous ne pouvions pas, par exemple, espérer ajuster la géométrie d'un marcheur sans prévoir, en retour, une mise à jour du système de vibration.

Ces deux spécificités contextuelles — volonté de nous inscrire dans la continuité du comportement physique de l'expérience originale, et nécessité d'une approche « holistique » du système mécanique permettant de mettre en œuvre ce comportement — nous ont ainsi conduits, sur les conseils d'Olivier Dauchot, à envisager le développement d'un nouveau « dispositif expérimental » adapté à notre projet, dont la conception prendrait probablement une direction indépendante des solutions techniques retenues précédemment par

l'équipe EC2M. En d'autres termes, plutôt que de chercher à « transposer » le dispositif expérimental existant aux nouvelles exigences de notre projet, il s'avérait plus profitable, sur un plan méthodologique, d'envisager *Manœuvres* comme une *nouvelle expérience*, basée sur les mêmes principes physiques que le dispositif expérimental dont elle cherchait à s'inspirer, sans nécessairement en adopter les modalités de réalisation pratique. Cette direction, que nous avons suivie, s'est sans surprise révélée coûteuse en temps, dans la mesure où, si nous avons à tout moment pu bénéficier de l'expertise scientifique d'Olivier Dauchot, il nous a cependant fallu inventer nos propres solutions techniques en réponse aux spécificités du dispositif que nous voulions concevoir. Ainsi, même si nous n'avons pas travaillé sur le projet en continu entre notre première réunion de travail avec Olivier Dauchot en avril 2014, et la première présentation publique du dispositif en juin 2016, les temps de développement se sont ici avérés plus longs que pour chacun des autres projets réalisés dans cette thèse. Cependant, en dépit de cet investissement supérieur en temps, l'approche suivie nous a semblé satisfaisante à plusieurs égards : outre sa capacité à produire un dispositif final conforme à nos attentes, une de ses qualités, comme nous allons le voir à présent, est en effet d'avoir inscrit le projet dans une véritable logique de collaboration entre art, science et design, en opérant la convergence de nos propres intérêts pratiques avec ceux d'Olivier Dauchot et de son équipe.

Dans l'optique de préparer la conception du nouveau dispositif expérimental dont nous cherchions désormais à nous doter, nous avons identifié un ensemble de propriétés par lesquelles notre projet différait sensiblement de l'expérience originale d'EC2M — définissant ainsi un point de départ à partir duquel il nous semblait raisonnable de commencer à concevoir nos expérimentations. Deux objectifs, liés l'un à l'autre, ont ainsi pu être mis en relief lors de nos premières discussions. Premièrement, il était clair que la géométrie des marcheurs se devait d'être ajustée, afin d'intégrer les tiges nécessaires à la projection d'ombres. Deuxièmement, certaines des dimensions du dispositif se devaient d'être revues à la hausse : les marcheurs de l'expérience originale possédaient un diamètre trop faible (4 mm) pour pouvoir porter une tige de dimensions adéquates, et être manipulables directement par les spectateurs ; nous attendions plutôt de pouvoir travailler avec des marcheurs d'environ 20 mm de diamètre.

En raison de la nécessité d'évaluer empiriquement chacune de ces options, et du besoin prévisible de réaliser un nombre important d'itérations pour chacun des choix de conception que nous mettrions en œuvre, nous avons proposé de mobiliser au maximum les technologies de fabrication numérique, et notamment l'impression 3D, pour la production du dispositif, tant dans ses étapes de développement que dans sa version « finale ». À l'échelle où nous devions désormais travailler (une vingtaine de millimètres par marcheur, contre

les 4 mm initiaux), et compte tenu de nos exigences plutôt lâches quant à la précision attendue de notre dispositif<sup>13</sup>, l'utilisation d'imprimantes 3D « de bureau » devenait notamment envisageable pour prototyper et produire de nouveaux modèles de marcheurs, ce qui constituait une perspective séduisante au vu des nombreux tests que nous nous attendions à devoir réaliser<sup>14</sup>. Disposer de moyens de prototypage locaux, via les imprimantes 3D de l'ESPCI ou d'EnsadLab, s'est de fait avéré crucial pour expérimenter rapidement diverses méthodes de conception, ayant trait à des aspects de programmation matérielle (autrement dit, à l'enjeu de donner aux marcheurs la capacité de convertir l'énergie vibratoire en mouvement directionnel), ou à d'autres problèmes plus prosaïques comme le système de fixation de la tige — deux points qui, comme nous le verrons, se sont avérés couplés l'un à l'autre. D'autres développements expérimentaux, comme la conception du plateau vibrant ou du système de projection lumineuse, ont également donné lieu à l'impression de pièces en 3D et bénéficié, à ce titre, de la capacité d'itération rapide permise par les machines à notre disposition. Enfin, les pieds métalliques de la table accueillant le dispositif ont pu être réalisés grâce à un procédé de découpe par jet d'eau, accessible via une machine installée dans l'atelier métal de l'École nationale supérieure des Arts Décoratifs.

Ces aspects éminemment pratiques de notre travail, mobilisant nos compétences dans les domaines de la conception paramétrique, de la simulation ou du prototypage, ont constitué à notre sens une réelle dimension d'échange et de collaboration avec Olivier Dauchot et son équipe. En effet, au-delà de l'intérêt intellectuel à envisager une collaboration art-science telle que *Manœuvres*, nous pensons que de tels projets interdisciplinaires fournissent l'occasion d'un partage de méthodologies et de problématiques pratiques, bénéfiques tant à l'artiste ou au designer qu'au laboratoire scientifique partenaire. En l'occurrence, notre proposition de fabriquer un dispositif reproduisant, dans son ensemble, le comportement physique de l'expérience originale d'EC2M, à l'aide de technologies de fabrication numérique donnant accès à des coûts et des temps de développement moindres que ceux des modes de production « traditionnels » de pièces mécaniques, posait la question d'une influence de ces technologies numériques sur les méthodologies traditionnelles de la recherche scientifique. S'il n'était pas question d'envisager parvenir, par ces méthodes,

---

13. Si nous cherchions à reproduire les principales caractéristiques du comportement physique de l'expérience originale, nous n'avions en effet aucunement l'intention de réaliser de réelles *mesures* physiques à partir de notre dispositif.

14. Par contraste, l'usinage des marcheurs employés dans l'expérience d'EC2M était externalisé auprès d'une société spécialisée, entraînant un coût et des délais supplémentaires par rapport à une solution de production par fabrication additive — mais donnant accès, bien évidemment, à un degré de précision largement supérieur à cette dernière.

à un dispositif d'une précision et d'une fiabilité comparables à l'expérience originale, il s'est avéré, lors de nos premières discussions, qu'il était particulièrement intéressant pour Olivier Dauchot d'imaginer comment de telles approches pourraient permettre de produire à moindre coût des démonstrateurs, ou des dispositifs de vulgarisation<sup>15</sup>, dérivés d'expériences scientifiques de « précision ».

Pour rendre compte des différents volets de notre travail de recherche, nous adopterons ici une présentation chronologique. Ce compte-rendu de nos expérimentations a pu être établi sur la base d'un « cahier de laboratoire » que nous avons tenu dès le début du projet *Manœuvres* : cet outil méthodologique, classiquement adopté dans les sciences expérimentales, s'est avéré indispensable pour garder trace des différents prototypes mis à l'épreuve, ainsi que des hypothèses testées et discutées au cours de notre recherche et de nos échanges avec Olivier Dauchot. Le format temporel que nous adoptons ici se veut donc à l'image de la méthodologie expérimentale adoptée dans nos expériences — une adéquation formelle qu'il serait peut-être superflu de viser dans une publication de sciences expérimentales, mais qu'il nous paraît intéressant de développer dans le contexte de cette thèse, ne serait-ce que pour souligner l'intérêt potentiel de tenir un « cahier » lors de la conduite de recherches pratiques en art et en design.

#### *a. Choix des directions expérimentales*

Comme précisé en introduction de cette section, nos premières discussions de travail avec Olivier Dauchot se sont avérées cruciales pour fixer les orientations générales de notre collaboration. Ayant discuté ces orientations dans les paragraphes précédents, nous nous concentrerons, à présent, sur la description concrète des objectifs et directions pratiques mis à jour lors de nos premiers rendez-vous.

Le premier point mis en relief tenait, comme noté précédemment, à la nécessité de concevoir un dispositif de taille globalement supérieure à l'expérience originale d'EC2M, afin de prendre en charge deux contraintes spécifiques à notre projet : l'ajout d'une tige sur les marcheurs, permettant la production d'ombres par projection lumineuse, et la possibilité d'une manipulation directe des marcheurs par le public. Cet impératif d'un « agrandissement » du dispositif concernait donc d'abord les dimensions des marcheurs, et non celles du plateau vibrant lui-même. En réalité, il ne semblait pas réellement per-

---

15. Si *Manœuvres* n'a aucunement été pensée comme un « démonstrateur » de l'expérience originale d'Olivier Dauchot, les solutions pratiques mises au point lors de son développement pourraient tout à fait, dans une logique de recherche instrumentale, être mobilisées dans la conception ultérieure de tels démonstrateurs.

tinent de chercher à augmenter la taille du plateau de manière proportionnelle à celle des marcheurs, en raison des difficultés posées par la mise en vibration homogène d'un plateau de grande taille. Ce point, soulevé par Olivier Dauchot, nous a ainsi incité à ne pas modifier de manière significative la taille du plateau par rapport à l'expérience originale (employant un plateau circulaire de 425 mm de diamètre<sup>16</sup>).

Ce premier choix pratique impliquait, d'ores et déjà, que le type de comportements que nous mettrions en œuvre dans notre dispositif ne pourrait reproduire exactement les mouvements collectifs observés dans l'expérience d'origine, pour cause de rapports de proportions différents entre les dimensions des marcheurs et celle du plateau dans chacun des cas. Cependant, ce point ne fut pas jugé problématique, en vertu de notre compréhension du projet comme une nouvelle expérimentation, plutôt qu'une transposition directe de l'expérience originale d'EC2M. En d'autres termes, s'il était pour nous essentiel de reproduire, dans son ensemble, les mécanismes physiques de cette expérience, nous n'attendions pas que les comportements émergents mis en œuvre dans notre dispositif s'avèrent exactement identiques à ceux précédemment observés par l'équipe d'Olivier Dauchot. À partir de ce constat, nos discussions se sont alors centrées sur les deux principaux composants mécaniques donnant naissance, par leur couplage, au comportement physique de l'expérience : le plateau vibrant et les marcheurs à proprement parler.

Dans l'expérience originale du laboratoire, la vibration était produite par un vibreur électromagnétique asservi, conçu par la société Brüel & Kjær<sup>17</sup>. Ce type de matériel professionnel, coûteux, s'imposait afin de garantir une vibration précisément contrôlée, permettant de réaliser des mesures fiables et reproductibles. L'expérience originale requérait notamment de limiter au maximum toute déviation par rapport à la direction de vibration verticale<sup>18</sup>, et d'obtenir une bonne homogénéité spatiale des vibrations dans le plateau<sup>19</sup>. Ces exigences auraient pu être maintenues pour la conception de notre propre dispositif, mais il semblait clair, compte tenu de sa finalité artistique, et non plus directement scientifique, que nous pouvions en pratique nous contenter d'un degré d'exigence largement inférieur à celui mis en œuvre dans l'expérience d'EC2M. Sur le plan du système de vibration comme pour le reste de notre dispositif, notre pari central, décidé avec Olivier Dauchot, a ainsi été de considérer que l'abandon d'un niveau de précision « scientifique » n'entraverait en rien notre capacité à reproduire des comportements physiques du même

---

16. Julien Designe, Olivier Dauchot et Hugues Chaté, « Collective Motion of Vibrated Polar Disks », *op. cit.*, p. 1.

17. <https://www.bksv.com> (consulté le 27 avril 2017).

18. *Ibid.*, p. 1.

19. *Ibid.*, p. 2.

type que ceux de l'expérience originale. Par conséquent, nous avons choisi de concevoir notre système de vibration à l'aide d'excitateurs de coût, de dimensions et de puissance bien moindres que ceux du matériel professionnel utilisé précédemment par EC2M. Il était difficile de prévoir la fréquence de vibration optimale du système, dans la mesure où celle-ci ne pouvait être déterminée, de manière empirique, qu'une fois la plaque vibrante « chargée » de sa population de marcheurs. Cependant, sur la base de l'expertise précédente d'Olivier Dauchot, nous nous attendions à une fréquence de vibration de l'ordre de 100 Hz. Il semblait donc raisonnable, à ce stade de notre discussion, de nous orienter vers une solution de mise en vibration de la plaque à l'aide de haut-parleurs, tout à fait adaptés à la restitution de signaux d'une telle fréquence.

Les directions évoquées pour la conception des marcheurs ont tenu compte de deux impératifs : parvenir à « programmer » matériellement les marcheurs de sorte à ce qu'ils s'avèrent capables de convertir l'énergie de vibration de la plaque en un mouvement directionnel, et trouver une solution pour les doter d'une tige verticale, d'une hauteur suffisante (quelques centimètres) pour que l'ombre de celle-ci puisse être projetée sur un mur. Tout en étant conscients que toute approche de programmation matérielle des marcheurs serait nécessairement dépendante de l'ensemble des propriétés mécaniques de ces derniers, nous avons fait le choix de nous orienter vers une approche modulaire : plutôt que de chercher à fabriquer les marcheurs « d'un bloc », nous les avons pensés comme la réunion d'une « base », dotée sur sa face inférieure (au contact de la plaque vibrante) d'une géométrie adéquate pour induire un déplacement directionnel, et d'une tige, venant prendre position sur la face supérieure de cette base. Rétrospectivement, cette désolidarisation de la tige par rapport à sa base s'est surtout avérée cruciale sur le plan mécanique ; cependant, à ce stade de notre discussion, cette approche résultait essentiellement de la volonté de pouvoir tester facilement plusieurs combinaisons possibles de tiges et de bases.

Au niveau de la tige, l'enjeu était de découvrir, empiriquement, le bon rapport entre largeur et hauteur : si, pour des raisons esthétiques liées à la qualité de la projection lumineuse, nous étions plutôt favorables à l'utilisation d'une tige relativement fine et haute, nous devions cependant veiller à assurer une bonne stabilité d'ensemble des marcheurs, une fois ceux-ci soumis aux vibrations de la plaque et aux collisions avec leurs semblables. Nous nous attendions donc à ce que la hauteur maximale de la tige soit limitée par le comportement mécanique des marcheurs. En pratique, toutefois, ce point ne s'est pas avéré problématique, et le critère de stabilité n'a pas joué de rôle limitant dans le dimensionnement de la tige.

Au niveau de la base, l'enjeu immédiat était de parvenir à développer une approche de programmation matérielle réalisable à partir de la technique de fabrication retenue (impression 3D par dépôt de matière fondue). À cet égard,

deux éléments devaient être considérés. Premièrement, la géométrie des points de contact de la base avec la plaque vibrante devait être étudiée de manière spécifique. L'expérience précédente de l'équipe EC2M nous indiquait que la face inférieure de la base devait être dotée d'une structure axisymétrique pour être capable d'induire une direction de déplacement privilégiée, mais la géométrie exacte de cette structure se devait d'être réinventée pour tenir compte des nouvelles propriétés mécaniques de notre dispositif. Deuxièmement, l'« avant » et l'« arrière » de cette structure (par rapport au sens du mouvement induit) devaient être réalisés dans deux matériaux de coefficients d'élasticité différents. La combinaison de ces deux facteurs s'avérait indispensable afin que la base puisse convertir l'énergie transmise par la plaque en un mouvement directionnel : il était ainsi impossible de réaliser la base des marcheurs à l'aide d'un seul matériau. À la manière du procédé de fabrication retenu dans l'expérience originale d'EC2M, une première solution consistait donc à réaliser nos bases par collage d'un matériau élastique sur une partie rigide, préalablement « usinée » de sorte à ménager un premier point de contact avec la plaque vibrante : nous pouvions en effet envisager imprimer une première partie de la base dans un plastique rigide, et y ajouter un « patin » découpé dans un matériau élastique pour obtenir un second point de contact. Une autre option était de tirer partie des possibilités de l'une des imprimantes 3D disponibles à l'ESPCI, la MakerBot Replicator 2X, capable d'imprimer simultanément avec deux matériaux différents grâce à la présence de deux extrudeurs. Cette machine laissait penser qu'il serait possible de fabriquer l'intégralité de la base d'un marcheur en une seule opération, en imprimant à la fois ses parties rigide et flexible (à l'aide de deux filaments dotés de propriétés mécaniques différentes<sup>20</sup>).

#### *b. Prototypage des marcheurs : impression bi-matériaux*

Une première série d'expérimentations, réalisées dans les locaux de l'ESPCI en mai 2014, nous a permis de mettre à l'épreuve cette seconde option (fabrication des marcheurs en impression 3D bi-matériaux à l'aide de l'imprimante MakerBot Replicator 2X). Plusieurs prototypes de marcheurs ont été modélisés, imprimés puis testés sur un dispositif de vibration. Comme nous l'avons indiqué précédemment, le couplage mécanique entre marcheurs et dispositif de vibration aurait idéalement dû nous conduire à tester nos prototypes de

---

20. Un troisième scénario, évoqué lors de nos discussions, aurait consisté à concevoir une structure induisant, par ses propriétés géométriques, une différenciation des qualités mécaniques entre l'avant et l'arrière de la base. Ce scénario, permettant potentiellement de fabriquer des marcheurs à l'aide d'une imprimante mono-matériau, avait précédemment été testé par EC2M sur quelques prototypes, mais n'a pas été développé plus en avant dans le cadre de notre collaboration.



Fig. 12.6 — Test des prototypes de marcheur sur le dispositif de vibration de l'équipe EC2M.

marcheurs sur notre propre système de vibration, que nous envisagions alors de construire à l'aide de haut-parleurs. Cependant, suivant les conseils d'Olivier Dauchot, nous avons décidé de discriminer les deux procédés potentiels de fabrication des marcheurs (par impression mono- ou bi-matériaux) avant de nous lancer dans tout développement approfondi de notre dispositif : cette première série de tests a donc été réalisée sur le dispositif de vibration déjà en place dans le laboratoire de l'équipe EC2M (figure 12.6).

Les figures 12.7 à 12.9 présentent trois prototypes (n<sup>os</sup> 1 à 3) réalisés durant cette première série d'expérimentations. Seule la base des marcheurs a été imprimée : l'enjeu principal des tests était d'explorer la capacité du procédé d'impression bi-matériaux à réaliser des pièces composées d'une partie « élastique » (en blanc sur les figures) et d'une partie rigide (en noir). Pour chacune des pièces, la partie rigide, imprimée en ABS, se composait d'un disque de 20 mm de diamètre, portant, sur sa face inférieure, une surface triangulaire destinée à fournir un premier point de contact avec la plaque. La face supérieure des disques était munie d'une encoche cylindrique destinée à recevoir la tige

du marcheur. La partie élastique (en blanc) consistait en un volume simple, imprimé à l'aide d'un filament de polyuréthane thermoplastique<sup>21</sup>.

Les prototypes n<sup>os</sup> 1 à 3 différaient par la géométrie adoptée pour cette partie élastique, tout en conservant une même forme triangulaire pour la surface de contact rigide avec la plaque. D'autres pièces, réalisées ultérieurement et non présentées ici, nous ont permis de tester d'autres types de surfaces de contact rigides, toutes basées, suivant les conseils d'Olivier Dauchot, sur des formes « en flèche ». Nous n'avons pas réellement été en mesure de déceler un impact significatif lié à ce changement de géométrie, et avons donc adopté, parmi toutes les options testées, la forme offrant le plus de stabilité (le triangle, par opposition à des formes de type « chevron », d'angle plus ou moins aigu).

Nous avons en revanche pu identifier un impact direct de la forme de la partie élastique sur le mouvement des marcheurs. Le prototype n<sup>o</sup> 1 n'était ainsi animé d'aucun mouvement directionnel, et présentait une tendance à la rotation autour de son axe central. Le prototype n<sup>o</sup> 2, quoique lui aussi soumis à des mouvements de rotation, montrait en revanche une nette tendance à se déplacer dans le sens donné par sa partie flexible, un résultat inverse à celui de l'expérience originale d'EC2M, dans laquelle les marcheurs suivaient le sens indiqué par leur pointe métallique. Quoiqu'inattendue, cette inversion du sens de déplacement ne nous est en aucun cas apparue comme rédhibitoire, et pouvait au demeurant se justifier par les différences d'échelle, de forme et de matériaux existant entre nos marcheurs et leurs modèles originaux.

L'essai du prototype n<sup>o</sup> 2 nous a également permis de mettre en évidence l'influence de la masse du marcheur sur la qualité de son couplage avec la plaque vibrante. Utilisé « tel quel », le prototype n<sup>o</sup> 2 ne présentait qu'une faible tendance au déplacement : un lest devait être ajouté afin d'induire un réel mouvement directionnel. En pratique, l'ajout d'une masse de l'ordre de celle d'un écrou M10 nous a paru donner les résultats optimaux, un lest trop important pouvant finir par ralentir, voire immobiliser le marcheur. L'ajout d'un lest sur le prototype n<sup>o</sup> 1 n'a quant à lui entraîné aucune modification notable de son comportement, ce qui nous a permis de confirmer l'influence prépondérante de la géométrie du point de contact élastique avec la plaque sur la capacité du marcheur à induire un mouvement directionnel.

Ces premiers essais nous ont donc permis d'identifier rapidement une possible approche de programmation matérielle du comportement des marcheurs, basée sur la préparation de deux points de contact avec la plaque, l'un rigide et de forme triangulaire, l'autre élastique, rectangulaire et de dimensions significativement inférieures à celles du point de contact rigide. Par ailleurs, nous avons

---

21. Nous avons utilisé le filament NinjaFlex : <https://ninjatek.com/products/filaments/ninjaflex> (consulté le 27 avril 2017).

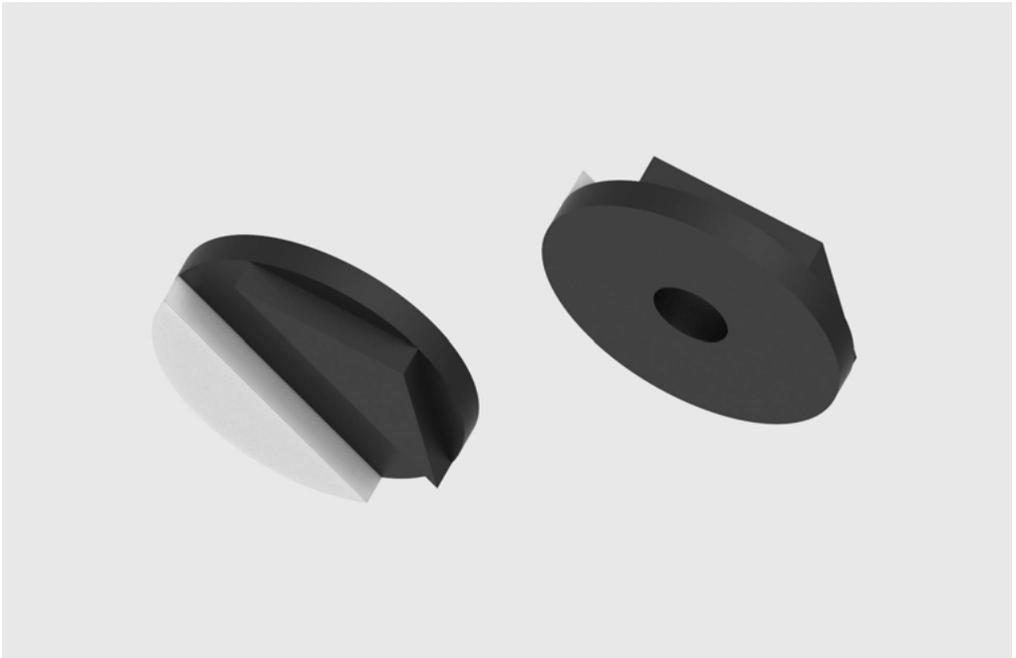


Fig. 12.7 — Prototype de base n° 1 : faces inférieure (à gauche) et supérieure (à droite).

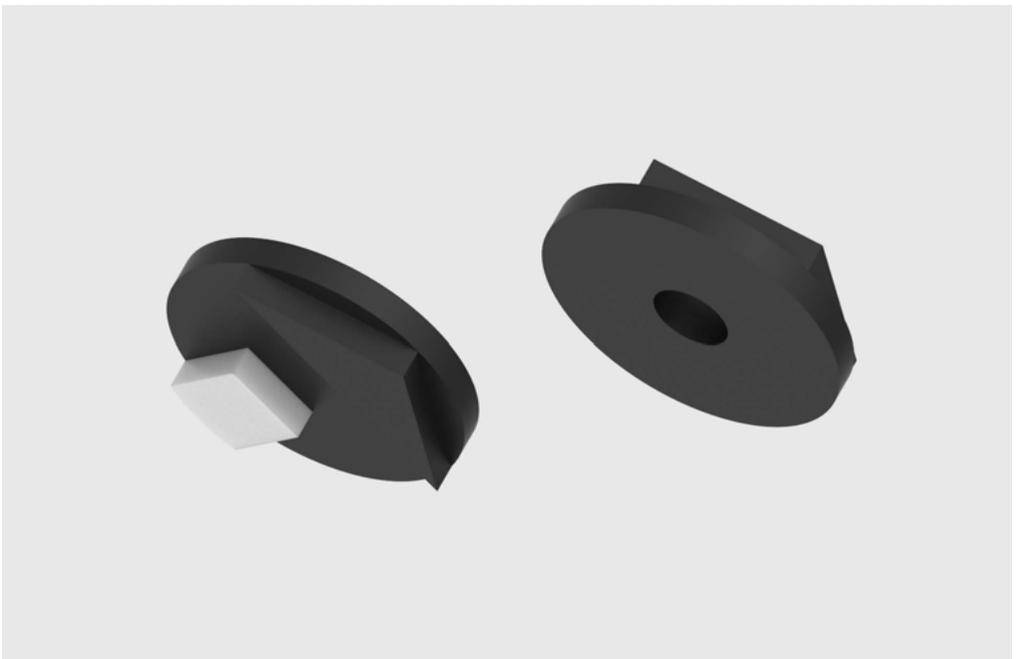


Fig. 12.8 — Prototype de base n° 2.

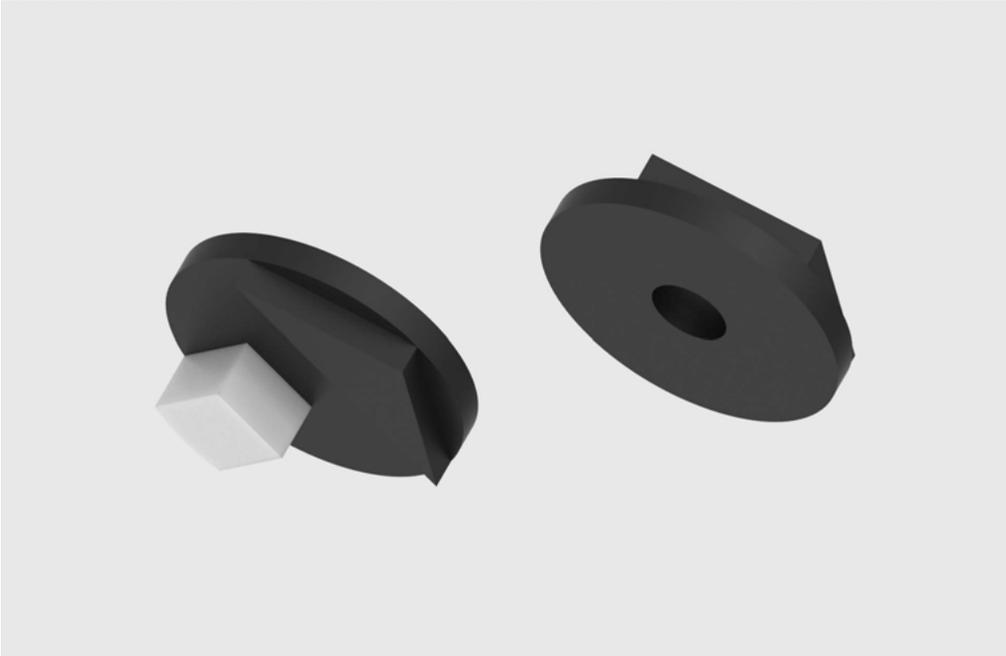


Fig. 12.9 — Prototype de base n° 3.

pu constater la nécessité d'un lestage des marcheurs, et identifier une solution simple à ce problème. Cependant, malgré ces premiers résultats, nous avons rencontré des difficultés dans la fabrication de nos prototypes, liées au procédé d'impression 3D bi-matériaux. En dépit de nombreux essais et réglages, nous n'avons en effet pas réussi à obtenir de manière consistante une bonne qualité d'impression avec le filament flexible : l'impression échouait trop fréquemment, ou fournissait des surfaces trop irrégulières pour pouvoir fournir un contact satisfaisant avec la plaque vibrante. Nous avons cherché à contourner ces limitations du procédé à travers le prototype n° 3 : notre idée était de déposer un excès de filament flexible, puis de poser la pièce obtenue sur une surface chauffante, de sorte à retrouver, par refonte du polyuréthane, un état de surface lisse sur la partie élastique. Mais cette approche n'a pas donné de résultats concluants, et aurait dans tous les cas mobilisé des étapes de fabrication supplémentaires par rapport à la seule impression des pièces, faisant perdre l'intérêt principal de l'utilisation d'un procédé bi-matériaux (concevoir les bases en une seule étape de fabrication). Nous avons donc choisi de nous réorienter vers un procédé de fabrication par impression 3D mono-matériau.

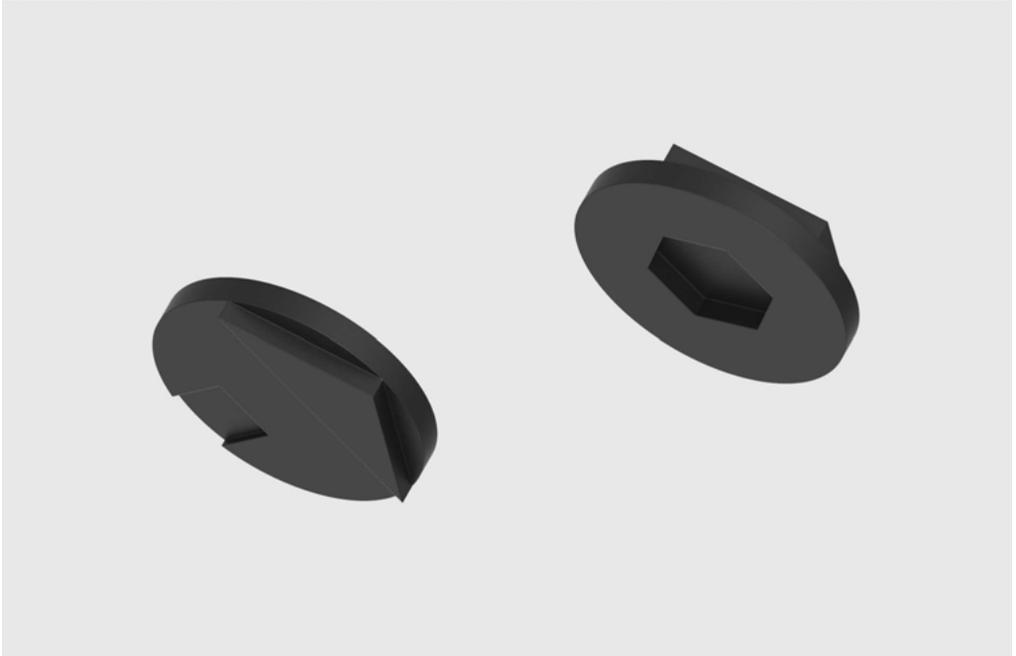


Fig. 12.10 — Prototype de base n° 4.

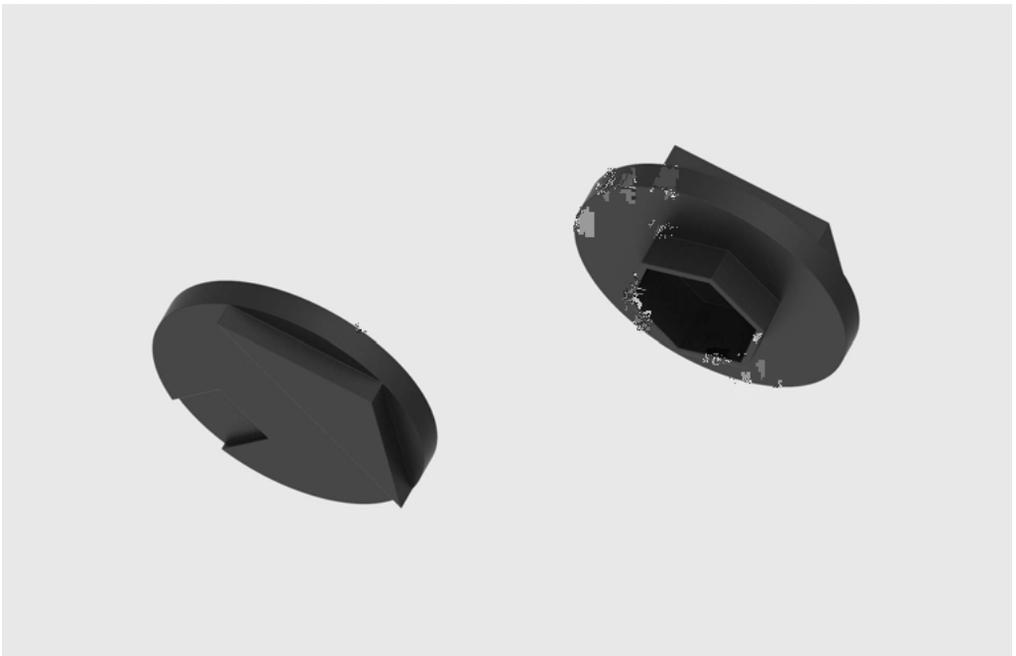


Fig. 12.11 — Prototype de base n° 5.

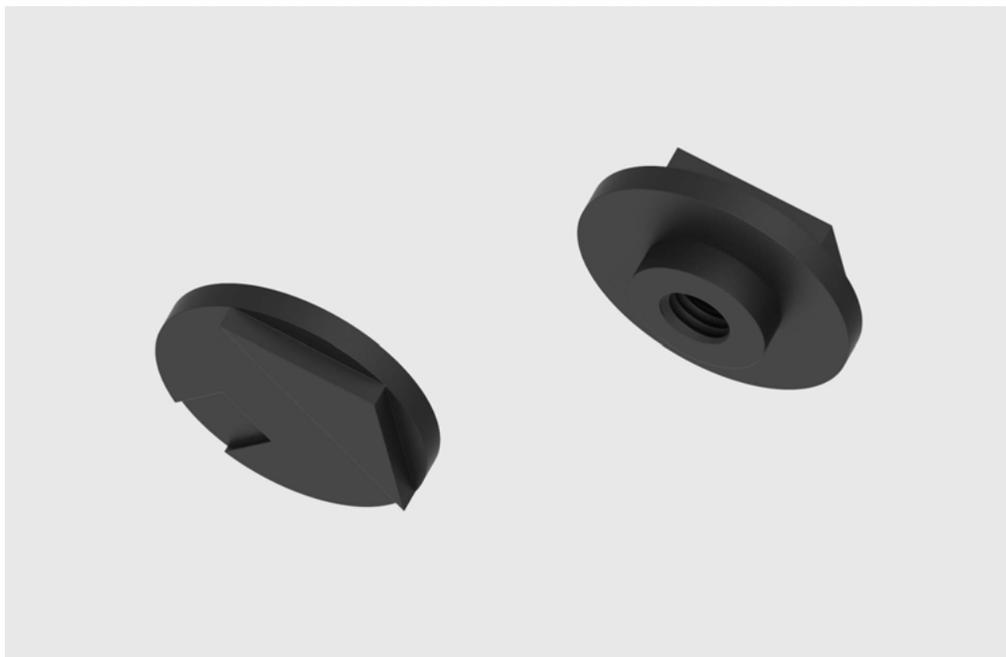


Fig. 12.12 — Prototype de base n° 6.

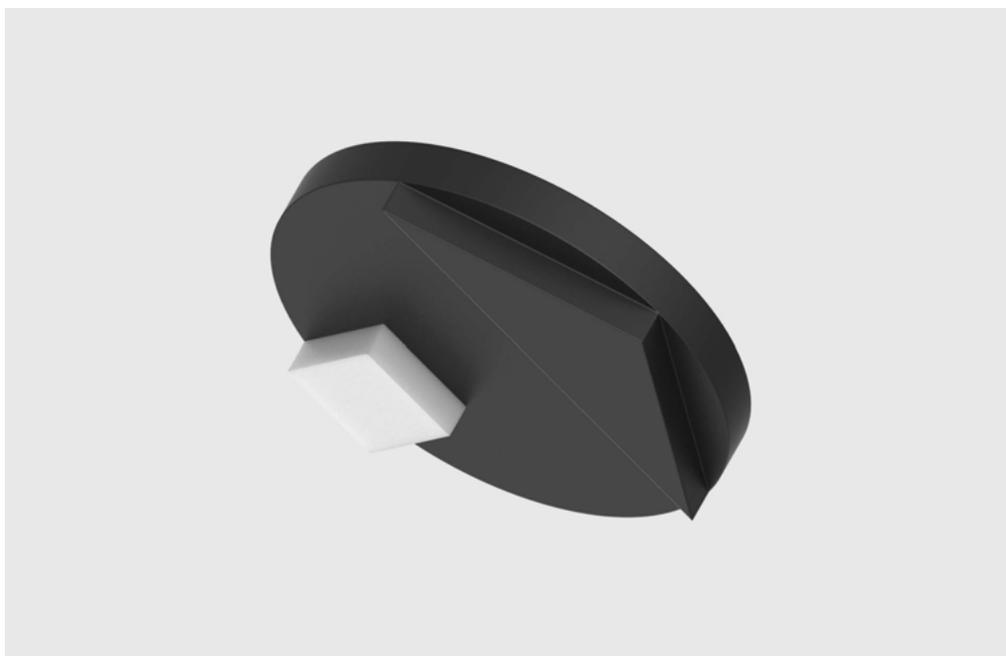


Fig. 12.13 — Version assemblée du prototype de base n° 4.

c. *Prototypage des marcheurs : impression mono-matériau*

Notre série suivante d'expériences nous a permis de mettre à l'épreuve un nouveau procédé de fabrication des bases par impression 3D mono-matériau, et de réaliser des premiers essais de mise en vibration de marcheurs dans leur configuration complète (base et tige).

Les prototypes de bases fabriqués pour ces nouveaux tests se composaient d'une partie imprimée en 3D dans un matériau rigide (PLA), et d'un patin découpé dans un matériau élastique. Les figures 12.10 à 12.12 présentent les différentes géométries expérimentées pour la partie rigide de la base (prototypes n<sup>os</sup> 4 à 6). Ces bases reprennent toutes, sur leurs faces inférieures, la configuration géométrique des points de contact déjà éprouvée dans nos expériences précédentes, adaptée à l'utilisation d'une solution d'impression mono-matériau. La forme utilisée pour chacun de ces prototypes était celle d'un disque de 20 mm de diamètre, doté, sur sa face inférieure, d'un premier point de contact avec la plaque, de profil triangulaire. Une encoche rectangulaire, de faible profondeur, était placée sur la partie inférieure du disque, diamétralement opposée à ce premier point de contact. Cette encoche permettait de positionner et coller avec précision un patin de 5 × 5 mm de côté, découpé dans un amortisseur anti-vibration en caoutchouc, de marque 3M, disponible sous forme de plaques adhésives. La figure 12.13 montre la version finalisée du premier de nos trois nouveaux prototypes de bases, équipée de ce patin élastique.

Ayant constaté, lors de notre série d'expériences précédente, la possibilité d'utiliser des écrous pour accroître la masse des marcheurs, nous avons ici tenté de réinvestir cette solution afin de prendre en charge de manière simultanée les problématiques de lestage et d'attache de la tige. Nous avons pour ce faire cherché à développer des systèmes permettant de fixer la tige à la base à partir d'un ou plusieurs écrous, et nous sommes orientés, en termes du type de tige à expérimenter, vers des tiges filetées métalliques de diamètre 5 mm. Le type de système de fixation installé, sur la face supérieure des bases, pour accueillir de telles tiges, représentait l'unique différence entre les trois prototypes de marcheurs mis à l'épreuve dans la seconde série d'expériences discutée ici.

Le prototype n<sup>o</sup> 4 était muni d'une défonce hexagonale, permettant l'insertion d'un écrou M5. Ce premier écrou était collé à la base à l'aide de colle thermofusible. Son filetage était ensuite utilisé pour venir fixer, à la verticale, une tige filetée de 5 mm de diamètre. Nous pensions initialement n'utiliser qu'un seul écrou afin de fixer la tige à la base : la réduction du diamètre de l'écrou par rapport à nos premiers tests (5 mm au lieu de 10 mm) ne nous paraissait pas problématique, dans la mesure où nous avons estimé que l'ajout d'une tige filetée métallique compenserait approximativement les variations ainsi provoquées de la masse de lestage. Cependant, les premiers tests d'assemblage du prototype 1, réalisés en configuration « statique » (c'est-à-dire sans

vibration), nous ont permis de constater que cette solution de fixation à un seul écrou n'était pas viable : la tige avait en effet tendance à se dévisser spontanément, un effet qui se serait encore accentué une fois l'ensemble du marcheur soumis aux vibrations de la plaque. Par ailleurs, la trop faible profondeur de la défonce hexagonale ne permettait pas de positionner précisément la tige de manière perpendiculaire au plan de la base, ce qui posait problème en termes esthétiques, non seulement au niveau du marcheur lui-même, mais aussi par rapport à l'ombre que celui-ci devait ensuite projeter.

À la suite de ce premier test, nous avons conçu un autre prototype doté d'un système de fixation de la tige basé sur deux écrous. Le prototype n° 5 reprenait l'idée d'une défonce hexagonale expérimentée dans le prototype n° 4, mais prolongeait les contours de cette défonce au-delà de la surface du disque à l'aide de parois de faible épaisseur. Le réceptacle obtenu permettait de maintenir fermement un premier écrou M5, fixé à la base à l'aide de colle thermofusible. La tige filetée était ensuite vissée sur le filetage de ce premier écrou, et l'ajout d'un second écrou permettait de la bloquer en rotation.

La fabrication de ce prototype a nécessité de développer une procédure d'impression spécifique. En raison de leur géométrie, les bases des marcheurs n'avaient pu, jusqu'ici, être imprimées dans leur orientation « naturelle » (face inférieure vers le bas) : ce choix aurait nécessité d'ajouter, lors de l'impression, des « structures de support » amovibles destinées à soutenir les surfaces en porte-à-faux, qui auraient dégradé l'état de surface de la face inférieure, et réduit la qualité du couplage avec la plaque vibrante. Pour ces raisons, les pièces ont été systématiquement imprimées « à l'envers », face supérieure vers le bas. Ce choix a été préservé ici. Cependant, dans la mesure où la face supérieure de la pièce n'était dorénavant plus plane (en raison de l'ajout du réceptacle permettant le maintien de l'écrou M5), l'ajout de structures de support devenait également indispensable dans cette orientation « inversée ». S'il restait dans l'ensemble préférable d'ajouter de telles structures de support plutôt que d'imprimer la pièce face inférieure vers le bas, nous devons cependant trouver une solution pour rendre compatible l'addition de ces supports avec la géométrie du réceptacle de l'écrou M5 : des structures amovibles ajoutées à l'intérieur du réceptacle auraient en effet laissé des résidus difficiles à retirer, nuisibles au bon positionnement de l'écrou. Certains logiciels professionnels, comme Materialise Magics<sup>22</sup>, permettent de spécifier des zones à exclusion des procédures automatiques de génération de structures de support sur les pièces à imprimer. Ne disposant pas de logiciel de ce type, nous avons choisi la solution plus simple de désactiver totalement la fonction de génération de structures de sup-

---

22. <http://www.materialise.com/en/software/materialise-magics> (consulté le 1er mai 2017).

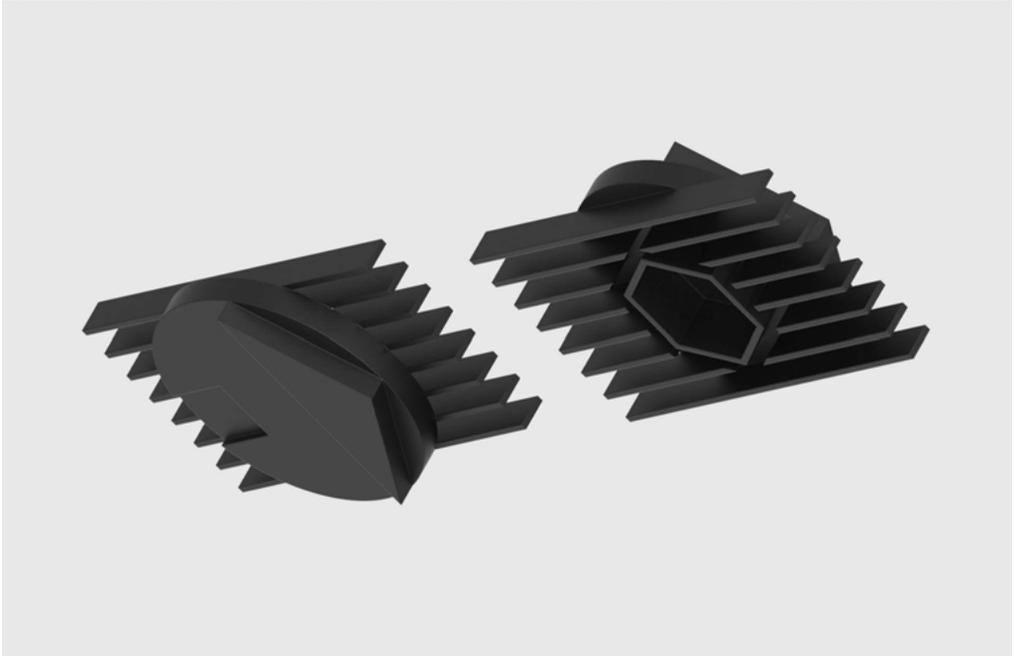


Fig. 12.14 — Prototype n° 5 muni de ses structures de support amovibles.

port sur notre logiciel d'impression, afin de placer « manuellement », par une modélisation explicite, des structures aux positions nécessaires<sup>23</sup>, en « contournant » le réceptacle de l'écrou. La figure 12.14 montre le modèle finalement utilisé pour l'impression de la pièce, muni de ses structures de support.

Les tests d'assemblage du prototype n° 5, réalisés de manière statique (sans vibration), nous ont permis de constater une meilleure fixation de la tige à la base que dans le cas du prototype n° 4. Cependant, il restait difficile de positionner avec précision la tige de manière perpendiculaire à la base : les irrégularités de la surface du PLA imprimé en 3D ne permettaient jamais de placer le premier écrou dans une position absolument horizontale au fond du réceptacle prévu sur la base, ce qui se répercutait ensuite sur l'orientation de la tige. Pour cette raison, nous avons donc décidé, avant même de réaliser les tests dynamiques (en vibration) de ce prototype, d'expérimenter une solution alternative de fixation de la tige.

Pour le troisième prototype de cette série de tests, nous avons exploré l'idée de visser directement la tige filetée sur la base, en munissant celle-ci d'un filetage aux dimensions du diamètre de la tige, imprimé « dans la masse ». Un écrou supplémentaire, pré-vissé sur la tige, permettait ensuite de bloquer cette

23. Cette première expérience de modification des comportements « par défaut » des logiciels d'impression 3D « grand public » a d'une certaine manière préparé notre projet *Computational Ruins*, développé environ un an après les premières expériences décrites ici.



Fig. 12.15 — Prototype n° 6 muni d'une tige filetée.

dernière en rotation par rapport à la base. La figure 12.15 montre une version assemblée du prototype obtenu selon ce principe. Lors de nos tests d'assemblage « statiques », cette configuration s'est avérée satisfaisante, tant sur le plan de la verticalité de la tige, que sur la qualité de sa fixation à la base.

Après avoir évalué le comportement statique des prototypes n°s 4 à 6, nous avons ensuite testé leur comportement en vibration. Contrairement à notre première série d'expériences, nous avons ici utilisé un dispositif de vibration personnalisé, conçu à partir de quatre haut-parleurs Visaton<sup>24</sup>, fixés par leurs cache-noyaux<sup>25</sup> à une plaque de carton mousse d'épaisseur 10 mm. Les haut-parleurs étaient placés sous la plaque, dans chacun de ses angles, à une distance de quelques centimètres du bord. Ce montage rudimentaire, visible sur la figure 12.16, devait permettre d'évaluer la viabilité d'une approche basée sur des haut-parleurs audio. Nous avons mené nos tests en fournissant aux haut-parleurs un signal sinusoïdal, créé par un générateur de fonctions et amplifié par un amplificateur hi-fi Dynavox CS-PA1<sup>26</sup>, que nous avons ensuite utilisé pour l'ensemble de nos expériences suivantes.

24. <http://www.conrad.fr/ce/fr/product/303672/Haut-parleur-large-bande-Visaton-FR-88-ohms-d'impédance-8-Ω> (consulté le 1er mai 2017).

25. Le cache-noyau est la partie hémisphérique située au centre du cône d'un haut-parleur.

26. <http://www.conrad.fr/ce/fr/product/062563/Mini-ampli-Hi-Fi-Dynavox-CS-PA1> (consulté le 1er mai 2017).



Fig. 12.16 — Premier prototype du dispositif de vibration.

Munis de leurs tiges, chacun des trois prototypes testés (n<sup>os</sup> 4 à 6) présentait une capacité de déplacement très limitée, bien inférieure aux premiers prototypes réalisés en impression bi-matériaux. En retirant les tiges filetées et les écrous M5 de fixation, puis en ajoutant un écrou M10 à chacun de nos prototypes (de sorte à retrouver une configuration proche de notre première série d'expériences), nous sommes parvenus à obtenir un déplacement directionnel satisfaisant dans chacun des trois cas, pour une fréquence de vibration de 125 Hz. Ce constat nous a permis de comprendre qu'il n'était pas simplement important de lester suffisamment les marcheurs (ce que devaient contribuer à réaliser les tiges filetées), mais que le centre de masse de ces derniers se devait d'être ajusté pour se trouver au plus proche de la surface de vibration. Nous avons en effet découvert qu'un centre de masse trop haut pouvait entraîner la dissipation de l'essentiel de l'énergie transmise par la plaque dans les vibrations de la tige, privant la base du marcheur de l'énergie nécessaire à son déplacement. Tout en validant le principe d'une conception des marcheurs à l'aide d'un procédé d'impression mono-matériau, cette seconde série de tests nous a ainsi incité à abandonner l'utilisation de tiges filetées métalliques pour nous orienter vers un matériau plus léger.

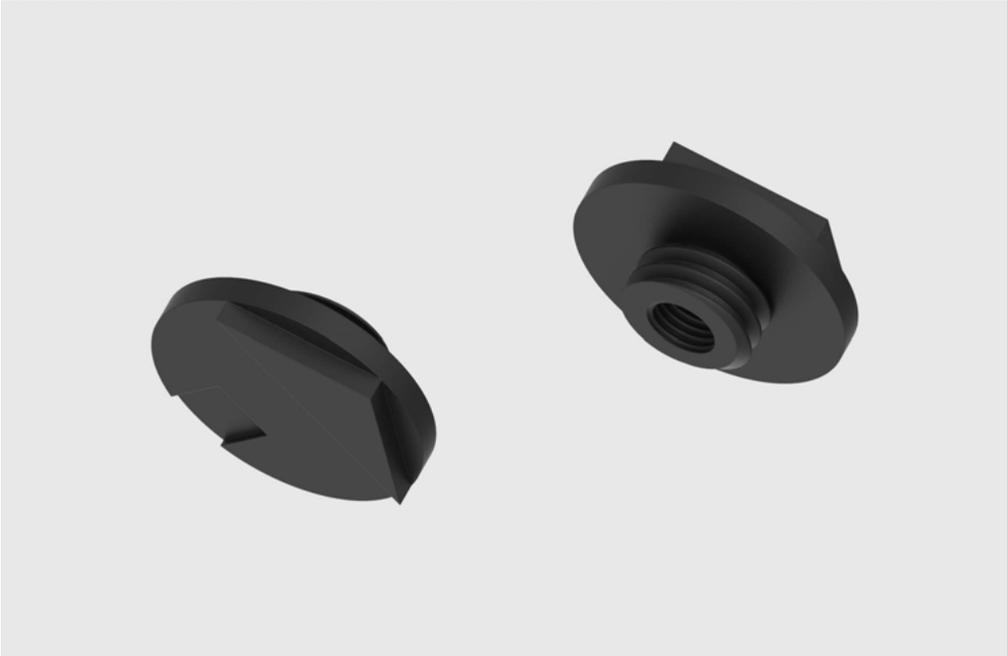


Fig. 12.17 — Prototype de base n° 7.

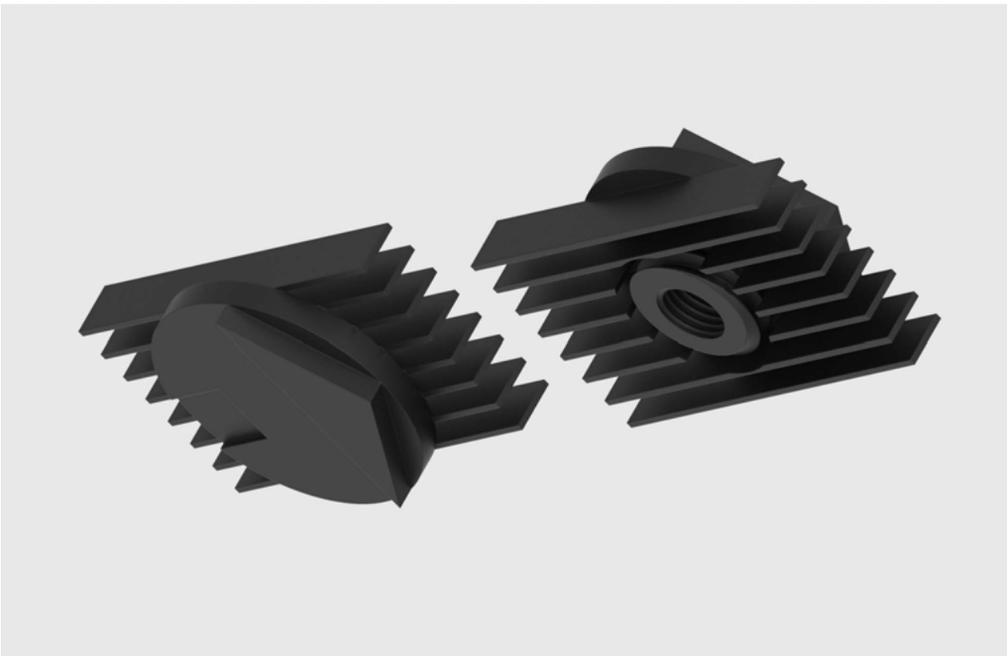


Fig. 12.18 — Prototype n° 7 muni de ses structures de support amovibles.

*d. Révision des prototypes de marcheurs*

Cette troisième série d'expériences nous a permis de mettre à l'épreuve le principe d'une conception de marcheurs basée sur l'utilisation d'une base lestée et d'une tige légère. Les nouveaux prototypes conçus dans ce cadre adoptaient, à l'instar du prototype n° 6, le principe d'une fixation par vissage de la tige sur la base du marcheur; en revanche, l'emploi d'une tige plus légère nécessitait désormais de développer une solution de lestage appropriée, absente de ce précédent prototype. Nous nous sommes donc orientés vers un prototype doté de deux pas de vis imbriqués l'un dans l'autre, visible sur la figure 12.17 (prototype n° 6). Le filetage interne, de diamètre 5 mm, permettait d'accueillir la tige. Le filetage externe, de diamètre 10 mm, permettait de visser un écrou M10 sur la base du marcheur, afin d'apporter le lest nécessaire à son déplacement. Dans la mesure où la masse de lestage se concentrait désormais dans l'écrou et non plus dans la tige, le centre de gravité du marcheur s'avérait suffisamment bas pour assurer un couplage efficace avec la plaque vibrante. La figure 12.18 présente le modèle géométrique effectivement utilisé pour l'impression, muni, à nouveau, de structures de support ajoutées « manuellement ».

Ce nouveau prototype de base laissait ouverte la question du type de tige à utiliser pour remplacer les tiges filetées métalliques employées dans nos précédents prototypes. Dans un premier temps, nous avons cherché à imprimer les tiges en PLA : cette solution semblait séduisante dans la mesure où il s'avère possible, en impression 3D, de sélectionner un taux de remplissage faible des volumes, produisant des objets de masse très peu élevée (des valeurs de remplissage de 15 à 20 % sont ainsi fréquemment utilisées). Par ailleurs, il était tout à fait envisageable d'imprimer une tige dotée d'un filetage adapté à celui présent sur la base, dans la mesure où le diamètre visé (5 mm) était accessible à la précision des machines dont nous disposons. En pratique, cependant, l'impression de tiges de plusieurs centimètres de hauteur s'est avéré difficile : pour préserver la qualité du filetage, il convenait en effet d'imprimer les tiges en position verticale, une configuration qui s'est avérée peu fiable à l'usage. Par souci de simplicité, nous avons donc souhaité adopter un procédé de fabrication plus simple, et nous sommes orientés vers l'utilisation de tiges filetées en nylon.

Un premier prototype de marcheur, doté d'une tige filetée en nylon de 50 mm de hauteur et de notre nouveau prototype de base, a ainsi pu être testé sur le dispositif de vibration. Nos essais nous ont permis d'obtenir des comportements de déplacement directionnel pour une plage de fréquences comprises entre 80 et 125 Hz. À amplitude de signaux égale, nous avons pu constater que le déplacement présentait un caractère plus lent et plus stable dans la partie supérieure de ce domaine de fréquences : autour de 80 Hz, les marcheurs se déplaçaient plus rapidement, mais étaient animés de fortes oscillations laté-

rales par rapport à la direction de leur mouvement<sup>27</sup>. L'effet d'accroissement de la vitesse de déplacement aux basses fréquences finissait de plus par s'inverser en dessous de 80 Hz : le marcheur se trouvait alors soumis à des perturbations trop importantes pour pouvoir se déplacer. Nous avons par ailleurs mis à l'épreuve différentes formes d'onde pour le signal provoquant la vibration du plateau (sinus, carré, dent de scie), sans observer de modifications significatives du comportement des marcheurs. Souhaitant limiter au maximum le volume sonore émis par le dispositif de vibration, nous avons donc adopté, pour cette série d'expériences et dans la suite de notre travail, un signal sinusoïdal, doté d'une empreinte sonore inférieure à celle des signaux riches en fréquences comme le carré ou la dent de scie.

Tout en nous permettant de valider un premier prototype « complet » de marcheur (base et tige), ces expériences nous ont permis d'identifier les limites de notre dispositif de vibration. Le principal problème rencontré était lié à la présence de zone « mortes » à la verticale des haut-parleurs utilisés pour exciter la plaque, au sein desquelles les marcheurs tendaient à s'immobiliser. Après avoir remplacé les écrous de lestage des marcheurs par des écrous en laiton, nous avons pu constater que ce phénomène d'immobilisation n'était pas dû à l'aimantation des haut-parleurs, et conclu qu'il devait donc résulter de la conception mécanique de notre vibreur. Cet constat n'était au demeurant pas surprenant, dans la mesure où nous travaillions pour l'instant avec un système de vibration rudimentaire, et nous a ainsi incité à diriger nos recherches vers la conception d'un dispositif de vibration plus adapté.

#### *e. Développement du dispositif de vibration*

Sur les conseils d'Olivier Dauchot, nous avons tout d'abord cherché à augmenter l'épaisseur de notre plaque vibrante par rapport à sa première version, découpée dans un carton mousse de 10 mm d'épaisseur. Le choix du carton mousse avait été motivé par la contrainte de travailler avec un matériau à la fois assez épais pour limiter la flexion de la plaque lors de sa vibration, tout en restant suffisamment léger pour pouvoir être excité à l'aide de haut-parleurs de puissance raisonnable. Pour augmenter l'épaisseur de la plaque tout en continuant de satisfaire à ces contraintes, nous nous sommes donc orientés vers un panneau de mousse de polystyrène extrudé, de 30 mm d'épaisseur, dans lequel nous avons découpé une surface carrée de 500 × 500 mm. Nous y avons ensuite collé, sur sa face supérieure, une plaque de carton mousse de 10 mm d'épaisseur et de 500 × 500 mm de section, sur laquelle nous avons enfin ajouté une

---

27. Ces vibrations, observées sur l'ensemble du marcheur, ne se traduisaient pas par une dissipation de l'énergie dans la tige.

fine bordure en carton mousse afin d'éviter que les marcheurs ne tombent de la zone de vibration, une fois parvenus à ses limites. Les haut-parleurs ont été positionnés sous la plaque ainsi obtenue, à la moitié de chacune de ses demi-diagonales.

Les premiers tests de vibration réalisés avec cette nouvelle plaque n'ont tout d'abord permis d'obtenir aucun mouvement des marcheurs dans la plage de fréquences précédemment retenue (80 à 125 Hz). En augmentant l'intensité de l'excitation à la limite des capacités de l'amplificateur, de très légers mouvements ont pu être produits, mais le volume sonore émis par les haut-parleurs devenait alors trop important. Cette observation semblait indiquer la présence d'un couplage de mauvaise qualité entre les haut-parleurs et la plaque vibrante, dans la mesure où l'essentiel de la puissance fournie par l'amplificateur se trouvait transmise à l'air. Pour poursuivre les essais de notre nouveau prototype de plaque vibrante, nous devons donc chercher à améliorer ce couplage, et nous orienter vers un type d'excitateur plus performant que des haut-parleurs audio « détournés » de leur usage habituel.

Une perspective immédiate d'amélioration résidait dans le remplacement des haut-parleurs audio « standard » par des haut-parleurs de contact (transducteurs), spécifiquement dédiés à la transmission du son par excitation de parois solides. En vertu de son coût réduit, cette solution continuait à constituer une réelle alternative à l'emploi d'un vibreur industriel du type de celui utilisé dans l'expérience originale d'EC2M. Nous nous sommes ainsi procurés des transducteurs Visaton<sup>28</sup>, de même impédance que les haut-parleurs précédemment utilisés (8  $\Omega$ ). À la place d'une membrane conique, ces transducteurs vibraient à travers une surface rigide, destinée à être placée au contact direct d'une surface. Il nous est immédiatement apparu qu'il était nécessaire d'éviter tout contact des transducteurs avec d'autres surfaces que la plaque à vibrer, afin de minimiser la dissipation de l'énergie transmise. Par conséquent, nous avons provisoirement surélevé la plaque à l'aide de quatre supports en carton mousse, permettant de ne pas faire reposer les transducteurs sur notre plan de travail<sup>29</sup>. La figure 12.19 présente le dispositif de vibration ainsi développé.

28. [https://www.thomann.de/fr/visaton\\_ex\\_60\\_s.htm](https://www.thomann.de/fr/visaton_ex_60_s.htm) (consulté le 2 mai 2017).

29. Nous avons également dû développer une solution pérenne d'attache des transducteurs à la plaque. Les modèles de transducteurs que nous nous étions procurés prévoyaient en ce sens quatre points d'attache, permettant une fixation par vis. Cependant, compte tenu de la friabilité du polystyrène utilisé pour la réalisation de notre plaque vibrante, l'emploi de vis n'était pas envisageable : nous avons donc fixé les transducteurs sur des tiges filetées, courant depuis l'intérieur de la plaque jusqu'à sa surface inférieure. Installées lors de la fabrication de la plaque vibrante, de manière antérieure à l'assemblage des différentes couches qui la composent (polystyrène, carton mousse et, comme nous le verrons plus bas, aluminium), ces tiges étaient bloquées en translation dans la plaque par des pièces spécifiques, prises « en sandwich » entre les couches de polystyrène et de carton mousse.

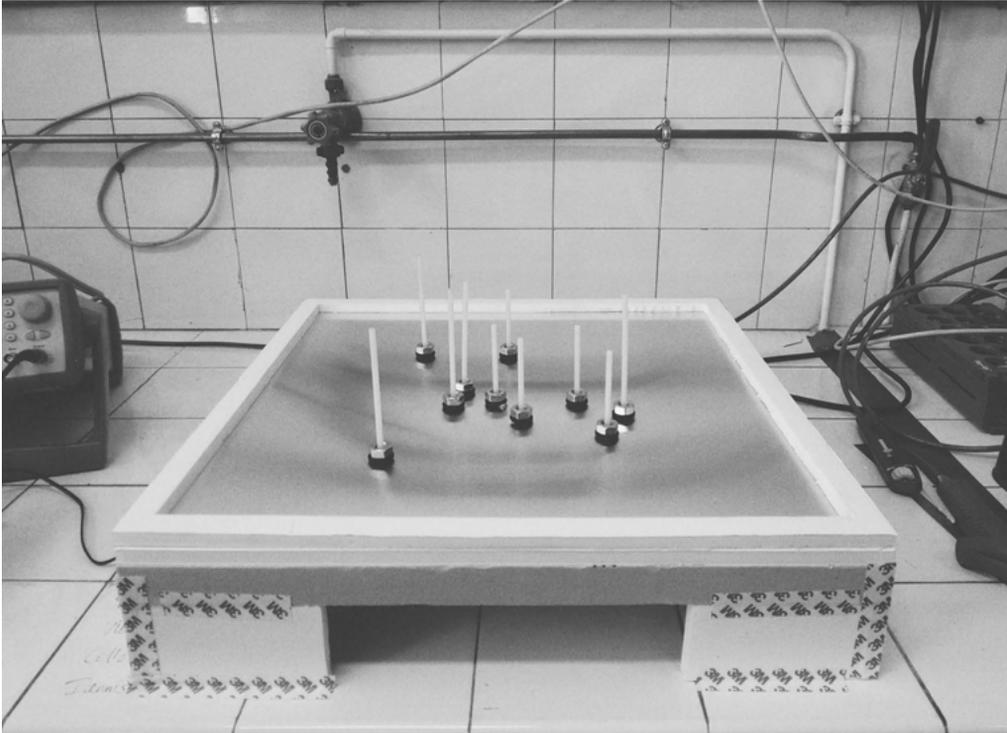


Fig. 12.19 — Seconde version du dispositif de vibration, portant plusieurs exemplaires du prototype de marcheur n° 7.

Les expériences réalisées avec ce dispositif ont fourni des résultats satisfaisants. À moitié de la puissance maximale de l'amplificateur, l'intensité des vibrations s'est montrée suffisante pour induire un mouvement directionnel des marcheurs. Nous n'avons pas relevé la présence de « zones mortes » à la verticale des transducteurs, ce qui nous a conduit à penser que le comportement observé avec la version précédente de notre dispositif résultait avant tout d'un défaut de couplage entre les haut-parleurs et la plaque. L'élimination de ces « zones mortes » nous a permis d'observer le mouvement des marcheurs sur une plus longue durée, et de noter certaines tendances d'ensemble. Nous avons tout d'abord remarqué que ce mouvement n'était pas réellement rectiligne : les marcheurs étaient toujours animés d'une rotation résiduelle sur eux-mêmes, conduisant à une modification progressive de leur direction de déplacement au cours du temps. Nos discussions avec Olivier Dauchot nous ont permis de comprendre qu'une telle tendance était inévitable compte tenu de la conception de notre dispositif : obtenir un mouvement quasi-rectiligne, tel que celui observé dans l'expérience originale d'EC2M, aurait notamment demandé un degré d'homogénéisation des vibrations du plateau que nous ne pouvions espérer atteindre. Cependant, tout en reconnaissant ces limitations, impliquées par

la nature même de notre démarche, nous avons constaté une seconde tendance « anormale » du mouvement de nos marcheurs, qu'il nous a cette fois paru possible de corriger. Au bout d'un temps assez long, les trajectoires des marcheurs semblaient en effet toutes converger vers un même bord de la plaque, ce qui laissait penser que l'ensemble de notre dispositif de vibration souffrait d'un défaut d'horizontalité. Afin de chercher à limiter cet effet, nous avons doté notre dispositif final, présenté dans la section suivante, d'un mécanisme permettant d'ajuster précisément le niveau de la plaque.

Nos tests nous ont par ailleurs permis d'identifier une plage de fréquences adaptée à la nouvelle configuration de notre plaque vibrante : nous ainsi été amenés à travailler dans une plage de 80 à 100 Hz, en raison d'une rapide dégradation de la qualité du déplacement des marcheurs en dehors de cet intervalle. À nouveau, nous avons pu constater que les vibrations des marcheurs étaient les plus importantes dans la partie basse de cette plage, avec un pic autour de 85 Hz. Dans la mesure où le rendement supérieur des transducteurs nous permettait désormais de tester ce comportement vibratoire avec une population d'une dizaine de marcheurs, nous avons pu constater une forte augmentation du niveau sonore de notre dispositif autour de cette fréquence, causée par les chocs successifs de la base des marcheurs avec la plaque. À la différence du signal sonore régulier utilisé pour la vibration, ce son, évoquant un grondement ou le tremblement d'une structure, nous a paru intéressant par sa portée symbolique, susceptible d'entrer en résonance avec la connotation politique du comportement auto-organisateur mis en œuvre dans le dispositif.

À la suite de la série d'expériences présentées dans cette section, nous disposions de suffisamment d'éléments pour envisager la conception d'une version « finalisée » de notre dispositif. La section suivante présente les choix de conception opérés en ce sens, ainsi que la démarche suivie pour l'expérimentation des aspects liés à la projection lumineuse.

### 12.3 Production du dispositif final

Dans la mesure où les développements dont nous souhaitons rendre compte dans cette section concernent des aspects de « finalisation » de notre dispositif, et n'apportent pas de nouveaux éléments relatifs à la compréhension empirique des mécanismes physiques impliqués dans le fonctionnement de ce dernier, nous faisons ici le choix d'un format de présentation plus synthétique que celui adopté dans la section précédente.

Le travail nécessaire à la finalisation de notre dispositif a été distribué sur une période courant de février 2015 à mars 2016. La première étape de ce travail a visé à déterminer la viabilité de la solution de projection lumineuse envisagée : une lampe LED de forte puissance, installée sur le dispositif lui-

même, à proximité du plateau vibrant. En optant pour cette configuration, nous cherchions d'une part à ne pas nous trouver confrontés au problème d'une interruption du champ lumineux par le passage d'un spectateur, susceptible de se produire si la LED avait été placée quelques mètres en arrière du plateau. D'autre part, il semblait logique de chercher à placer la lampe au plus proche des marcheurs, afin d'obtenir une projection d'ombres de la plus grande dimension possible. Sur cette base, nous avons cherché à évaluer rapidement la qualité de la lumière produite par une source de type LED, ainsi que le type d'effet lumineux susceptible d'émerger par l'illumination de notre dispositif dans son ensemble.

Dans cette optique, nous nous sommes procurés une torche équipée d'une cellule LED de type Cree XM-L T6<sup>30</sup>, dotée d'une puissance d'environ 1000 lumens. Nous avons ainsi pu rapidement mettre à l'épreuve cette solution d'éclairage sur notre prototype de plateau vibrant, et avons été convaincus par la qualité de la lumière produite. La LED nous par ailleurs semblé capable de créer des ombres de taille satisfaisante une fois positionnée au plus proche du plateau vibrant, pour une distance raisonnable par rapport à la surface de projection. Cependant, ces premières expérimentations ne permettaient pas réellement d'évaluer l'effet esthétique produit par la projection lumineuse dans son ensemble, ni d'estimer ses interactions visuelles avec le reste du dispositif. Nous souhaitions notamment, avant de valider définitivement les dimensions du plateau vibrant, être capables d'estimer les contrastes de tailles et de teintes entre les ombres proches et lointaines des marcheurs, une caractéristique dépendant directement de la profondeur de la zone à projeter, c'est-à-dire des dimensions du plateau. Afin d'estimer l'effet induit par différentes configurations possibles du plateau, nous avons réalisé une série de visualisations 3D d'un scénario d'exposition « réaliste » de notre dispositif, à l'aide d'un moteur de rendu approximant les lois physiques de la propagation des rayons lumineux.

La figure 12.20 montre l'une des images produites dans ce cadre, obtenue pour des dimensions du plateau égales à celles précédemment adoptées dans nos expériences (500 × 500 mm). Cette production d'images numériques a joué pour nous le rôle d'une *simulation* du futur comportement lumineux de notre dispositif : satisfaits par le résultat obtenu pour un plateau de 500 × 500 mm, nous avons ainsi décidé de baser notre dispositif final sur ces dimensions, dont nous avons par ailleurs déjà éprouvé la viabilité sur le plan mécanique. Le processus de travail adopté ici s'inscrit dans la continuité de l'idée, avancée dans le chapitre 11, selon laquelle l'utilisation de techniques de simulation numériques

---

30. [http://www.miniinbox.com/fr/ultrafire-sk-98-zoom-mise-au-point-reglable-3-mode-cree-xm-l-t6-led-flashlight-10w-1000lm-1x18650\\_p509341.html](http://www.miniinbox.com/fr/ultrafire-sk-98-zoom-mise-au-point-reglable-3-mode-cree-xm-l-t6-led-flashlight-10w-1000lm-1x18650_p509341.html) (consulté le 2 mai 2017).



Fig. 12.20 — Simulation du comportement lumineux produit par le dispositif.

peut aujourd'hui représenter une opportunité réelle pour la conception de dispositifs analogiques ; la démarche adoptée dans *Manœuvres*, basée sur l'utilisation de moteurs de rendus « physiques », s'avère ainsi à notre sens susceptible d'être généralisée pour la conception de dispositifs matériels lumineux<sup>31</sup>.

Sur la base des dimensions validées dans ces simulations, nous avons ensuite commencé la production d'une version finalisée de notre dispositif, en réalisant, tout, d'abord, un support destiné à en accueillir le plateau vibrant. Ce support rejoignait une double préoccupation esthétique et mécanique. Esthétiquement, l'enjeu était de doter le dispositif d'une présence visuelle forte

---

31. Cette capacité *prédictive* des moteurs de rendus 3D, par laquelle ces outils s'éloignent radicalement des techniques de représentation traditionnelles, avait déjà été relevée par Georgina Huljich et Marcelo Spina dans un entretien accordé à Todd Gannon à l'occasion de l'exposition *Matters of Sensation*, organisée du 25 septembre au 22 novembre 2008 à la galerie Artists Space de New York : « [L]a possibilité de simuler des effets matériels, de les augmenter et de les tester sur l'ordinateur, n'était pas exploitée il y a peu de temps encore. Même si cette possibilité existait depuis un certain temps, utiliser la technique du rendu 3D pour expérimenter à un niveau profond, atmosphérique, passait encore hier pour un sacrilège. Cette attitude à l'égard de la manière de communiquer la matérialité dans les rendus 3D semble avoir changé. De plus en plus d'architectes sont intéressés par la possibilité d'étendre la plage d'effets que les matériaux peuvent produire » (Todd Gannon, Marcelo Spina et Georgina Huljich, « Ouch or Oooh? On "Matters of Sensation" », *Log*, n° 17, 2009, p. 100, citation de Marcelo Spina, notre traduction).

tout en épurant son aspect d'ensemble, en assurant, notamment, le masquage de certains des matériaux utilisés dans sa fabrication (comme le polystyrène et le carton mousse). Mécaniquement, il s'agissait avant tout de surélever le plateau vibrant afin, d'une part, que les transducteurs fixés sur sa face inférieure ne se trouvent pas au contact direct de la surface supportant le plateau, et pour permettre, d'autre part, le réglage précis de l'horizontalité de la zone de vibration à l'aide d'un système adéquat.

En lien avec ces objectifs, nous avons conçu un support circulaire, reposant sur trois pieds réglables individuellement en hauteur, et doté en son centre d'une ouverture carrée de mêmes dimensions que le plateau. La figure 12.21 montre une version « nue » de ce support. Le disque principal, de 75 cm de diamètre, est découpé au jet d'eau dans une tôle d'aluminium de 5 mm d'épaisseur (figure 12.22). Quatre pattes en aluminium, également découpées au jet d'eau, sont placées dans les angles de l'ouverture carrée du disque, afin de soutenir le plateau vibrant venant s'y insérer. L'ensemble du support repose sur trois vis, disposées aux sommets d'un triangle équilatéral, dont les extrémités ont été usinées au tour afin d'assurer un contact ponctuel avec la surface d'appui. Accessibles depuis la face supérieure du support, ces vis peuvent être ajustées manuellement afin de régler en trois points l'horizontalité du plateau vibrant ; une fois réglées, un écrou permet de les bloquer en rotation. Outre cet écrou de serrage, les vis coulissent dans des écrous portées par trois boîtiers, fabriqués par impression 3D et installés sous le support : offrant une solution alternative au taraudage direct de l'aluminium du support, ces composants remplaçables préviennent ainsi le risque d'une usure irréversible du mécanisme de réglage de l'horizontalité.

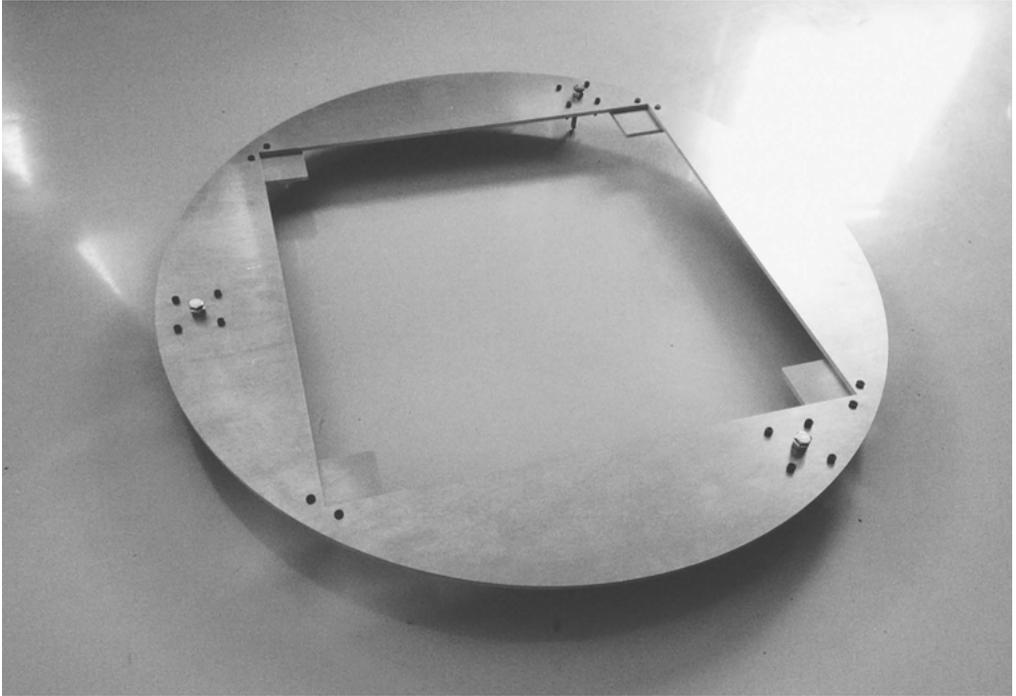


Fig. 12.21 — Support du plateau vibrant.

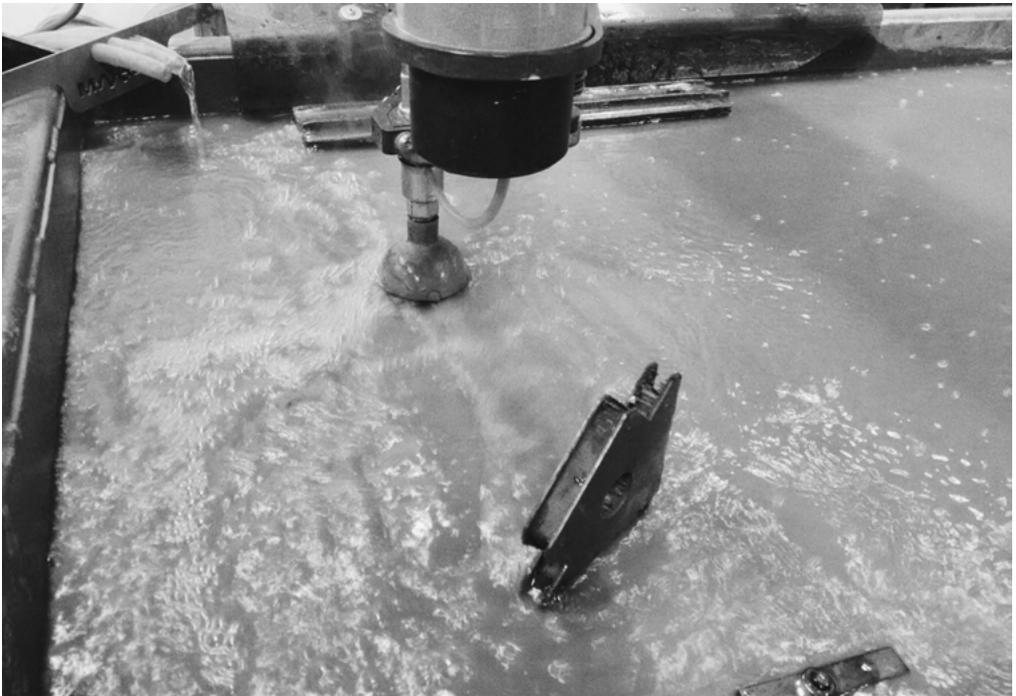


Fig. 12.22 — Fabrication du support par découpe au jet d'eau d'une tôle d'aluminium.

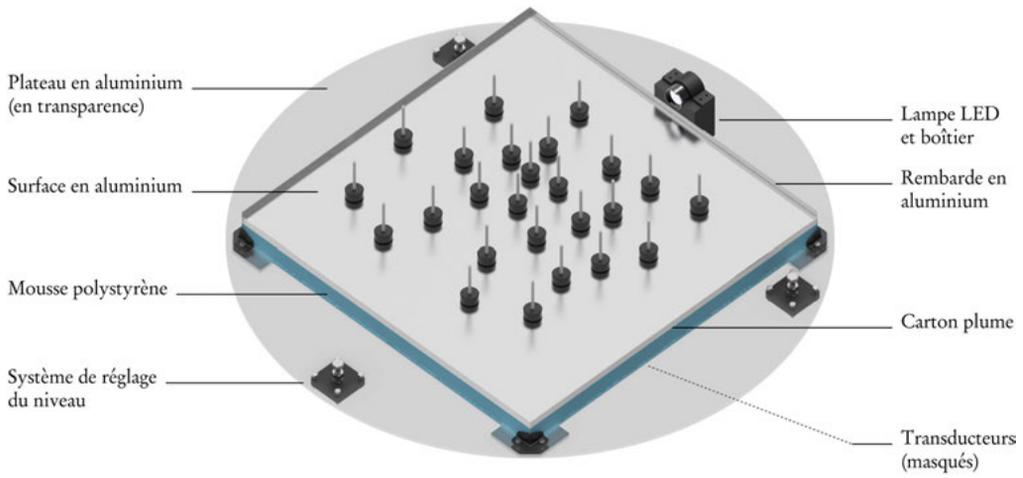


Fig. 12.23 — Vue du dispositif de vibration.



Fig. 12.24 — Vue du modèle final de marcheur.

Le support est également doté d'une rambarde en aluminium, installée le long du périmètre de la zone carrée ouverte en son centre. Cette rambarde vise tout d'abord à retenir les marcheurs au sein de la zone de vibration<sup>32</sup>, et doit donc, pour ce faire, posséder une hauteur supérieure au plateau vibrant, une fois celui-ci installé sur le support. Par sa hauteur, cette rambarde permet également de cacher les côtés du plateau, dotés d'un aspect « brut » lié aux matériaux utilisés (carton mousse et mousse de polystyrène extrudé). La rambarde se compose de quatre bandes d'aluminium de 1 mm d'épaisseur, collées à quatre petites équerres imprimées en 3D, disposées dans les angles extérieurs de l'ouverture centrale du support. Un interstice d'1 mm est ménagé entre la rambarde et cette ouverture, afin d'éviter tout frottement avec le plateau lorsque ce dernier se trouve mis en vibration. La figure 12.23 montre l'ensemble du dispositif réalisé ; le disque circulaire en aluminium y est représenté en transparence, et deux côtés de la rambarde ont été omis, afin de rendre visible le détail de la conception du plateau.

Notre travail d'« habillage » du dispositif nous a également conduit à modifier légèrement le plateau lui-même, en le couvrant, comme montré sur la figure 12.23, d'une plaque en aluminium de 1 mm d'épaisseur. Cette décision visait à harmoniser l'esthétique d'ensemble du dispositif, tout en garantissant la durabilité du plateau : à terme, des « accrocs » pouvaient en effet apparaître sur sa surface supérieure en carton mousse, susceptibles de gêner le mouvement des marcheurs. Nous nous sommes cependant aperçus que l'aluminium, facilement rayable, devenait rapidement marqué des traces des passages successifs des marcheurs. Si cette propriété impliquait de devoir changer l'ensemble du plateau pour obtenir un état de surface vierge, elle annonçait aussi la possibilité intéressante d'« enregistrer », de manière purement analogique, les trajectoires réalisées par les marcheurs sur l'ensemble de la durée d'activation du dispositif.

La figure 12.24 présente le modèle final de marcheur. Nous pouvons tout d'abord y constater la présence d'un élément d'habillage : un cache cylindrique, imprimé en 3D, est utilisé pour masquer certains détails visuels de la base, au premier rang desquels l'écrou M10 utilisé pour le lestage. La configuration géométrique des points de contact de la base avec le sol reste cependant pleinement visible, et appréciable par tout spectateur qui viendrait à examiner la partie inférieure d'un marcheur « prélevé » sur le plateau. En ajoutant un élément d'habillage masquant uniquement la partie supérieure de la base, nous avons ainsi recherché un compromis entre notre volonté de travailler l'aspect visuel du dispositif, et l'impératif de préserver la possibilité d'une appréciation directe par le public de l'un des principaux éléments de son processus de

---

32. Cette rambarde en aluminium se substitue donc à la bordure en carton mousse, dont nous avons précédemment doté le plateau vibrant dans une même optique.

maintenance — le motif géométrique et matériel assurant la programmation matérielle des marcheurs.

Ce dernier modèle de marcheurs a nécessité quelques ajustements mineurs par rapport au prototype auquel nous étions parvenu dans notre première série d'expériences. Nous avons en effet découvert que les tiges filetées en nylon ne se vissaient pas aussi bien que leurs homologues métalliques sur un filetage imprimé directement sur la base des marcheurs : en conséquence, les tiges ne se positionnaient jamais parfaitement à la verticale, occasionnant un rendu visuel insatisfaisant. La solution mise en œuvre pour contourner ce problème est détaillée sur la figure 12.25. Comme le révèle cette vue en éclaté, l'idée d'un vissage direct de la tige sur la base du marcheur a été abandonnée au profit d'un système de stabilisation de la tige basé sur deux écrous, placés sur les faces inférieure et supérieure de la base. L'écrou placé sur la face inférieure vient s'encaster dans une défonce hexagonale, ajoutée à cet effet. La tige est ensuite vissée dans cet écrou par le haut de la base, qu'elle traverse en son centre. Un deuxième écrou est ensuite ajouté pour bloquer la tige en rotation. Pour des raisons d'encombrement, nous avons cherché à faire tenir cet écrou « à l'intérieur » de l'axe de l'écrou de lestage, que nous continuons, quant à lui, à visser sur la base à l'aide d'un filetage imprimé en 3D. Pour cette raison, le diamètre de la tige a dû être légèrement diminué : nos marcheurs portent ainsi, dans leur version finale, une tige de 4 mm de diamètre (et non plus de 5 mm), pour une hauteur de 40 mm.

La figure 12.26 montre enfin la solution retenue pour le système de projection lumineuse. Un support imprimé en 3D, placé contre l'un des côtés de la zone de vibration, supporte la torche LED. Initialement alimentée par piles, la torche est ici soumise à une tension continue de 3,7 V, fournie par un générateur stabilisé<sup>33</sup>.

---

33. <http://fr.farnell.com/tenma/72-8695a/alimentation-3-voies-32v-3a-ajustable/dp/2377176> (consulté le 2 mai 2017).

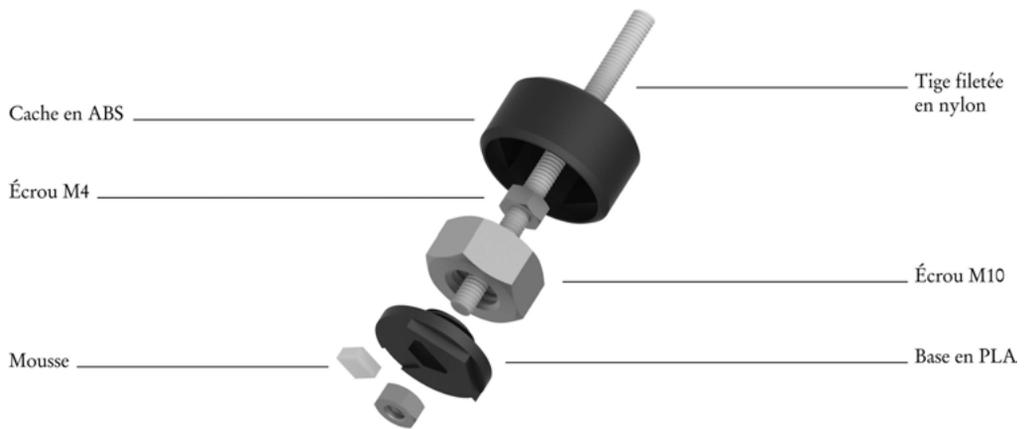


Fig. 12.25 — Vue en éclaté du modèle final de marcheur.

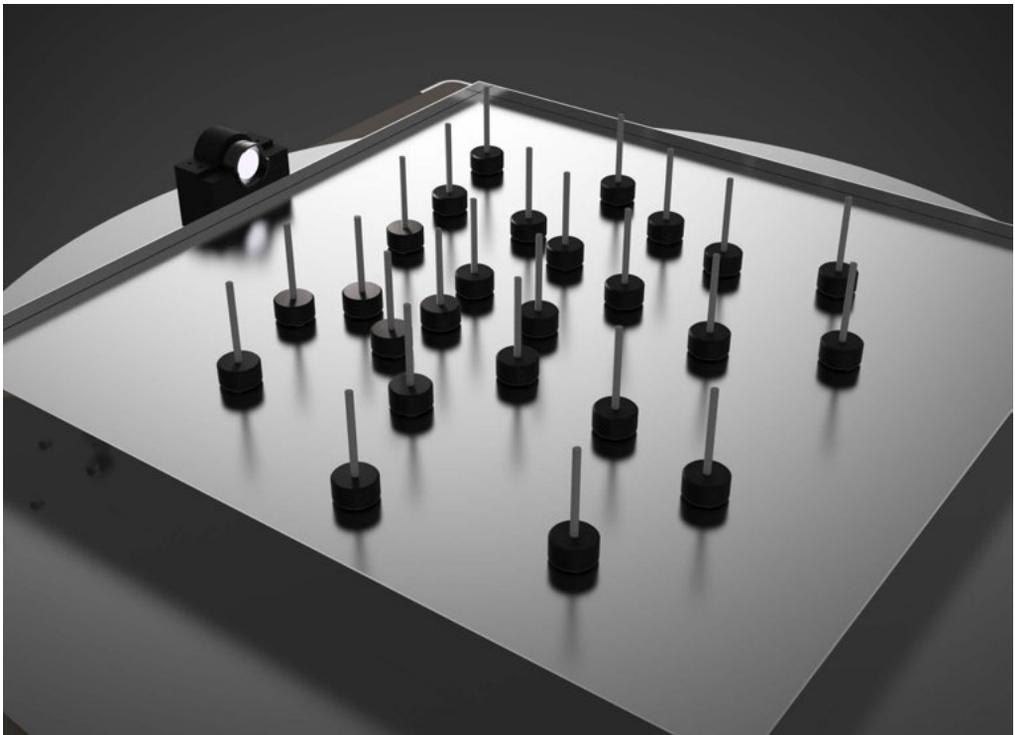


Fig. 12.26 — Vue du plateau vibrant et du système de projection lumineuse.



Fig. 12.27 — Vue d'ensemble du dispositif posé sur sa table.

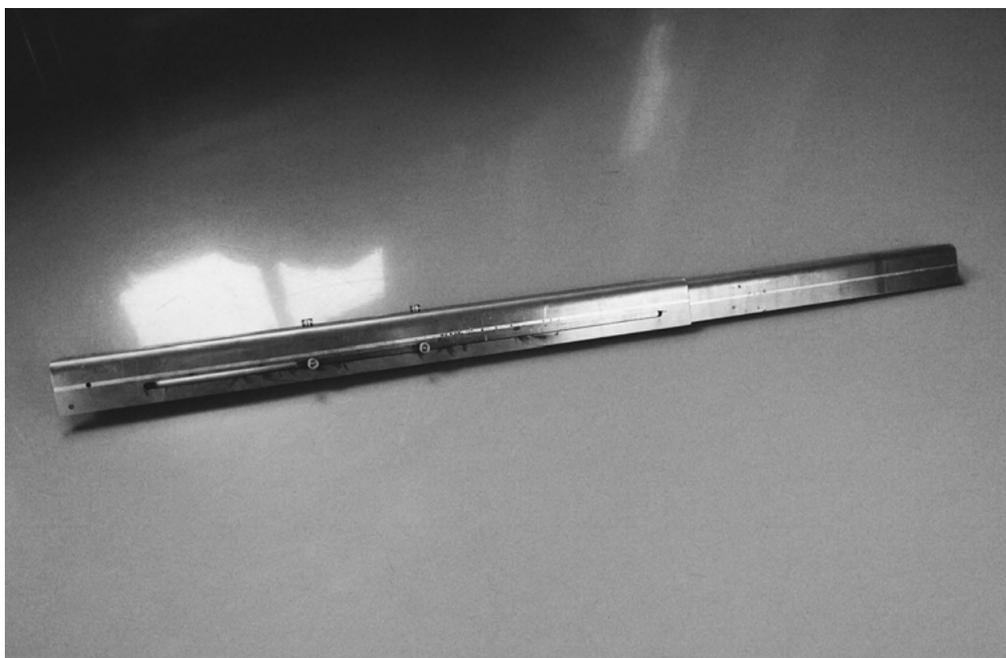


Fig. 12.28 — Pied réglable de la table; la partie munie de glissières, destinée à être vissée sur le plateau, se situe à gauche.

Ces trois axes du développement de notre dispositif finalisé (conception des marcheurs, des systèmes de vibration et de projection) se sont accompagnés d'un quatrième volet visant à réaliser un support d'exposition sur mesure. Afin d'assurer le bon positionnement vertical de la projection d'ombres, et de faciliter la manipulation des marcheurs par le public, il nous a en effet semblé nécessaire de nous doter d'un support d'exposition d'une hauteur supérieure à celle d'une table classique (de l'ordre de 70 cm), présentant une bonne stabilité et permettant l'installation du dispositif sur des sols irréguliers. Afin de répondre à ces problématiques tout en maintenant une cohérence visuelle d'ensemble, nous avons conçu la table présentée sur la figure 12.27. Cette table se compose d'un plateau en contreplaqué bouleau de forte épaisseur (40 mm), choisi afin de minimiser la transmission mécanique de vibrations des transducteurs vers la table, ainsi que 4 pieds réglables indépendamment en hauteur, permettant un ajustement de la position verticale du plateau entre 72 et 115 cm. Ces pieds ont été obtenus par pliage d'un profil découpé au jet d'eau dans une tôle d'acier de 5 mm d'épaisseur. Ils se composent d'un guide vissé au plateau, muni d'un système de glissières permettant le coulissage de la partie basse du pied; des perçages taraudés, réalisés dans cette dernière partie, permettent d'immobiliser l'ensemble par ajout de quatre vis traversant les deux composantes de l'assemblage. Le verrouillage en hauteur de chaque pied peut être réalisé d'une seule main par serrage de ces vis, une propriété pensée pour faciliter l'installation de la table. La figure 12.28 présente l'un de ces pieds réglables.

#### 12.4 Expérimentation publique et discussion

Le comportement de notre dispositif finalisé a d'abord été expérimenté « en laboratoire », dans une série de tests réalisés à l'ESPCI en mars 2016. Ces expériences nous ont avant tout permis de confirmer la capacité de ce nouveau dispositif à induire des mouvements directionnels au sein de la population de marcheurs : la nature fortement couplée du système en vibration impliquait en effet que tout changement mécanique apporté par rapport à notre prototype précédent soit soumis à une nouvelle phase de validation. En particulier, la possibilité de voir se développer une transmission parasite de vibrations du plateau vers son support en aluminium, et, à travers celui-ci, vers la table réglable en hauteur, ne pouvait être entièrement éliminée *a priori*, bien que nous ayons cherché à minimiser autant que possible cette éventualité par nos choix de conception.

En pratique, le dispositif finalisé s'est avéré fidèle au type de comportement observé sur le dernier de nos prototypes : nous avons été capables d'induire des déplacements satisfaisants des marcheurs au sein d'une plage de fréquences étendue de 80 à 100 Hz, avec un pic du comportement vibratoire observé au-

tour de 85 Hz. Le phénomène de transmission de vibrations au support en aluminium du plateau, ainsi qu'à la table supportant l'ensemble du dispositif, nous a semblé très faible : en réalité, le dispositif finalisé nous a paru améliorer encore la qualité du couplage entre les transducteurs et le plateau par rapport à notre dernier prototype. Une population d'une vingtaine de marcheurs pouvait ainsi être mise en vibration sans difficulté, pour un réglage d'amplification inférieur à celui que nous avons préalablement été conduits à utiliser. À aucun moment, la puissance de l'amplificateur adopté, pourtant modeste, n'a constitué un facteur limitant pour nos expériences. Parallèlement à ces améliorations, un point problématique de notre prototype précédent n'a pu être corrigé : nous avons ainsi continué à observer, au bout d'un certain temps de fonctionnement, une convergence des trajectoires des marcheurs vers l'un des côtés du plateau. Le système d'ajustement de l'horizontalité ne nous a pas permis de contrer cet effet : plutôt qu'un défaut d'horizontalité de la table, il est ainsi probable qu'une légère différence dans la puissance délivrée par les transducteurs, induite par le schéma de câblage utilisé pour les relier à l'amplificateur, en soit à l'origine. Ce « biais » observé sur les trajectoires des marcheurs constitue à l'heure actuelle le principal défaut de notre dispositif ; en raison de son amplitude minime, nous avons cependant choisi d'en remettre la correction à une étape de développement ultérieure à cette thèse.

Les projections lumineuses réalisées par notre dispositif se sont montrées conformes à nos attentes : les figures 12.29 et 12.30 présentent deux images obtenues lors de nos essais « en laboratoire ». Ces essais ont, en moyenne, été réalisés avec une population d'une vingtaine de marcheurs. Ce nombre étonnera peut-être par sa valeur significativement plus faible que celle des populations utilisées dans l'expérience originale de l'équipe EC2M (de l'ordre de plusieurs centaines de marcheurs). Afin de justifier notre choix de travailler avec une population ainsi restreinte, il convient tout d'abord de rappeler que si nous n'avons pas augmenté de manière significative la taille de notre plateau par rapport à l'expérience originale d'EC2M, nous avons en revanche multiplié par 5 le diamètre de nos marcheurs (passant de 4 à 20 mm). Ce point nous empêche en réalité d'effectuer une comparaison directe entre les nombres de marcheurs impliqués dans notre dispositif et dans l'expérience originale, et nous incite à recourir à la notion de fraction surfacique d'occupation du plateau.

Définie comme le rapport de la surface occupée par l'ensemble des marcheurs à la surface totale du plateau, la fraction surfacique constitue un « paramètre de contrôle naturel<sup>34</sup> » du mouvement collectif des marcheurs : elle fournit ainsi un indicateur fiable du type de comportement exhibé par le système.

---

34. Julien Deseigne, Olivier Dauchot et Hugues Chaté, « Collective Motion of Vibrated Polar Disks », *op. cit.*, p. 3. Notre traduction.

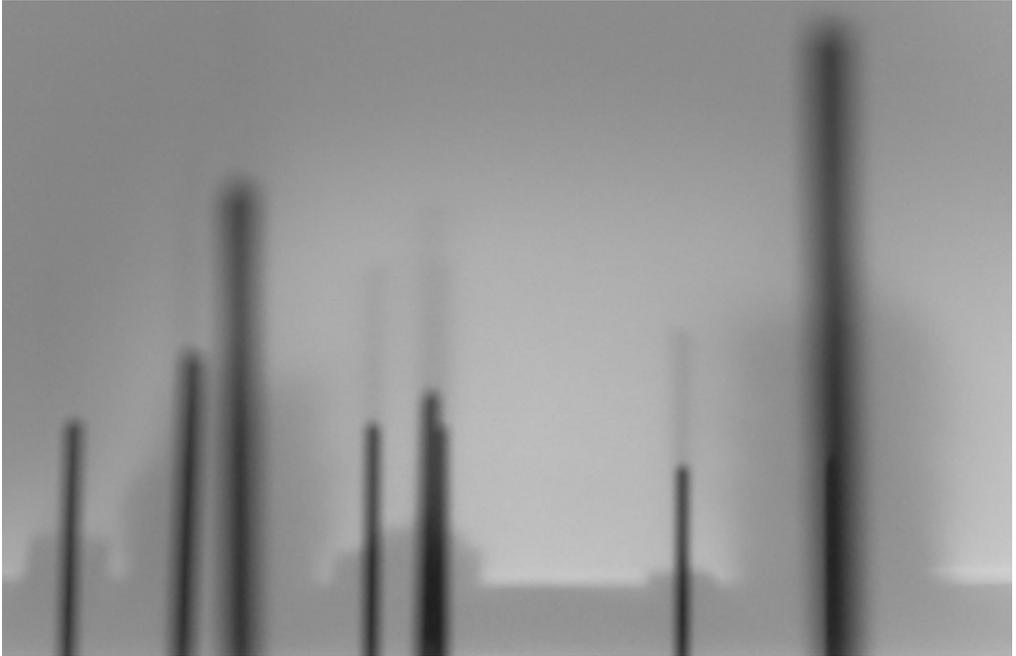


Fig. 12.29 — Image lumineuse produite par le dispositif.

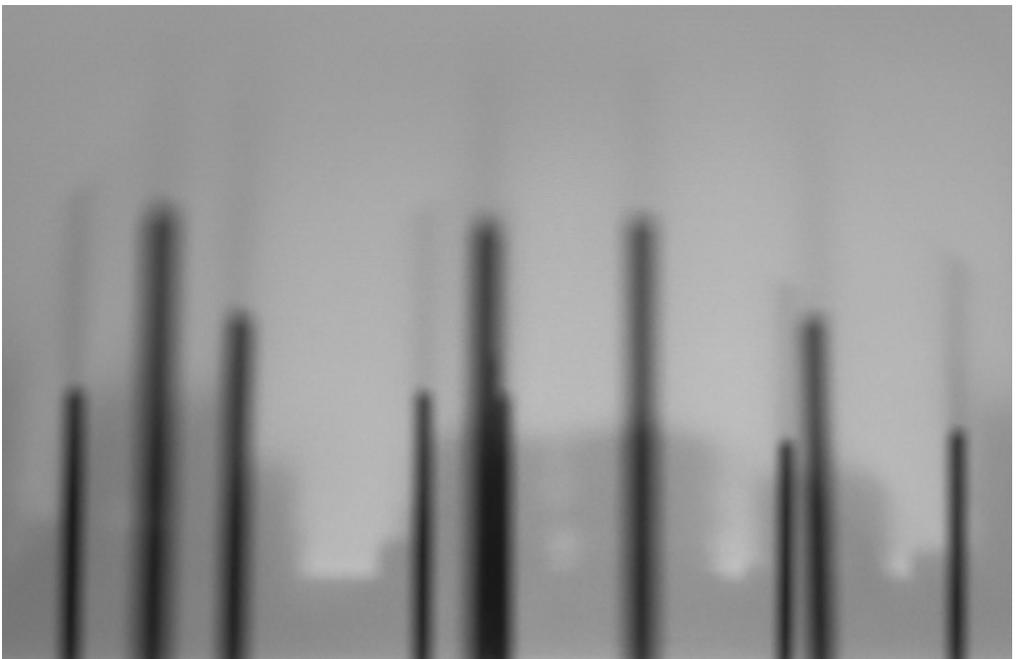


Fig. 12.30 — Image lumineuse produite par le dispositif.

En se basant sur les valeurs de fraction surfacique typiques de l'expérience originale d'EC2M (de 25 à 40 %), nous pouvons estimer le nombre de marcheurs nécessaire à la reproduction, dans notre dispositif, de comportements du même type que ceux démontrés dans cette expérience. Avec une aire totale du plateau de  $500 \times 500 = 250 \times 10^3 \text{ mm}^2$ , et une aire par marcheur de  $\pi \times (20/2)^2 \simeq 314 \text{ mm}^2$ , une population de  $0,25 \times (250 \times 10^3)/314 \simeq 199$  marcheurs serait requise pour obtenir une fraction surfacique de 25 %. Quoique légèrement inférieur aux populations typiques de l'expérience originale d'EC2M, ce nombre nous a semblé trop élevé pour donner lieu à une projection lumineuse « utilisable » : afin de ménager la possibilité réelle d'une « oscillation du point de vue » du spectateur entre le dispositif mécanique et sa projection, il nous paraissait en effet central qu'un lien visuel puisse être établi à tout moment entre la structure de la projection lumineuse et la structure matérielle créée sur le dispositif, un objectif qu'il aurait été difficile d'atteindre en présence d'une image trop dense, créée par une population trop importante de marcheurs. Nous avons donc décidé, par conséquent, de réduire significativement la fraction surfacique utilisée dans notre dispositif par rapport à celle mise en œuvre dans l'expérience originale d'EC2M. Ainsi, si les principes physiques impliqués dans cette expérience se retrouvent bien dans notre dispositif, nous avons naturellement été conduits à expérimenter d'autres formes de comportements auto-organiseurs que ceux initialement mis en évidence par Olivier Dauchot et son équipe.

Cette relative indépendance de notre dispositif par rapport à son « modèle » ne constituait en rien un point rédhibitoire, dans la mesure où nous nous étions inscrits, dès le départ, dans la logique de développement d'une nouvelle « expérience », et non d'une simple transposition du dispositif original de l'équipe EC2M. Néanmoins, pour rester fidèle à l'ambition artistique initiale de notre projet, il s'avérait essentiel que notre dispositif puisse donner lieu au même type de *projections mentales* que celles qui nous avaient été inspirées lors de nos premiers contacts avec l'expérience d'Olivier Dauchot. Ces projections, à travers lesquelles nous avons pu prêter des résonances politiques au comportement collectif des marcheurs, reposaient d'abord sur le *mouvement* de ces derniers, plutôt que sur leur forme. Il importait donc que le mouvement de nos marcheurs, par sa *qualité* même, puisse donner naissance à ce type d'associations symboliques.

Sans engendrer des mouvements collectifs de même ampleur que ceux observés dans l'expérience originale d'EC2M, le comportement des marcheurs mis en œuvre dans notre dispositif nous a permis d'observer des formes localisées d'auto-organisation : le système formé par nos marcheurs possède ainsi une nette tendance à former spontanément des groupes de deux à cinq unités, capables de maintenir leur cohésion sur une durée plus ou moins longue. Opérant à une autre échelle que les comportements collectifs démontrés dans

l'expérience originale, ces situations s'avèrent tout aussi intéressantes sur le plan symbolique. Les possibilités de projection mentale trouvent en effet à s'exprimer, dans ce cadre, à travers un imaginaire plus « intimiste » que celui que nous avons été spontanément conduits à mobiliser lors de nos contacts avec l'expérience originale. Dans notre dispositif, la formation de paires de marcheurs peut ainsi évoquer, selon la qualité du mouvement de chacun des « partenaires », des attitudes telles que la danse, l'évitement, ou une confrontation physique en face-à-face — de manière non dissimilaire aux intentions spontanément prêtées aux objets dans l'expérience de Heider et Simmel<sup>35</sup>, que nous évoquions dans la section 6.2. Les regroupements de « petite taille » opérés par notre dispositif rendent ainsi presque inévitable l'emploi de termes tels que « contournement », « confrontation », ou « accompagnement » dans la description des comportements adoptés par les marcheurs par rapport à leurs semblables, ce que nous avons notamment pu constater lors de nos discussions de travail avec Olivier Dauchot. En dépit de la réduction du nombre de marcheurs imposé par les contraintes esthétiques propres à l'utilisation d'une projection lumineuse, il nous a ainsi semblé que le comportement obtenu dans *Manœuvres* se montrait suffisamment riche pour rester fidèle à notre idée originale d'une œuvre visant à mettre en regard un processus de projection mentale, inspiré par une forme matérielle d'auto-organisation, avec le mécanisme optique d'une projection lumineuse.

Après avoir constaté, *in labo*, la possibilité d'une transposition symbolique des comportements exhibés dans notre dispositif, il convenait à présent d'en faire l'expérience *in vivo*, dans une mise à l'épreuve *en public* de ces comportements. Rattachée à nos réflexions sur la notion d'une œuvre dotée d'une capacité à « auto-maintenir » ses relations avec le public, *Manœuvres* devait ainsi nous permettre de mettre à l'épreuve, de manière empirique, une possible approche de conception de processus de maintenance, basée sur la programmation matérielle du comportement d'un système auto-organisateur. Nous attendions ainsi de la première présentation publique de notre dispositif qu'elle confirme la capacité de ce dernier à engager le public dans une relation durable, réciproque et réflexive, avec deux manifestations sensibles du comportement que nous avons « programmé », correspondant à deux régimes productifs liés de manière analogique : la production de structures matérielles sur le plateau vibrant, et la création d'images lumineuses. Cette double manifestation du comportement auto-organisateur constitue une spécificité de notre dispositif par rapport aux exemples que nous avons examinés dans le chapitre 11, comme le dispositif électrochimique conçu par Gordon Pask. Outre sa « justi-

---

35. Fritz Heider et Marianne Simmel, « An Experimental Study of Apparent Behavior », *op. cit.*

fication » dans le cadre du propos artistique propre à *Manœuvres*, l'emploi d'un dispositif de projection rejoint donc ici une fonction stratégique : comme nous le verrons dans un instant, il nous a paru jouer un rôle central dans le développement, au sein du public, d'un rapport réflexif aux processus de maintenance « embarqués » dans le système de marcheurs — une qualité renvoyant à notre idée initiale d'amener, par la projection lumineuse, la possibilité d'un « changement de point de vue » du spectateur sur le dispositif.

Notre expérimentation publique de *Manœuvres* s'est déroulée le 23 juin 2016 à l'Espace Pierre-Gilles de Gennes, un lieu d'expositions, d'activités et d'innovation rattaché à l'ESPCI (figure 12.31). Nous avons fait le choix, pour cette première présentation publique, d'un format temporel plus proche de celui de la performance, en conviant le public à expérimenter le dispositif sur une durée de quelques heures. Ce format s'imposait naturellement par la volonté de marquer la fin de notre période de résidence à l'ESPCI, et de présenter le résultat de notre collaboration avec Olivier Dauchot dans un cadre institutionnel lié au laboratoire de ce dernier ; il ne saurait cependant définir la situation « type » dans laquelle nous envisageons, à l'avenir, de présenter ce dispositif. Il convient, à ce titre, de souligner que *Manœuvres* a été conçu en priorité dans la perspective d'une présentation « en exposition » — un contexte dont nous avons rappelé, dans la section 8.2, les enjeux pratiques en termes de maintenance, et que nous avons conservé en tant que référence dans notre discussion de la notion de production participative au cours des chapitres 9 et 10. De fait, bien que nous ayons adopté le format temporel d'une « performance » pour notre première présentation de *Manœuvres*, notre présence et notre comportement au cours de cet événement n'ont pas été différents de ceux que nous aurions adoptés lors de l'ouverture d'une exposition de plus longue durée : en d'autres termes, nous avons largement « laissé » le dispositif à lui-même, ainsi qu'aux interactions du public. Cette première présentation publique nous a en ce sens fourni l'occasion de nous placer, en quelque sorte, en position d'« observateur », afin d'apprécier la qualité des relations induites — et *maintenues* — entre public et dispositif.

Cette remarque appelle une précision quant à la nature des observations que nous souhaitons livrer à présent. Cette thèse ne prétend en aucun cas s'inscrire dans une démarche de sociologie des usages, ou d'ergonomie : il ne nous appartient donc pas de livrer une *analyse* des comportements adoptés par le public dans son interaction avec notre dispositif. Nous nous bornerons par conséquent ici à constater la capacité de ce dispositif à induire une forme de relation « auto-maintenue » avec son public, et à souligner certains points qui, à notre sens, nous paraissent démontrer la viabilité de notre idée, annoncée dans la section 11.5, de la construction d'une situation d'interaction réflexive par l'implication physique directe des spectateurs dans les opérations de maintenance d'un dispositif praticable.



Fig. 12.31 — Expérimentation publique de *Manœuvres* à l'Espace Pierre-Gilles de Gennes, le 23 juin 2016.

Notre première observation entend d'abord appuyer l'idée selon laquelle la situation productive induite par *Manœuvres* peut effectivement être qualifiée d'auto-maintenue. En impliquant le public, invité à manipuler directement le système physique de marcheurs, dans un processus de production continu de structures matérielles, *Manœuvres* rejoint dans son principe même le point central de notre notion d'auto-maintenance : la relation entre public et dispositif, constitutive de l'unité de l'œuvre, se trouve ici « stabilisée » (maintenue), à tout moment, par les structures mêmes que cette relation contribue à produire. Cette adéquation « de principe » entre l'œuvre et la notion d'auto-maintenance a pu être confirmée empiriquement lors de notre expérimentation publique, à travers la vérification de notre hypothèse, avancée dans la section 11.5, d'une possible « diffusion » de l'auto-organisation *locale* du dispositif (autrement dit, du comportement auto-organisateur du système de marcheurs) vers l'ensemble de son milieu environnemental (c'est-à-dire, notamment, du public). Plus précisément, nous avons été frappés, dans nos observations, par la capacité du « système » de l'œuvre (spectateurs et dispositif) à se *structurer* spontanément à plusieurs échelles, de la formation de groupes de marcheurs sur la surface du plateau vibrant, à la formation de rassemblements de spectateurs autour du dispositif. Nous avons ainsi pu constater que, de même que le système de marcheurs se trouvait amené, au cours du temps, à s'auto-organiser, l'ensemble des spectateurs interagissant avec ce système se « structurait » rapidement en diffé-

rents groupes, caractérisés par des qualités distinctes de relations avec le dispositif. Certains spectateurs s'engageaient ainsi dans un processus de manipulation directe des marcheurs, tandis que d'autres observaient le résultat des actions réalisées par ce premier groupe sur la projection lumineuse. Ces deux groupes coexistaient en général à proximité du dispositif : si les « manipulateurs » se trouvaient directement impliqués dans l'action, les « observateurs » tendaient en effet à rester proches du dispositif afin de pouvoir comparer, par une rapide circulation du regard, les évolutions respectives du système physique de marcheurs et de l'image projetée. Un troisième groupe, que nous pourrions qualifier d'« observateurs distants », tendait à se former un peu plus en retrait, et semblait apprécier à la fois le fonctionnement mécanique du dispositif et les interactions des autres spectateurs avec celui-ci.

Ces différentes descriptions, quoique trop approximatives pour constituer un véritable travail d'observation, rendent malgré tout compte de plusieurs degrés de structuration du système de l'œuvre. L'interaction entre ces différents degrés de structuration se pose elle-même comme une condition de la maintenance des relations productives du système : un spectateur, observant l'action d'un ami, peut ainsi par exemple décider de manipuler à son tour le dispositif. C'est ainsi par l'*ensemble* de ses différents niveaux de structuration que le système de l'œuvre s'avère capable de s'auto-maintenir, c'est-à-dire de « régénérer », en continu, les conditions d'une relation esthétique et pratique entre spectateurs et dispositif : comme nous venons de le noter, les relations entre spectateurs jouent notamment un rôle important dans la capacité d'auto-maintenance du système. Cependant, il convient de souligner le rôle central d'« amorce » joué par le système physique de marcheurs en regard de l'établissement d'une première forme de structuration du système, d'une première relation entre public et dispositif : c'est en effet en se « donnant à voir » dans un premier temps de manière autonome que le comportement des marcheurs peut inciter les spectateurs à s'emparer de la capacité d'action qui leur est proposée. Nous retrouvons ici l'idée d'une « diffusion » du comportement auto-organisateur local du dispositif vers l'ensemble de son environnement : c'est d'abord en se présentant comme un élément *en cours de structuration* que le dispositif peut amorcer la structuration d'ensemble du système de l'œuvre (public et dispositif).

Cet effet de « diffusion », présenté comme une méthode générique dans la section 11.5, nous intéresse tout particulièrement dans le cadre de *Manœuvres*, car il traduit une forme de réalisation effective de l'hypothèse d'une *agentivité* du système de marcheurs, implicite dans notre tendance à l'associer symboliquement à une foule, c'est-à-dire à un ensemble d'acteurs humains. En effet, bien que les marcheurs ne soient de toute évidence pas dotés d'une forme *intentionnelle* d'agentivité, l'engagement physique du public avec le dispositif constitue un processus propre à structurer, comme nous l'avons vu, l'ensemble

du « groupe » des spectateurs. Les marcheurs se trouvent ainsi dotés d'une capacité d'action réelle sur leur environnement immédiat, confirmant, en ce sens, notre tendance originale à leur prêter une forme d'agentivité. C'est donc également en vertu de cette « progression » du domaine d'exercice de l'agentivité des marcheurs (non plus simplement limitée au plateau vibrant, mais prise désormais dans des interactions structurantes avec le public) que nous pouvons parler, à notre sens, d'une « diffusion » du comportement du dispositif vers l'environnement du public. Le principe de projection lumineuse, dont nous avons eu initialement l'intuition en tant qu'élément permettant d'interroger les rapports entre le comportement humain et celui des marcheurs, occupe, de fait, un rôle central dans cette « diffusion » : opérant un premier déplacement effectif du champ d'action des marcheurs hors des frontières physiques du dispositif, il présente les silhouettes de ces derniers à échelle humaine, suggérant, par la connotation anthropomorphique introduite par ce changement de perspective, l'idée selon laquelle le système en mouvement pourrait être, lui aussi, doté d'une forme d'agentivité.

Ces observations, venant appuyer l'idée d'une stabilisation « auto-maintenue » des relations entre public et dispositif, doivent être complétées par une discussion de la portée *réflexive* des interactions réalisées par les spectateurs dans le cadre de ce processus d'auto-maintenance. De même que la réflexivité renvoie, dans le champ de la pensée, à la notion d'une « [r]éflexion se prenant elle-même pour objet<sup>36</sup> », il s'agit ici de s'interroger sur les « prises » offertes aux spectateurs pour que leur propre participation, tout en contribuant effectivement à la réalisation des processus de maintenance « embarqués » dans le dispositif, puisse donner lieu à une interrogation portant sur la nature même de ces processus. Avant toute chose, il convient de remarquer que cet objectif de réflexivité, que nous avons affirmé de manière générale dans les discussions menées au cours des chapitres 9 et 10, se révèle au cœur de l'ambition artistique initiale de *Mancœuvres* : nous ne souhaitons en effet pas simplement proposer un dispositif mécanique « manipulable », mais, par le « changement de perspective » induit par la projection lumineuse, poser les conditions d'une interrogation réflexive du rapport même — symbolique ou objectif — que les spectateurs seraient amenés à développer avec ce dispositif. Il était donc particulièrement important de chercher à concevoir un processus de maintenance offrant, dans le moment même de son engagement avec le public, les conditions du développement d'un regard réflexif sur ses opérations.

Si chacune des composantes du dispositif — système matériel de marcheurs et image lumineuse — contribue indéniablement, par ses qualités es-

---

36. [Anon.], « Réflexivité », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/reflexivite> (consulté le 4 mai 2017).

thétiques propres, à l'émergence d'une lecture symbolique, le principe même d'une manipulation directe des marcheurs par le public peut ramener l'expérience du dispositif sur une dimension objective, pour ne pas dire instrumentale. Cette possibilité de manipulation directe introduit en effet la possibilité d'*expérimenter* le dispositif, dans le sens « scientifique » du terme : non pas simplement d'en faire l'expérience, mais d'en mettre à l'épreuve les principes physiques, d'observer l'effet d'une modification *contrôlée* de l'un ou l'autre de ses paramètres.

Cette possibilité de mise à l'épreuve se traduit, tout d'abord, au niveau de la projection lumineuse : en manipulant directement les marcheurs, il devient possible d'objectiver le rapport implicite entre image projetée et configuration du plateau, en déterminant, pour ainsi dire, « qui se projette sur quoi ». À ce premier type de rapport objectif, induit par le principe analogique même de la projection lumineuse, s'ajoute la possibilité plus fondamentale d'une objectivation du mouvement physique des marcheurs, par la capacité du spectateur de les repositionner, « à la main », sur le plateau où ils évoluent. Cette possibilité s'avère, au demeurant, beaucoup moins « banale » que celle d'une mise à l'épreuve « en direct » des effets visuels offerts par la projection lumineuse. Peu d'œuvres praticables relevant d'une production de structures matérielles se montrent en effet aussi « librement expérimentables » que *Manœuvres* : souvent basées sur des systèmes de motorisation, de telles œuvres sont en général peu adaptées à une exploration ouverte de leurs comportements hors des cadres prévus par leurs concepteurs. Par contraste, le principe purement analogique de génération des mouvements à l'œuvre dans notre dispositif, basé sur un principe de programmation matérielle des marcheurs, nous permet de mettre à disposition du public des objets relativement peu fragiles, capables d'être librement mis à l'épreuve : lors de notre présentation publique du dispositif, plusieurs spectateurs ont ainsi cherché, par exemple, à tester la capacité des marcheurs à se déplacer en position « couchée » — un comportement qui, bien qu'absolument non anticipé, a pu « naturellement » être négocié par notre dispositif.

Cette possibilité d'une manipulation physique directe des marcheurs ne permet pas seulement de mettre à l'épreuve la qualité de leur couplage avec le système de vibration : elle permet également d'apprécier la nature même des procédures de programmation matérielle mobilisées dans la conception du dispositif, par l'observation de la structure géométrique portée par chaque marcheur sur sa face inférieure. Cette possibilité d'accéder, par la manipulation même des composants matériels du dispositif, à certains des détails centraux de son « implémentation » de processus de maintenance, permet ainsi de voir se réaliser, sur le plan du mouvement des marcheurs, le même type de dialogue entre points de vue objectif et symbolique que celui opéré par la

mise à l'épreuve des effets de la projection lumineuse : la tendance à projeter symboliquement une dimension politique sur le mouvement des marcheurs coexiste, simultanément, avec la possibilité offerte à tout spectateur d'objectiver ce mouvement en observant le « code » de chacun des agents qui le réalisent. Porteurs manipulables du « programme » embarqué dans le dispositif, les marcheurs apparaissent ici, littéralement, comme de véritables *prises* offertes au public : tout en constituant une condition requise à la réalisation des opérations de maintenance prévues par le dispositif, le critère d'une manipulation directe des marcheurs permet ainsi au spectateur de développer un rapport réflexif à ces mêmes opérations.



## Chapitre 13

# Conclusion

### 13.1 Programmations

Dans son livre *Being Digital*<sup>1</sup>, publié en 1995, Nicholas Negroponte assimilait la trajectoire de développement des technologies numériques à un phénomène inexorable de dématérialisation, voué à transformer en profondeur notre rapport au monde dans le remplacement des « atomes » par les « bits ». « Le passage des atomes aux bits est irrévocable et irrésistible<sup>2</sup> », écrivait Negroponte, et ce mouvement semblait destiné à s'étendre, dans les années à venir, à une part toujours plus large de la population mondiale.

Une vingtaine d'années plus tard, force est pourtant de constater qu'en dépit des profondes transformations apportées par les technologies numériques au sein de nos sociétés, « la matérialité encombrante persiste, et même se réaffirme<sup>3</sup> ». Cette idée d'une « réaffirmation » de la matérialité, rendue sensible par le développement de nouvelles expérimentations matérielles aux croisements des sciences, de l'art, du design et de l'architecture, s'avère si constitutive de notre époque que la formule « being digital » s'est récemment vue transformée en « being material », à l'occasion d'un colloque interdisciplinaire organisé en avril 2017 par le MIT<sup>4</sup>. Fonctionnant comme une inversion du titre du livre de Nicholas Negroponte (d'après l'opposition entre numérique et matière, « bits » et « atomes », qui en fondait le propos), « being material » renvoyait ainsi, dans ce cadre, au phénomène de l'émergence d'une « nouvelle matérialité » dans le monde contemporain, et à l'investissement croissant de problématiques d'ordre matériel comme axes de recherche et d'expérimentation au sein de disciplines de conception telles que l'art, le design et l'architecture<sup>5</sup>.

---

1. Nicholas Negroponte, *Being Digital*, Alfred A. Knopf, 1995.

2. *Ibid.*, p. 4. Notre traduction.

3. [Anon.], « Being Material », 2017, en ligne : <https://arts.mit.edu/events-visit/symposia/being-material> (consulté le 22 juin 2017). Notre traduction.

4. Organisé les 21 et 21 avril 2017 au MIT Center for Art, Science & Technology (CAST), ce colloque s'est d'ailleurs ouvert sur une intervention de Nicholas Negroponte.

5. Aspect crucial de la « nouvelle matérialité » contemporaine, ce rapprochement des disciplines de conception avec des problématiques de recherche comme celles des sciences des matériaux peut également s'analyser, selon Wolfgang Schäffner, à la lumière d'un « tournant de conception » (*design turn*) opéré, en miroir, dans le champ des sciences de la nature. Selon l'auteur, ces sciences se sont en effet rapprochées, au cours des dernières années, de problématiques relevant de la *conception* de nouveaux systèmes matériels : « [L]es sciences de la nature font aujourd'hui face à une transformation décisive : l'analyse du monde naturel a atteint le point où la direction de leurs recherches se trouve inversée. Il ne s'agit plus seulement d'étu-

Ce mouvement conduisant à l'investissement approfondi de problématiques matérielles au sein des pratiques de conception qualifiée, dans son ensemble, la trajectoire empruntée dans cette thèse. Cherchant à développer une compréhension active de l'idée de matière, nous avons été conduits à imaginer des schémas productifs ouverts à l'expression autonome de formes matérielles d'agentivité, dont nous avons formalisé le principe en introduisant différentes compréhensions « non prescriptives » de la notion de conception. Après avoir exploré, dans un premier temps, l'idée d'une activité de conception comprise comme production de *notations ouvertes*, nous avons ainsi développé la notion centrale d'une *conception de processus de maintenance*, au sein de deux contextes productifs respectivement associés à l'expérimentation de méthodes numériques (*Unspecified Clay*) et analogiques (*Manœuvres*) d'implémentation de ces processus.

Cette trajectoire, conduisant à la conceptualisation d'une notion d'*auto-maintenance*, forme d'organisation productive échappant à l'articulation linéaire traditionnelle entre conception et fabrication, nous a conduits à examiner, critiquer et mettre en œuvre différentes modalités, existantes ou développées spécifiquement pour cette thèse, d'usage de la *programmation* au sein des processus de conception. De la génération « paramétrique » de variations au sein du schéma non standard, à l'approche de « programmation matérielle » déployée dans notre projet *Manœuvres*, le contraste entre ces multiples approches révèle et contribue à caractériser un processus de profonde redéfinition des fonctions et usages du code au sein des pratiques de conception contemporaines.

D'abord envisagé, dans le courant des années 90, comme vecteur de renforcement de la hiérarchie traditionnelle entre forme et matière, le code se trouve ainsi mobilisé dans nos projets *Unspecified Clay* et *Manœuvres* pour induire une forme de « circulation » de l'autorité entre les différents acteurs, matériels et humains, des systèmes de production. Dans de telles configurations produc-

---

dier le fonctionnement des processus naturels, mais d'apprendre à mobiliser ces processus de manière nouvelle. Le chercheur, en tant qu'observateur et analyste d'entités naturelles d'ordre chimique, physique ou biologique, se transforme en concepteur d'une réalité qui n'existait pas avant lui » (Wolfgang Schäffner, « The Design Turn: Una revolución científica en el espíritu del diseño », *Kepes*, vol. 7, n° 6, 2010, p. 62, notre traduction). Ce « design turn » constitue l'une des principales motivations à l'origine de la fondation du Interdisciplinary Laboratory Bild Wissen Gestaltung (Laboratoire Interdisciplinaire Image, Savoir et Conception), dirigé par Wolfgang Schäffner à l'université Humboldt de Berlin — et dont l'objectif est de croiser, dans une logique interdisciplinaire, les problématiques des sciences de la nature, des sciences humaines et sociales, de l'ingénierie, ainsi que du design et de l'architecture. Parmi les principales activités de recherche menées au Interdisciplinary Laboratory, mentionnons, notamment, un axe consacré à la notion de « matière active » (<https://www.interdisciplinary-laboratory.hu-berlin.de/de/content/schwerpunkt-active-matter>, consulté le 14 octobre 2017).

tives *auto-maintenues*, le code devient alors le garant d'un processus circulaire de réalisation et de régénération des relations productives, donnant lieu à une production continue, renouvelée, de structures matérielles. Intégrant des notions comme le concept cybernétique de rétroaction, le code spécifié par le concepteur vise ici à « implémenter » une capacité d'*adaptation* en « temps-réel » du système productif, dépassant dès lors le cadre d'un usage simplement « génératif » de la programmation : il ne s'agit en effet pas tant de mobiliser le code pour sa capacité à générer des formes, que de chercher à *relier* entre eux les comportements d'un ensemble d'acteurs productifs — de sorte que le comportement d'un matériau, exprimé lors de la fabrication d'une structure, puisse par exemple induire une évolution ou une reconfiguration de certaines « règles » numériques préalablement spécifiées (comme nous l'avons vu notamment dans le cas de notre projet *Unspecified Clay*).

En l'absence de ces possibilités d'adaptation, permises par le schéma d'auto-maintenance, de nombreuses pratiques dites « génératives » se basent de fait sur une compréhension « essentialisée » de la notion de forme, et s'inscrivent ainsi — en dépit de leurs intentions parfois « progressistes » — dans un rapport conservateur à la matérialité. Comme nous le notions déjà en introduction de cette thèse, un projet tel que Digital Grottesque de Michael Hansmeyer et Benjamin Dillenburger, s'il entend marquer une rupture nette avec les variations paramétriques « lisses » du non standard et de ses héritiers, continue de s'inscrire dans une vision purement hylémorphique de la production numérique : en dépit de l'immense complexité des artefacts finalement matérialisés, la production reste dominée par la logique d'une forme « pure », géométrique, générée de manière indissociable de la perspective de sa réalisation « à l'identique » dans un substrat matériel inerte (le sable de silice utilisé pour l'impression de l'objet).

La capacité de dépasser une telle vision hylémorphique de la production numérique n'a ainsi pas simplement résidé, dans cette thèse, dans la conceptualisation et la mise en pratique de l'idée d'une matière *active*, mais aussi dans le choix de ne pas faire du code un point central (dans l'acception « géographique » du terme) des schémas organisationnels développés dans nos réflexions et nos expériences. En dépit du rôle opératoire majeur assumé par le code dans la plupart de nos projets, celui-ci n'a en effet pas été compris comme une matrice générative prenant en charge l'intégralité du processus de prise de forme, mais comme l'un des *agents de maintenance* d'un système productif voué à créer des formes « dans son ensemble », c'est-à-dire dans l'expression émergente de relations entre les différents acteurs, matériels et humains, qui en forment la composition. Stabilisateur d'une *organisation* productive, le code s'est donc ici manifesté avant tout par sa capacité à engager entre elles les différentes *performances* des agents contribuant à la prise de forme — et ses modalités d'implémentation, dans le cadre de cette compréhension performa-

tive, se sont finalement avérée indépendantes de l'impératif de son inscription sous la forme d'un programme numérique. La démarche de programmation adoptée dans *Manœuvres* a ainsi été décrite comme « matérielle », au sens où le « matériau » que nous avons conçu pour ce projet (la population de marcheurs) portait, dans sa structure même, les « instructions » élémentaires à la négociation future de ses interactions avec l'environnement. Les réflexions et expérimentations menées dans cette thèse permettent ainsi de penser l'activité de programmation, au-delà du choix d'une implémentation numérique ou analogique, en tant qu'opération visant à disposer des capacités adaptatives au sein d'un système de production, de sorte à autoriser la mise en place d'un processus d'interaction réciproque entre les différents acteurs de ce système.

### 13.2 Pour une conception réflexive

Alors que l'intégration toujours plus poussée de processus numériques « intelligents<sup>6</sup> » au sein de notre environnement matériel soulève d'importantes questions sur les plans éthique, social et politique, les approches de programmation matérielle présentent un avantage précieux : en offrant la possibilité d'une implémentation du code sous la forme de « prises » physiquement manipulables, ces approches se prêtent adéquatement à la conception de dispositifs favorisant, auprès de leurs utilisateurs, une forme d'engagement réflexif à l'égard de leurs opérations. Dans le champ artistique, la possibilité d'un dispositif directement et physiquement en prise avec les performances de ses spectateurs, telle que nous l'avons développée dans *Manœuvres*, s'offre ainsi comme une alternative bienvenue à l'utilisation de technologies numériques « opaques » visant à capter, représenter, et analyser les comportements du public. Si les dispositifs que nous imaginons cherchent à proposer, avant tout, une expérience d'ordre esthétique — intégrant, en vertu de leur nature praticable, une dimension pratique —, leur portée se trouve donc de fait intrinsèquement liée à des considérations politiques dépassant le strict champ de l'art, pour investir la problématique plus large des nouvelles formes d'« autorité technologique » et de contrôle présentes dans nos sociétés contemporaines. En s'ouvrant à la possibilité d'une mise à l'épreuve expérimentale, par le public, des procédures impliquées dans la maintenance d'une activité productive, des projets tels que *Manœuvres* suggèrent ainsi qu'une autre compréhension, plus « cybernétique » et moins coercitive, de la notion de « dispositif de contrôle » serait

---

6. Notre emploi du qualificatif « intelligent » fait bien entendu écho aux termes selon lesquels ces dispositifs sont usuellement décrits : comme nous l'avons souligné dans la section 11.4, nous pensons pour notre part que la référence à une telle notion d'intelligence s'avère problématique au regard des capacités réelles de ces systèmes, qu'il conviendrait plutôt de rapporter à la catégorie de l'*apprentissage statistique*.

aujourd'hui possible, et réactualisent l'idée paskienne d'une forme de « conversation » entre l'homme et son environnement bâti.

Si les « assistants » numériques contemporains (bots de messageries instantanées, haut-parleurs « intelligents »...) se déclinent, de plus en plus, sous des formes *littéralement* conversationnelles, des dispositifs tels que celui mobilisé dans *Manœuvres* recherchent en effet, avant tout, la possibilité d'un échange *réciproque* avec le spectateur — une caractéristique principale de la notion de conversation chez Gordon Pask. Implémentée par des processus de maintenance relevant d'une approche performative, plutôt que représentationnelle, cette réciprocité constitue le critère principal selon lequel de tels dispositifs peuvent tout autant être considérés comme « contrôleurs » que « contrôlés », et redistribuer au public une partie de l'autorité productive qui leur a été impartie lors de leur conception. Par contraste, tout dispositif numérique « intelligent », basé sur des représentations inférées par l'apprentissage d'une série d'exemples de « cas » d'interaction, semble voué à s'inscrire dans une vision plus centraliste et « autoritaire » de la notion de contrôle — dans le sens où, comme le remarquait en 1972 Jean Baudrillard, de tels dispositifs ne sauraient proposer, au mieux, qu'une « *simulation* de réponse<sup>7</sup> », et trouvent ainsi à s'inscrire au sein d'une « architecture des médias » précisément définie comme la mise en dispositif de « *ce qui interdit à jamais la réponse*<sup>8</sup> ». La création d'œuvres artistiques qui, sans tomber dans une attitude technophobe<sup>9</sup>, récusent de telles logiques de « simulation » d'un processus de réponse — dans la mise en œuvre, par exemple, des capacités de réponse *concrètes* d'un matériau —, pourrait dès lors contribuer pleinement au projet politique de réévaluer sous un angle critique les multiples formes d'« assistance algorithmique » promises par les technologies contemporaines.

L'approche visant à concevoir des dispositifs de production basés sur les capacités de réponse concrètes de matériaux, plutôt que sur la mise en œuvre de logiques de construction, de traitement et d'analyse de représentations numériques, revêt donc une portée politique majeure. Pour autant, ce constat ne doit pas nous conduire à considérer le champ des « nouveaux matériaux », de la matière « responsive » et « programmable », comme une ressource permettant d'opérer une mise à plat *totale* des rapports d'autorité à l'œuvre dans les processus de production numériques traditionnels. S'il est vrai que les matériaux

---

7. Jean Baudrillard, *Pour une critique de l'économie politique du signe*, Gallimard, 1972, p. 208. Italiques dans le texte.

8. *Ibid.*, p. 208. Italiques dans le texte.

9. Les méthodes « analogiques » mobilisées dans notre projet *Manœuvres* ont au contraire été mises en place, comme nous l'avons montré, dans une relation directe avec les recherches scientifiques du groupe EC2M, ainsi qu'avec l'expertise technologique acquise par l'équipe lors du développement de ses expériences.

dotés de comportements actifs récuse, par nature, la vision d'une matière passive et inerte — reflet, comme nous l'avons vu, d'une compréhension passive du rôle des « fabricants » dans les processus de production traditionnels —, cette activité ne saurait cependant s'envisager comme la pure expression d'une « vitalité » interne de la matière, indépendante de toute forme d'intentionnalité préalable. Issus de recherches scientifiques et de développements techniques avancées, les « nouveaux matériaux » sont en effet avant tout des matériaux *conçus*; et les comportements émergents qu'ils exhibent s'interprètent, en ce sens, comme l'actualisation différée d'une forme d'autorité « cristallisée » lors de leur conception, porteuse des intentions de leurs créateurs originels.

Tout en soulignant, à nouveau, l'importance d'envisager les formes d'expression contemporaine d'une « nouvelle matérialité » sous l'angle de la notion de conception — un impératif pointé dès l'introduction de cette thèse, et par lequel notre propos se démarque de discours comme ceux de l'artisanat numérique et du making —, cette remarque nous offre l'opportunité de nous interroger sur les limites possibles des approches de programmation matérielle que nous avons défendues dans la dernière partie de notre argumentaire : peut-on, en effet, toujours envisager que les processus de conception impliqués dans le développement de matériaux programmables se traduisent en la création de « prises » effectivement perceptibles et manipulables par le public, conditions du rapport réflexif dans lequel nous souhaitons inscrire la mise en œuvre de ces matériaux ? Ne pourrait-on pas imaginer, au contraire, que ces nouvelles méthodes de programmation soient déployées dans une logique de masquage, plutôt que d'« exposition », des opérations matérielles qu'elles permettent d'agencer — et rejoignent ainsi la tendance à l'« opacité » aujourd'hui caractéristique de la plupart des dispositifs numériques ? S'il n'est pas possible d'écarter ces options, et d'exclure l'éventualité de voir se développer, hors des trajectoires que nous envisageons dans cette thèse, certaines incarnations problématiques de l'idée d'une matière active<sup>10</sup>, les éléments conceptuels et pratiques explorés dans cette thèse nous paraissent cependant pointer vers une certaine « éthique de conception », favorisant l'adoption d'un rapport réflexif aux capacités apportées par les « nouveaux matériaux » dans les champs de l'art, du design et

---

10. On peut penser ici, par exemple, aux nanotechnologies, dont l'évaluation des conséquences sur la santé humaine constitue un champ de recherche à part entière, doté de ses propres publications (comme le journal *Nanotoxicology*). Dans un registre sensiblement différent, l'esthétisation de l'ingénierie génétique opérée par certains projets de design, comme la collection de « vêtements » *Wanderers* du groupe de recherche Mediated Matter de Neri Oxman (<http://matter.media.mit.edu/environments/details/wanderers-wearables-for-interplanetary-pilgrims>, consulté le 20 juillet 2017), nous paraît parfois manquer d'une mise en perspective critique, telle qu'elle se rencontrait par exemple dans les premières œuvres de « bio art » réalisées par l'artiste Eduardo Kac à la fin des années 90 (<http://www.ekac.org/transgenicindex.html>, consulté le 20 juillet 2017).

de l'architecture. L'objectif de ménager, dans la conception de dispositifs de production participative, des prises matérielles, esthétiques et symboliques offrant les conditions d'un développement futur d'attitudes réflexives de la part des spectateurs, ne saurait ainsi être poursuivi qu'au sein d'une pratique de conception elle-même engagée dans une relation réflexive par rapport à ses propres *moyens*.

Cette attitude réflexive, que nous pourrions également qualifier d'« éthique de conception », se trouve contenue dans l'idée d'une pratique explorant de manière performative les comportements des instruments, matériaux et procédés à partir desquels ou pour lesquels elle entend concevoir. Cette approche nous renvoie directement à la notion de *hacking*, introduite en tant qu'élément méthodologique dans le chapitre 6 ; et l'idée d'un « détournement » de logiciels commerciaux de génération de trajectoires d'usinage, développée dans nos projets *Gradient* et *Computational Ruins*, s'inscrit de fait pleinement dans le périmètre de l'attitude d'« exploration performative » que nous cherchons ici à caractériser. Pour contribuer véritablement à la compréhension de cette attitude, cependant, le terme « hacking » mérite d'être défini de manière plus adéquate qu'en tant que simple pratique de « détournement » de systèmes techniques. La notion de détournement présente en effet le risque de caractériser d'abord le hacking en tant qu'attitude *négative* : même en prenant garde de ne pas confondre hacking et « piratage informatique<sup>11</sup> », la référence au détournement continue de renvoyer à la volonté d'un mésusage, à l'objectif de déjouer les comportements existants de systèmes techniques. Or, le hacking ne se définit pas seulement par cet objectif, mais aussi fréquemment par sa capacité à *faire émerger de nouveaux comportements*, par l'exploration de « mises en relation » non anticipées entre différents systèmes.

Le concept de boîte noire peut, si nous l'envisageons dans son sens cybernétique, nous permettre d'éclairer cette remarque. Fréquemment invoquée dans le discours critique pour souligner, à juste titre, l'opacité préoccupante des systèmes numériques contemporains, la notion de boîte noire est initialement mobilisée par Norbert Wiener pour qualifier le statut des systèmes étudiés selon l'approche « comportementaliste » fondant la cybernétique. L'idée de boîte noire se trouve alors dépourvue de toute connotation négative, et renvoie en premier lieu à une position méthodologique qui privilégie, à l'analyse de la

---

11. Dans le domaine de l'informatique, les hackers prennent ainsi souvent soin de se distinguer des « crackers », des individus mobilisant leurs compétences techniques afin d'exploiter les brèches de sécurité présentes dans certains programmes. Sur la distinction entre hackers et crackers, voir notamment : Richard Stallman, « On Hacking », 2002, en ligne : <https://stallman.org/articles/on-hacking.html> (consulté le 20 juillet 2017).

« structure spécifique et l'organisation intrinsèque<sup>12</sup> » de l'objet à étudier, l'exploration de son comportement. Or, cette position méthodologique parvient à saisir une forme de rapport *performatif* aux systèmes techniques contemporains — rapport qui, de fait, s'impose le plus souvent de lui-même dans toute relation pratique à ces systèmes, de leur « hacking » à leur conception, en raison de la complexité intrinsèque des objets rencontrés<sup>13</sup>. Si tout système peut, selon le point de vue cybernétique, être considéré comme une « boîte noire », la pratique du hacking pourrait alors se comprendre comme une forme d'attention aiguë à l'*agentivité* latente contenue dans de tels systèmes — comme la volonté d'engager un processus ouvert de négociation avec les formes matérielles d'*agentivité* qu'ils représentent, pour en révéler de nouvelles possibilités expressives. L'objectif de proposer au public, dans le cadre de situations de production participative, des dispositifs « ouverts<sup>14</sup> », ne s'avère en ce sens pas incompatible avec l'adoption d'une attitude d'exploration performative lors de la conception de ces dispositifs, corrélative d'un intérêt et d'une curiosité pour la capacité de leurs composants (matériaux programmables, simulations informatiques...) à agir de manière non prévisible *a priori*. La notion de hacking nous intéresse précisément pour cette capacité à réunir, au sein d'une même activité, une forme de rapport réflexif — voire critique — aux systèmes

---

12. Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener et Julian Bigelow, « Behavior, purpose and teleology », *op. cit.*, p. 18. Notre traduction.

13. Aucun programme informatique, par exemple, ne saurait s'appréhender, à un niveau de description donné, sans considérer certaines de ses composantes comme des boîtes noires. Tout concepteur de programmes est en effet fréquemment amené à utiliser des bibliothèques logicielles dont il ne connaît pas en détails la logique interne : l'interaction avec ces bibliothèques s'opère alors à partir de la seule connaissance des *comportements* d'entrée-sortie de ces dernières, précisés dans leur documentation — ce qui implique, parfois, que ces comportements révèlent des subtilités inattendues à l'usage, liées par exemple à des bugs d'implémentation de certaines fonctionnalités de la bibliothèque. Cette logique, favorisant la conception modulaire de programmes, est si centrale dans l'informatique que certains paradigmes de programmation, comme la « programmation orientée objet » (POO), préconisent littéralement de concevoir les librairies logicielles comme un ensemble de boîtes noires : pour accroître la versatilité de la librairie, et rendre les programmes qui l'utilisent résistants à d'éventuelles transformations futures de la logique interne de cette dernière (*refactoring*), il s'agit de masquer les détails de l'implémentation des « classes » — les abstractions permettant d'instancier des « objets » — aux futurs utilisateurs de la librairie, et de n'exposer que des *interfaces* permettant d'en mobiliser le comportement. Sur un plan plus fondamental, nous pouvons noter que tout système *complexe* (qu'il soit numérique, analogique, naturel ou artificiel) constitue, en puissance, une boîte noire : dans la mesure où les systèmes complexes présentent fréquemment une dimension émergente, la connaissance, même exhaustive, de leur structure et de leur logique interne ne garantit pas une capacité de prédiction totale de leurs comportements ; du point de vue de leurs utilisateurs ou de leurs observateurs, tout se passe alors comme si la logique interne de ces systèmes restait inaccessible.

14. Ainsi que nous l'affirmions dans la section 11.5, lors de notre critique de la dimension « opaque » d'un dispositif comme l'homéostat.

techniques, et la notion d'un « bricolage », traduisant l'idée d'un engagement fondamentalement performatif avec ces systèmes. L'« éthique de conception » que nous cherchons ici à caractériser peut donc être rapportée, en ce sens, à l'impératif de toujours chercher à « concevoir en hacker ».

Traditionnellement associé de manière privilégiée, quoi que non exclusive, à la pratique de la programmation informatique<sup>15</sup>, l'usage du terme « hacking » s'est récemment étendu à divers champs de pratiques matérielles : on parle ainsi aujourd'hui, par exemple, de « bio hacking », de « hardware hacking », ou encore de « food hacking ». Si cette popularité récente doit être considérée sous un angle critique, et n'apparaît parfois pas sans lien avec le succès rencontré par les idées du mouvement maker (dont nous avons pointé à plusieurs reprises les limites conceptuelles), la réalité des pratiques désignées par ces nouveaux idiomes se rapporte néanmoins clairement, dans certains cas, à l'idée d'une conception *réflexive et performative* que nous associons ici au hacking<sup>16</sup>. Un certain nombre de procédés « alternatifs » de production numérique aujourd'hui développés par des artistes, designers et architectes, dont les performances contribuent à façonner les contours de la notion contemporaine d'une « nouvelle matérialité », peuvent également sans peine, et de manière non péjorative, être qualifiées de « hacks<sup>17</sup> » — autrement dit, d'assemblages de « briques de comportements » élémentaires (comme des extraits de code prélevés de programmes existants, ou des parties « recyclées » de machines à commande numérique), réalisés dans une logique plus performative qu'analytique, au sens où la conception de ces assemblages se trouve fréquemment guidée par l'exploration ouverte et émergente des comportements matériels

---

15. Sur les origines du terme « hacker » et ses liens avec le MIT, et plus particulièrement avec son laboratoire d'intelligence artificielle, voir notamment : Steven Levy, *Hackers: Heroes of the Computer Revolution*, New York, Doubleday, 1984.

16. Le « think tank » artistique Center for Genomic Gastronomy (<http://genomicgastronomy.com>, consulté le 21 juillet 2017), fondé en 2010 par Zack Denfeld et Cathrine Kramer, fournit l'exemple d'une pratique de « food hacking » inscrite dans une démarche pleinement réflexive. Le projet Soylent Banquet (<http://genomicgastronomy.com/work/2016-2/soylent-banquet>, consulté le 21 juillet 2017), proposait ainsi d'inverser le rapport « accélérationniste » à l'alimentation proposé par Soylent (<https://www.soylent.com>, consulté le 21 juillet 2017), un produit nutritionnel développé dans la Silicon Valley. Présenté non comme un complément, mais comme une réelle alternative à une alimentation « traditionnelle », Soylent cible en effet explicitement une clientèle « pressée » en insistant, dans sa communication, sur les gains substantiels de temps apportés par sa rapidité de préparation et de consommation. Soylent Banquet se proposait de « hacker » le procédé de préparation de Soylent en créant, à partir des mêmes ingrédients de base que le produit commercialisé, et de techniques de préparation similaires à ce dernier (comme l'utilisation de poudres alimentaires), des plats de « haute gastronomie » destinés, à l'inverse, à être lentement consommés et appréciés.

17. C'est-à-dire de « produits » d'une démarche de hacking.

qu'ils permettent de révéler, plutôt que l'objectif d'accomplir une tâche définie à l'avance<sup>18</sup>.

C'est précisément dans cette possibilité de voir se développer une attitude réflexive du concepteur par rapport aux performances de ses instruments, matériaux et procédés, plutôt que dans la promesse (souvent rhétorique) d'une démocratisation des pratiques de production<sup>19</sup>, que réside à notre sens l'intérêt d'une approche de la conception « en hacker ». Au-delà de tout effet de mode, la multiplication récente des usages du terme « hacking » signale ainsi, peut-être, qu'une certaine forme de relation réflexive et performative aux moyens de production, initialement expérimentée dans le domaine de l'informatique, se trouve aujourd'hui en passe d'irriguer d'autres champs de pratiques matérielles. De telles formes de « transfert » constituent, au demeurant, l'un des traits fondamentaux de la « nouvelle matérialité » contemporaine : loin de s'inscrire uniquement dans un processus de remplacement des « atomes » par les « bits », les développements technologiques récents se caractérisent en effet, de plus en plus, par leur capacité à provoquer « des rencontres nouvelles et inattendues entre les mondes numérique et matériel<sup>20</sup> ». Les approches relevant d'une forme de programmation matérielle pourraient dès lors, de manière privilégiée, permettre le développement de véritables stratégies de *hacking* des nouveaux matériaux produits par la recherche scientifique — et représenter ainsi une opportunité réelle pour les concepteurs de s'emparer, sans optimisme excessif ni rejet technophobe, des enjeux esthétiques, techniques, politiques et environnementaux soulevés par ces nouvelles formes d'agentivité.

---

18. Comme nous l'avons déjà noté, certains des concepteurs engagés dans ces pratiques, comme Andrew Witt, se réclament d'ailleurs explicitement d'une approche de « design hacking » (Andrew Witt, « Design Hacking: The Machinery of Visual Combinatorics », *op. cit.*).

19. Cette idée aux résonances « maker », présente dans certaines mobilisations récentes de la notion de hacking, nous paraît dévier des usages originaux du terme. Si le hacking, compris comme l'expression d'un « esprit créatif personnel » (Scott Burnham, *Finding the Truth in Systems: In Praise of Design-Hacking*, Londres, Royal Society for the Encouragement of Arts, Manufactures & Commerce, 2009, p. 3, notre traduction), peut évoquer l'idée d'une pratique démocratisée du « faire », il convient néanmoins de souligner que le qualificatif de « hacker » rend compte d'une forme d'autorité et d'expertise détenue par la personne à laquelle il s'applique : le hacker, s'il constitue effectivement parfois un « amateur », possède ainsi en général une expérience approfondie des systèmes avec lesquels il choisit d'interagir — et c'est précisément en cela que le hacking ne se sépare jamais d'une dimension réflexive, voire critique. Pour cette raison, la notion de hacking ne nous semble pas nécessairement compatible avec les idéaux de démocratisation du mouvement maker — idéaux qui, comme le rappelait récemment Antoine Picon, constituent d'ailleurs plutôt une forme d'idéologie (Antoine Picon et Bob Sheil, « Q&A 4: Antoine Picon and Bob Sheil », dans Achim Menges, Bob Sheil, Ruairi Glynn et Marilena Skavara (dir.), *Fabricate: Rethinking Design and Construction*, Londres, UCL Press, 2017, p. 175).

20. [Anon.], « Being Material », *op. cit.* Notre traduction.





# Bibliographie

## Ouvrages

Giorgio Agamben, *Qu'est-ce qu'un dispositif?*, traduction de Martin Rueff, Paris, Payot & Rivages, 2007.

Madeleine Akrich, Michel Callon et Bruno Latour (dir.), *Sociologie de la traduction : Textes fondateurs*, Paris, Presses des Mines, 2006.

Leon Battista Alberti, *L'art d'édifier*, traduction de Pierre Caye et Françoise Choay, Paris, Seuil, 2004.

Chris Anderson, *Makers: The New Industrial Revolution*, New York, Crown Business, 2012.

Gertrude Elizabeth Margaret Anscombe, *Intention*, Cambridge, Harvard University Press, 1957.

W. Ross Ashby, *An Introduction to Cybernetics*, Londres, Chapman & Hall, 1956.

W. Ross Ashby, *Design for a Brain*, Londres, Chapman & Hall, 1952.

John Langshaw Austin, *How to Do Things with Words*, Oxford, Clarendon Press, 1962.

Jean Baudrillard, *Pour une critique de l'économie politique du signe*, Gallimard, 1972.

Christopher M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, New York, Springer, 2006.

François Blondel, *L'art de jeter les bombes*, Paris, l'auteur et Nicolas Langlois, 1683.

Willy Boesinger (dir.), *Le Corbusier : Œuvre complète, volume 5, 1946-1952*, Zurich, Les éditions d'architecture.

Marie-Ange Brayer (dir.), *Imprimer le monde*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 15 mars 2017 – 19 juin 2017), Paris / Orléans, Centre Pompidou / HYX, 2017.

Joan Lisa Bromberg, *The Laser in America, 1950–1970*, Cambridge, MIT Press, 1991.

Jack Burnham (dir.), *Software: Information Technology: Its New Meaning For Art*, catalogue d'exposition (New York, Jewish Museum, 16 septembre – 8 novembre 1970), New York, Jewish Museum, 1970.

Scott Burnham, *Finding the Truth in Systems: In Praise of Design-Hacking*, Londres, Royal Society for the Encouragement of Arts, Manufactures & Commerce, 2009.

Mario Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge, The MIT Press, 2011.

Christopher Clapham et James Nicholson, *The Concise Oxford Dictionary of Mathematics*, Oxford, Oxford University Press, 2009.

Diana Coole et Samantha Frost (dir.), *New Materialisms*, Durham, Duke University Press, 2010.

Steven A. Coons, *Surfaces for Computer-Aided Design of Space Forms*, rapport technique, Cambridge, MIT, 1967.

Stanley M. Davis, *Future Perfect*, Boston, Addison-Wesley, 1987.

Manuel DeLanda, *A Thousand Years of Nonlinear History*, New York, Zone, 2000.

Gilles Deleuze, *Le pli : Leibniz et le baroque*, Paris, Minuit, 1988.

Hubert L. Dreyfus, *What Computers Can't Do: A Critique of Artificial Reason*, New York, MIT Press, 1972.

Hubert L. Dreyfus et Paul Rabinow, *Michel Foucault: Beyond Structuralism and Hermeneutics*, Chicago, The University of Chicago Press, 1983.

Jean-Pierre Dupuy, *The Mechanization of the Mind: On the Origins of Cognitive Science*, Cambridge – Princeton, MIT Press – Princeton University Press, 2009.

Umberto Eco, *The Open Work*, traduction d'Anna Cancogni, Harvard University Press, 1989.

Paul de Faget de Casteljaud, *Courbes et surfaces à pôles*, rapport technique, Paris, Citroën, 1963.

Sophie Fétro, *Design ex machina!*, livret d'exposition (Paris, galerie Michel Journiac, 29 septembre – 23 octobre 2015), 2015.

Michel Foucault, *Surveiller et punir*, Paris, Gallimard, 1975.

Michael Friedman et Wolfgang Schäffner (dir.), *On Folding: Towards a New Field of Interdisciplinary Research*, Bielefeld, Transcript, 2016.

Carl Friedrich Gauss, *Recherches générales sur les surfaces courbes*, Paris, Bachelier, 1852.

Matthew Fuller (dir.), *Software Studies: A Lexicon*, Cambridge, MIT Press, 2008.

John S. Gero, *Advances in Formal Design Methods for CAD*, Berlin, Springer, 1996.

Neil Gershenfeld, *Fab: The Coming Revolution on Your Desktop—From Personal Computers to Personal Fabrication*, New York, Basic Books, 2005.

Jean Golfin, *Les 50 mots-clés de la sociologie*, Toulouse, Privat, 1972.

Nelson Goodman, *Languages of Art: An Approach to a Theory of Symbols*, Indianapolis, Bobbs-Merrill, 1968.

Paul Grenet, *Les origines de l'analogie philosophique dans les Dialogues de Platon*, Paris, Boivin, 1948.

Ian Hacking, *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983.

John Haugeland, *Artificial Intelligence: The Very Idea*, Cambridge, MIT Press, 1985.

N. Katherine Hayles, *How We Became Posthuman: Virtual Bodies in Cybernetics, Literature, and Informatics*, Chicago, University of Chicago Press, 1999.

Donald O. Hebb, *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*, Mahwah, Lawrence Erlbaum Associates, 2002.

David Hounshell, *From the American System to Mass Production, 1800–1932: The Development of Manufacturing Technology in the United States*, Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1984.

François Jacob, *La logique du vivant : Histoire de l'hérédité*, Paris, Gallimard, 1970.

Lucy Johnston, *Digital Handmade: Craftsmanship and the New Industrial Revolution*, London, Thames & Hudson, 2015.

Emmanuel Kant, *Critique de la faculté de juger*, traduction d'Alain Renaut, Paris, Flammarion, 2015.

Branko Koralevic (dir.), *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Abingdon, Taylor & Francis, 2004.

Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, The University of Chicago Press, 1962.

Ron T. Labaco (dir.), *Out of Hand: Materializing the Postdigital*, catalogue d'exposition (New York, Museum of Arts and Design, 16 octobre 2013 – 1er juin 2014), Londres, Black Dog Publishing, 2013.

Bruno Latour, *Nous n'avons jamais été modernes : Essai d'anthropologie symétrique*, Paris, La Découverte, 2013.

Steven Levy, *Hackers: Heroes of the Computer Revolution*, New York, Doubleday, 1984.

Roy Liming, *Practical Analytical Geometry with Applications to Aircraft*, New York, Macmillan, 1944.

Peter Lunenfeld, *Snap to Grid: A User's Guide to Digital Arts, Media, and Cultures*, Cambridge, MIT Press, 2001.

Greg Lynn, *Animate Form*, New York, Princeton Architectural Press, 1999.

Greg Lynn (dir.), *Folding in Architecture*, Londres, Academy, 1993.

Lev Manovich, *Software Takes Command*, New York, Bloomsbury, 2013.

Lev Manovich, *The Language of New Media*, Cambridge, MIT Press, 2001.

Karl Marx, *Le Capital*, traduction de Jean-Pierre Lefebvre, Paris, Presses Universitaires de France, 1993.

Humberto R. Maturana et Francisco G. Varela, *De máquinas y seres vivos: Una caracterización de la organización biológica*, Santiago, Editorial Universitaria, 1973.

Humberto R. Maturana et Francisco J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Boston, D. Reidel Publishing Company, 1980.

Pamela McCorduck, *Machines Who Think: A Personal Inquiry into the History and Prospects of Artificial Intelligence*, Natick, A K Peters, 2004.

Malcolm McCullough, *Abstracting Craft: The Practiced Digital Hand*, Cambridge, MIT Press, 1996.

Frédéric Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), Paris, Centre Pompidou, 2003.

Marvin Minsky et Seymour Papert, *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*, Cambridge, MIT Press, 1969.

Gaspard Monge, *Géométrie descriptive : Leçon données aux écoles normales, l'an III de la République*, Paris, Baudouin, 1798.

Edgard Morin, *Science avec conscience*, Paris, Seuil, 1990.

Nicholas Negroponte, *Being Digital*, Alfred A. Knopf, 1995.

Nicholas Negroponte (dir.), *Soft Architecture Machines*, Cambridge, MIT Press, 1975.

Nicholas Negroponte (dir.), *The Architecture Machine*, Cambridge, MIT Press, 1970.

Nils J. Nilsson, *The Quest for Artificial Intelligence*, Cambridge, Cambridge University Press, 2009.

Neri Oxman, « Material-Based Design Computation », thèse de doctorat, Cambridge, MIT, 2010.

Gordon Pask, *Conversation Theory: Applications in Education and Epistemology*, Amsterdam, Elsevier, 1976.

Dominique Peysson, *L'image-matière : Matériaux émergents et métamorphoses imaginaires*, Paris, Dis Voir, 2016.

Claus Pias (dir.), *Cybernetics: The Macy Conferences 1946–1953*, Chicago, Chicago University Press, 2016.

Andrew Pickering, *The Cybernetic Brain: Sketches of Another Future*, Chicago, University of Chicago Press, 2011.

Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, Chicago, University of Chicago Press, 1995.

Antoine Picon, *Smart Cities: A Spatialised Intelligence*, Hoboken, John Wiley & Sons, 2015.

Antoine Picon, *Culture numérique et architecture : Une introduction*, Bâle, Birkhäuser, 2010.

Karl R. Popper, *The Logic of Scientific Discovery*, traduction de l'auteur, Londres, Hutchinson, 1959.

Emanuele Quinz (dir.), *Jack Burnham, Hans Haacke : Esthétique des systèmes*, Dijon, Les Presses du Réel, 2015.

Jasia Reichardt (dir.), *Cybernetic Serendipity: The Computer and the Arts*, catalogue d'exposition (Londres, Institute of Contemporary Arts, 2 août – 20 octobre 1968), Londres, Studio International, 1968.

Simon Reynolds, *Retromania: Pop Culture's Addiction to its Own Past*, Londres, Faber & Faber, 2011.

Jeremy Rifkin, *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*, Basingstoke, Palgrave Macmillan, 2011.

Abraham Robinson, *Non-standard analysis*, Princeton, Princeton University Press, 1974.

John Ruskin, *The Nature of Gothic: A Chapter of the Stones of Venice*, New York, Garland, 1877.

John Ruskin, *The Seven Lamps of Architecture*, Londres, Smith, Elder & Co., 1849.

Stuart J. Russell et Peter Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Upper Saddle River, Prentice Hall, 2010.

Warren Sack, *The Software Arts*, Cambridge, MIT Press, à paraître.

Hilary Sample, *Maintenance Architecture*, Cambridge, MIT Press, 2016.

Daniel Shiffman, *The Nature of Code*, New York, l'auteur, 2013.

Gilbert Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Grenoble, Jérôme Millon, 2013.

Gilbert Simondon, *L'individu et sa genèse physico-biologique*, Paris, Presses Universitaires de France, 1964.

Lars Spuybroek, *The Sympathy of Things: Ruskin and the Ecology of Design*, Rotterdam, V2\_, 2011.

Molly Wright Steenson, « Architectures of Information: Christopher Alexander, Cedric Price, and Nicholas Negroponte and MIT's Architecture Machine Group », thèse de doctorat, Princeton University, 2014.

Ivan E. Sutherland, « Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System », thèse de doctorat, Cambridge, MIT, 1963.

Alvin Toffler, *Future Shock*, New York, Random House, 1970.

Iris van der Tuin et Rick Dolphijn (dir.), *New Materialism: Interviews and Cartographies*, London, Open Humanities Press, 2012.

Pierre Veltz, *La société hyper-industrielle : Le nouveau capitalisme productif*, Paris, Seuil, 2017.

Kenneth James Versprille, « Computer-Aided Design Applications of the Rational B-spline Approximation Form », thèse de doctorat, université de Syracuse, 1975.

Conrad Hal Waddington, *The Strategy of the Genes: A Discussion of Some Aspects of Theoretical Biology*, Londres, Allen & Unwin, 1957.

Norbert Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Cambridge, MIT Press, 1961.

Terry Winograd, *Procedures as a Representation for Data in a Computer Program for Understanding Natural Language*, rapport technique, Cambridge, MIT, 1971.

Marshall C. Yovits et Scott Cameron (dir.), *Self-Organizing Systems: Proceedings of an Interdisciplinary Conference*, New York, Pergamon Press, 1960.

## Articles

[Anon.], « Machines Turn Turtle: Mechanical Pets Show a Low Order of Intelligence », *Life*, vol. 28, n° 20, 1950, p. 147–151.

Peter Asaro, « Heinz von Foerster and the Bio-Computing Movements of the 1960s », dans Albert Müller et Karl Müller (dir.), *An Unfinished Revolution? Heinz von Foerster and the Biological Computer Laboratory (BCL), 1958–1976*, Vienne, Echoraum, 2007, p. 255–275.

James K. Baker, « The DRAGON System — An Overview », *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 23, n° 1, 1975, p. 24–29.

Martin Bechthold et Nathan King, « Design Robotics: Towards Strategic Design Experiments », dans Sigrid Brell-Çokcan et Johannes Braumann (dir.), *Rob|Arch: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*, Vienne, Springer, 2012, p. 118–129.

Stafford Beer, « A Filigree Friendship », *Kybernetes*, vol. 30, n° 5–6, 2001, p. 551–559.

Stafford Beer, « Towards the Automatic Factory », dans Heinz von Foerster et George W. Zopf (dir.), *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium on Self-Organization*, New York, Pergamon Press, 1962, p. 25–89.

Walter Benjamin, « L'œuvre d'art à l'époque de sa reproductibilité technique », dans *Œuvres III*, Paris, Gallimard (collection Folio essais), 2000, p. 67–113.

Frédéric Bevilacqua, Bruno Zamborlin, Anthony Sypniewski, Norbert Schnell, Fabrice Guédy et Nicolas Rasamimanana, « Continuous Realtime Gesture Following and Recognition », dans Stefan Kopp et Ipke Wachsmuth (dir.), *Gesture in Embodied Communication and Human-Computer Interaction: 8th International Gesture Workshop*, Berlin – Heidelberg, Springer, 2010, p. 73–84.

Pierre Bézier, « A View of the CAD/CAM Development Period », *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 20, n° 2, 1998, p. 37–40.

Pierre Bézier, « Example of an Existing System in the Motor Industry: The Unisurf System », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 321, n° 1545, 1971, p. 207–218.

Samuel Bianchini, « De l'agencement à l'agentivité : Opérer en contexte, opérer avec le contexte », dans Jean-Paul Fourmentraux (dir.), *Images interactives : Arts, Sciences et Cultures du visuel*, Bruxelles, La lettre Volée, 2016, p. 89–116.

Samuel Bianchini, « Towards Organogenesis: For an Instrumental Approach in Research in Art », *Media-N*, vol. 11, n° 3, 2015.

Samuel Bianchini, « .exp : De l'expérimental à l'expérimentable », dans Élie During, Laurent Jeanpierre, Christophe Kihm et Dork Zabunyan (dir.), *In actu : De l'expérimental dans l'art*, Dijon, Presses du Réel, 2009, p. 285–304.

Samuel Bianchini, « The Theatre of Operations », dans Bruno Latour et Peter Weibel (dir.), *Iconoclasm: Beyond the Image Wars in Science, Religion and Art*, catalogue d'exposition (ZKM, Karlsruhe, 4 mai – 1er septembre 2002), Cambridge, MIT Press, 2002, p. 483–485.

Samuel Bianchini et Jean-Paul Fourmentraux, « Médias praticables : L'interactivité à l'œuvre », *Sociétés*, n° 96, 2007, p. 91–104.

Samuel Bianchini et Erik Verhagen, « Practicable—Art in the Conditional », dans *Practicable: From Participation to Interaction in Contemporary Art*, Cambridge, MIT Press, 2016, p. 1–22.

Jules Bloomenthal et Brian Wyvill, « Interactive Techniques for Implicit Modeling », *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 24, n° 2, p. 109–116.

Wolfgang Böhm, « Cubic B-spline Curves and Surfaces in Computer Aided Geometric Design », *Computing*, vol. 19, n° 1, 1977, p. 29–34.

Carl de Boor, « Bicubic Spline Interpolation », *Journal of Mathematics and Physics*, vol. 41, n° 1, 1962, p. 212–218.

Antoine Bricard, Jean-Baptiste Caussin, Nicolas Desreumaux, Olivier Dauchot et Denis Bartolo, « Emergence of Macroscopic Directed Motion in Populations of Motile Colloids », *Nature*, vol. 503, n° 7474, 2013, p. 95–98.

Rodney Brooks, « Intelligence Without Representation », *Artificial Intelligence*, vol. 47, n° 1–3, 1991, p. 139–159.

Rodney Brooks, « A Robust Layered Control System for a Mobile Robot », *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 2, n° 1, 1986, p. 14–23.

Simone Brott, « Deleuze and “The Intercessors” », *Log*, n° 18, 2010, p. 135–151.

Jack Burnham, « Notes on Art and Information Processing », dans *Software: Information Technology: Its New Meaning For Art*, catalogue d'exposition (New York, Jewish Museum, 16 septembre – 8 novembre 1970), New York, Jewish Museum, 1970, p. 10–14.

Jack Burnham, « Real Time Systems », *Artforum*, vol. 8, n° 1, 1969, p. 49–55.

Jack Burnham, « Systems Esthetics », *Artforum*, vol. 7, n° 1, 1968, p. 30–35.

Bernard Cache et Patrick Beaucé, « Panneaux décoratifs — Panneaux Turing et panneau métallique », dans Frédéric Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), Paris, Centre Pompidou, 2003, p. 146.

John Cage, « Composition as Process », dans *Silence: Lectures and Writings, 50<sup>th</sup> Anniversary Edition*, Middletown, Wesleyan University Press, 2011, p. 18–56.

Matias del Campo, Adam Fure, Wes McGee, Sandra Manninger et Arthur Flexer, « Autonomous Tectonics: A Research into Emergent Robotic Construction Methods », dans Christoph Gengnagel, Axel Kilian et Julien Nembrini (dir.), *Rethinking Prototyping: Proceedings of the Design Modelling Symposium Berlin 2013*, Berlin, Universität der Künste, 2013, p. 417–432.

Peter A. Cariani, « To Evolve an Ear: Epistemological Implications of Gordon Pask's Electrochemical Devices », *Systems Research*, vol. 10, n° 3, 1993, p. 19–33.

Mario Carpo, « Parametric Notations: The Birth of the Non-Standard », *Architectural Design*, vol. 86, n° 2, 2016, p. 24–29.

Mario Carpo, « Breaking the Curve: Big Data and Design », *Artforum*, vol. 52, n° 6, 2014, p. 168–173.

Mario Carpo, « Revolutions: Some New Technologies in Search of an Author », *Log*, n° 15, 2009, p. 49–54.

Edwin Catmull et James Clark, « Recursively Generated B-spline Surfaces on Arbitrary Topological Meshes », *Computer-Aided-Design*, vol. 10, n° 6, 1978, p. 350–355.

Marjan Colletti, « An Example of [En]coding Neo Materialism: ProtoRobotic FOAMing », dans Liss C. Werner (dir.), *[En]Coding Architecture*, Pittsburgh, Carnegie Mellon University, School of Architecture, 2013, p. 57–65.

Brad Darrach, « Meet Shaky, the First Electronic Person: The Fascinating and Fearsome Reality of a Machine With a Mind of its Own », *Life*, vol. 69, n° 21, 1970, p. 58–68.

Donald Davidson, « Actions, Reasons and Causes », *The Journal of Philosophy*, vol. 60, n° 23, 1963, p. 685–700.

Manuel DeLanda, « Philosophies of Design: The Case of Modeling Software », dans Jaime Salazar (dir.), *Verb Processing*, Barcelona, Actar, 2002, p. 130–143.

Manuel DeLanda, « The Geology of Morals: A Neo-Materialist Interpretation », *Virtual Futures*, vol. 95, 1995.

Gilles Deleuze, « Qu'est-ce qu'un dispositif? », dans *Michel Foucault Philosophe : Rencontre internationale, Paris, 9, 10, 11 janvier 1988*, Paris, Seuil, 1989, p. 185–195.

René Descartes, « Discours de la Méthode (5<sup>e</sup> partie) », dans *Descartes: Œuvres et lettres*, Paris, La Pléiade, 1953.

Julien Deseigne, Olivier Dauchot et Hugues Chaté, « Collective Motion of Vibrated Polar Disks », *Physical Review Letters*, vol. 105, n° 9-27, 2010, p. 1-4.

Moritz Doerstelmann, Jan Knippers, Valentin Koslowski, Achim Menges, Marshall Prado, Gundula Schieber et Lauren Vasey, « ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15: Fibre Placement on a Pneumatic Body Based on a Water Spider Web », *Architectural Design*, vol. 85, n° 5, 2015, p. 60-65.

Kathrin Dörfler, Sebastian Ernst, Luka Piskorec, Jan Willmann, Volker Helm, Fabio Gramazio et Matthias Kohler, « Remote Material Deposition: Exploration of Reciprocal Digital and Material Computational Capacities », dans Maria Voyatzaki (dir.), *What's the Matter: Materiality and Materialism at the Age of Computation*, Barcelona, ETSAB - UPC, 2014, p. 361-377.

Élie During, « Prototypes (pour en finir avec le romantisme) », *Les Cahiers d'Artes*, n° 3, 2007, p. 91-118.

Leonhard Euler, « Recherches sur la courbure des surfaces », *Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin*, vol. 16, 1760, p. 119-143.

Robin Evans, « Translations from Drawing to Building », dans *Translations From Drawing to Building and Other Essays*, Cambridge, MIT Press, 1997, p. 153-193.

Paul de Faget de Casteljaou, « De Casteljaou's Autobiography: My Time at Citroën », *Computer Aided Geometric Design*, vol. 16, n° 7, 1999, p. 583-586.

Gerald Farin, « A History of Curves and Surfaces in CAGD », dans Gerald Farin, Josef Hirschek et Myung-Soo Kim (dir.), *Handbook of Computer Aided Geometric Design*, Amsterdam, North Holland, 2002, p. 1-21.

James Ferguson, « Multivariable Curve Interpolation », *Journal of the ACM*, vol. 11, n° 2, 1964, p. 221-228.

Sophie Fétro, « Bricolages en design : Inventer des rapports non réguliers à la technique », *Techniques & Culture*, vol. 2, n° 64, 2015, p. 152-167.

Alain Findeli, « Searching for Design Research Questions », dans Rosan Chow, Wolfgang Jonas et Gesche Joost (dir.), *Questions, Hypotheses and Conjectures: Discussions on Projects by Early Stage and Senior Design Researchers*, Berlin, iUniverses, 2010, p. 286-303.

Alain Findeli, « Rethinking Design Education for the 21st Century: Theoretical, Methodological, and Ethical Discussion », *Design Issues*, vol. 17, n° 1, 2001, p. 5–17.

Alain Findeli et Rabah Bousbaci, « L'éclipse de l'objet dans les théories du projet en design », *The Design Journal*, vol. 8, n° 3, 2005, p. 35–49.

Saul Fischer, « Architectural Notation and Computer Aided Design », *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, vol. 58, n° 3, 2000, p. 273–289.

Heinz von Foerster, « Cybernetics of Cybernetics », dans *Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition*, New York, Springer, 2003, p. 283–286.

Kurt W. Forster, « Frank O. Gehry: Guggenheim Museum, Bilbao, 1991–1997 », dans Vittorio Magnano Lampugnani et Angeli Sachs (dir.), *Museums for a New Millennium : Concepts, Projects, Buildings*, Munich, Prestel, 1999, p. 124–131.

Michel Foucault, « Le jeu de Michel Foucault », dans *Dits et écrits, 1954–1988, Tome 3: 1976–1979*, Paris, Gallimard, 1994, p. 298–329.

Sara Franceschelli, « Morphogenesis and Dynamical Systems: A View Instantiated by a Performative Design Approach », dans Michele Emmer (dir.), *Imagine Math 2: Between Culture and Mathematics*, Milan, Springer, 2013, p. 117–126.

Sara Franceschelli, « Morphogénèse, stabilité structurelle et paysage épigénétique », dans Annick Lesne et Paul Bourguine (dir.), *Morphogénèse : L'origine des formes*, Paris, Belin, 2006, p. 298–308.

Todd Gannon, Marcelo Spina et Georgina Huljich, « Ouch or Ooooh? On "Matters of Sensation" », *Log*, n° 17, 2009, p. 91–104.

William Gaver, « What Should We Expect from Research Through Design? », *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, ACM, 2012, p. 937–946.

Clement Greenberg, « Modernist Painting », dans Francis Frascina et Charles Harrison (dir.), *Modern Art and Modernism: A Critical Anthology*, Londres, Paul Chapman Publishing, 1988, p. 5–10.

Usman Haque, « The Architectural Relevance of Gordon Pask », *Architectural Design*, vol. 77, n° 4, 2007, p. 54–61.

Fritz Heider et Marianne Simmel, « An Experimental Study of Apparent Behavior », *The American Journal of Psychology*, vol. 57, n° 2, 1944, p. 243–259.

Hartley E. Howe, « Teaching Power Tools to Run Themselves », *Popular Science*, vol. 167, n° 2, 1955, p. 106–109, 222, 224.

David J. Kasik, William Buxton et David R. Ferguson, « Ten CAD challenges », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, n° 2, 2005, p. 81–92.

Evelyn Fox Keller, « Organisms, Machines, and Thunderstorms: A History of Self-Organization, Part Two. Complexity, Emergence, and Stable Attractors », *Historical Studies in the Natural Sciences*, vol. 39, n° 1, 2009, p. 1–31.

Evelyn Fox Keller, « Organisms, Machines, and Thunderstorms: A History of Self-Organization, Part One », *Historical Studies in the Natural Sciences*, vol. 38, n° 1, 2008, p. 45–75.

Branko Koralevic, « Information Master Builders », dans *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Abingdon, Taylor & Francis, 2004, p. 88–96.

Sanford Kwinter, « The Computational Fallacy », *Thresholds*, n° 26, 2003, p. 90–92.

Imre Lakatos, « Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes », dans Imre Lakatos et Alan Musgrave (dir.), *Criticism and the Growth of Knowledge, Volume 4: Proceedings of the International Colloquium in the Philosophy of Science, London, 1965*, Cambridge, Cambridge University Press, 1970.

Bruno Latour, « Where Are the Missing Masses? The Sociology of a Few Mundane Artifacts », dans Wiebe E. Bijker et John Law (dir.), *Shaping Technology / Building Society: Studies in Sociotechnological Change*, Cambridge, MIT Press, 1992, p. 225–259.

Brian Leibowitz, « Hack, Hacker, Hacking », dans T. F. Peterson et Eric Bender (dir.), *Nightwork: A History of Hacks and Pranks at MIT*, MIT Press, 2011, p. 5–7.

Jerome Y. Lettvin, Humberto R. Maturana, Warren S. McCulloch et Walter H. Pitts, « What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain », *Proceedings of the Institute for Radio Engineers*, vol. 47, n° 11, 1959, p. 1940–1951.

Joseph C. R. Licklider, « Man-Computer Symbiosis », *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, n° 1, 1960, p. 4–11.

James Lighthill, « Artificial Intelligence: A General Survey », *Artificial Intelligence: A Paper Symposium*, 1973.

Giuseppe Longo et Nabil Zakhama, « Le modèle comme regard organisateur du réel », dans Marie-Ange Brayer et Frédéric Migayrou (dir.), *Naturaliser l'architecture : Archilab 2013*, catalogue d'exposition (Orléans, Les Turbulences – Frac Centre, 14 septembre 2013 – 30 mars 2014), Orléans, HYX, 2014, p. 158–187.

William E. Lorensen et Harvey E. Cline, « Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm », *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 21, n° 4, 1987, p. 163–169.

Greg Lynn, « Giant Robots », *Log*, n° 36, 2016, p. 13–16.

Greg Lynn, « Variations calculées », dans Frédéric Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), Paris, Centre Pompidou, 2003, p. 90–92.

Greg Lynn, « Architectural Curvilinearity: The Folded, the Pliant and the Supple », *Architectural Design*, n° 102, 1993, p. 8–15.

James MacQueen, « Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations », dans *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics*, Berkeley, University of California Press, 1967, p. 281–297.

Emmanuel Mahé, « Les pratiquers », dans Jean-Paul Fourmentraux (dir.), *L'Ère post-média : Humanités digitales et cultures numériques*, Paris, Hermann, 2012, p. 117–136.

Brian Massumi, « The Autonomy of Affect », *Cultural Critique*, n° 31, 1995, p. 83–109.

Stanley Mathews, « The Fun Palace: Cedric Price's Experiment in Architecture and Technology », *Technoetic Arts*, vol. 3, n° 2, 2005, p. 73–92.

James Clerk Maxwell, « On Governors », *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 16, 1867, p. 270–283.

John McCarthy, « Recursive Functions of Symbolic Expressions and Their Computation by Machine, Part I », *Communications of the ACM*, vol. 3, n° 4, 1960, p. 184–195.

Warren S. McCulloch et Walter Pitts, « A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity », *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, n° 4, 1943, p. 115–133.

Achim Menges, « The New Cyber-physical Making in Architecture: Computational Construction », *Architectural Design*, vol. 85, n° 8, 2015, p. 9–15.

Achim Menges, « Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design », *Architectural Design*, vol. 82, n° 2, 2012, p. 14–21.

Frédéric Migayrou, « Les ordres du non standard », dans *Architectures non standard*, catalogue d'exposition (Paris, Centre Pompidou, 10 décembre 2003 – 1er mars 2004), Paris, Centre Pompidou, 2003, p. 26–33.

Robert Morris, « Anti Form », dans *Continuous Project Altered Daily : The Writings of Robert Morris*, Cambridge, MIT Press, 1993, p. 41–47.

Nicholas Negroponte, « Computer Graphics », dans *Soft Architecture Machines*, Cambridge, MIT Press, 1975, p. 53–91.

Nicholas Negroponte, « Computer-Aided Participatory Design », dans *Soft Architecture Machines*, Cambridge, MIT Press, 1975, p. 93–123.

Nicholas Negroponte, « Architect–Machine Symbiosis », dans *The Architecture Machine*, Cambridge, MIT Press, 1970, p. 9–29.

Nicholas Negroponte, « URBAN5 », dans *The Architecture Machine*, Cambridge, MIT Press, 1970, p. 71–93.

Nicholas Negroponte, « URBAN5: An On-Line Urban Design Partner », *Ektistics*, vol. 24, n° 142, 1967, p. 289–291.

Allen Newell et Herbert A. Simon, « Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search », *Communications of the ACM*, vol. 19, n° 3, 1976, p. 113–126.

Allen Newell, John C. Shaw et Herbert A. Simon, « Report on a General Problem Solving Program », *Proceedings of the International Conference on Information Processing*, p. 256–264.

Neri Oxman et Jesse Louis Rosenberg, « Material-Based Design Computation: An Inquiry into Digital Simulation of Physical Material Properties as Design Generators », *International Journal of Architectural Computing*, vol. 5, n° 1, 2007, p. 25–44.

Gordon Pask, « A Comment, a Case History and a Plan », dans Jasia Reichardt (dir.), *Cybernetics, Art and Ideas*, Londres, Studio Vista, 1971, p. 76–99.

Gordon Pask, « The Architectural Relevance of Cybernetics », *Architectural Design*, vol. 9, n° 69, 1969, p. 494–496.

Gordon Pask, « The Colloquy of Mobiles », dans Jasia Reichardt (dir.), *Cybernetic Serendipity: The Computer and the Arts*, Londres, Studio International, 1968, p. 34–35.

Gordon Pask, « The Natural History of Networks », dans Marshall C. Yovits et Scott Cameron (dir.), *Self-Organizing Systems: Proceedings of an Interdisciplinary Conference*, New York, Pergamon Press, 1960, p. 232–263.

Gordon Pask, « Organic Control and the Cybernetic Method », *Cybernetica*, vol. 1, n° 3, 1958, p. 155–173.

Andrew Pickering, « Living In the Material World », dans François-Xavier de Vaujany et Nathalie Mitev (dir.), *Materiality and Space: Organizations, Artefacts and Practices*, Basingstoke, Palgrave Macmillan, 2013, p. 25–40.

Andrew Pickering, « Beyond Design: Cybernetics, Biological Computers and Hylozoism », *Synthese*, vol. 168, n° 3, 2009, p. 469–491.

Andrew Pickering, « Cybernetics and the Mangle: Ashby, Beer and Pask », *Social Studies of Science*, vol. 32, n° 3, 2002, p. 413–437.

Antoine Picon, « Free the Robots! », *Log*, n° 36, 2016, p. 147–151.

Antoine Picon, « Architecture and the Virtual: Towards a New Materiality », *Praxis*, n° 6, 2004, p. 114–121.

Antoine Picon, « Imaginaires de l'efficacité, pensée technique et rationalisation », *Réseaux*, vol. 109, n° 5, 2001, p. 18–50.

Antoine Picon et Bob Sheil, « Q&A 4: Antoine Picon and Bob Sheil », dans Achim Menges, Bob Sheil, Ruairi Glynn et Marilena Skavara (dir.), *Fabricate: Rethinking Design and Construction*, Londres, UCL Press, 2017, p. 174–175.

Les Piegl, « On NURBS: A Survey », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 11, n° 1, 1991, p. 55–71.

Emanuele Quinz, « Dissonances absolues. Stratégies musicales participatives : L'exemple de *Musicircus* de John Cage », *Oscillations*, n° 2, 2013, p. 37–47.

Ragunathan Rajkumar, Insup Lee, Lui Sha et John Stankovic, « Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution », *Proceedings of the 47th Design Automation Conference*, ACM, 2010, p. 731–736.

Paul Ralph et Yair Wand, « A Proposal for a Formal Definition of the Design Concept », dans Kalle Lyytinen, Pericles Loucopoulos, John Mylopoulos et Bill Robinson (dir.), *Design Requirements Engineering: A Ten-year Perspective*, Berlin – Heidelberg, Springer, 2009, p. 103–136.

Gilles Retsin et Manuel Jimenez Garcia, « Discrete Computational Methods for Robotic Additive Manufacturing: Combinatorial Toolpaths », *Posthuman Frontiers: Data, Designers, and Cognitive Machines. Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, Ann Arbor, University of Michigan Taubman College, 2016, p. 332–341.

Craig W. Reynolds, « Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model », *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 21, n° 4, 1987, p. 25–34.

Éric Rieth, « La méthode moderne de conception des carènes du whole-moulding, une mémoire des chantiers navals méditerranéens du Moyen Âge », dans Horst Nowacki et Matteo Valleriani (dir.), *Shipbuilding Practice and Ship Design Methods From the Renaissance to the 18th Century: A Workshop Report*, Berlin, Max Planck Institute for the History of Science, 2003, p. 17–32.

Margit Rosen, « Gordon Pask's Cybernetic Systems: Conversations After the End of the Mechanical Age », dans Samuel Bianchini et Erik Verhagen (dir.), *Practicable: From Participation to Interaction in Contemporary Art*, Cambridge, MIT Press, 2016, p. 25–38.

Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener et Julian Bigelow, « Behavior, purpose and teleology », *Philosophy of science*, vol. 10, n° 1, 1943, p. 18–24.

Douglas T. Ross, « Origins of the APT Language for Automatically Programmed Tools », *ACM SIGPLAN Notices*, vol. 13, n° 8, 1978, p. 61–99.

Michael Rubenstein, Christian Ahler, Nick Hoff, Adrian Cabrera et Radhika Nagpal, « Kilobot: A Low Cost Robot With Scalable Operations Designed for Collective Behaviors », *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, n° 7, 2014, p. 966–975.

Warren Sack, « Network Aesthetics », dans Victoria Vesna (dir.), *Database Aesthetics: Art in the Age of Information Overflow*, Minneapolis, University of Minnesota Press, 2007, p. 183–210.

Wolfgang Schäffner, « The Design Turn: Una revolución científica en el espíritu del diseño », *Kepes*, vol. 7, n° 6, 2010, p. 61–75.

Carl Schoenberg, « Contributions to the Problem of Approximation of Equidistant Data by Analytic Functions », *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 4, n° 2, p. 112–141.

Patrik Schumacher, « Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design », *Architectural Design*, vol. 79, n° 4, 2009, p. 14–23.

Tobias Scwhinn et Achim Menges, « Fabrication Agency: Landesgartenschau Exhibition Hall », *Architectural Design*, vol. 85, n° 5, 2015, p. 92–99.

Claude Shannon, « A Mathematical Theory of Communication », *Bell System Technical Journal*, vol. 27, 1948, p. 379–423, 623–656.

Herbert A. Simon, « Heuristic Problem Solving: The Next Advance in Operations Research », *Operations Research*, vol. 6, n° 1, 1958, p. 1–10.

Luke Skrebowski, « All Systems Go: Recovering Hans Haacke's Systems Art », *Grey Room*, n° 30, 2008, p. 54–83.

Roff Smith, « Just Press Print », *National Geographic*, vol. 226, n° 6, 2014, p. 112–127.

Roland Snooks, « Volatile Formation », *Log*, n° 25, 2012, p. 55–62.

Roland Snooks et Gwyllim Jahn, « Stigmergic Accretion », dans Dagmar Reinhardt, Rob Saunders et Jane Burry (dir.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*, Cham, Springer, 2016, p. 398–409.

Alastair Townsend, « On the Spline: A Brief History of the Computational Curve », *International Journal of Interior Architecture + Spatial Design*, vol. 3, 2014.

Teal Triggs, « Scissors and Glue: Punk Fanzine and the Creation of a DIY Aesthetic », *Journal of Design History*, vol. 19, n° 1, 2006, p. 69–83.

Alan Mathison Turing, « The Chemical Basis of Morphogenesis », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 237, n° 641, 1952, p. 37–72.

Francisco G. Varela, Humberto R. Maturana et Ricardo Uribe, « Autopoiesis: The Organization of Living Systems, Its Characterization and a Model », *Biosystems*, vol. 5, n° 4, 1974, p. 187–196.

Francisco J. Varela, « The Early Days of Autopoiesis: Heinz and Chile », *Systems Research*, vol. 13, n° 3, 1996, p. 407–417.

W. Grey Walter, « An Imitation of Life », *Scientific American*, vol. 182, n° 5, 1950, p. 42–45.

John M. Westfall, James Mold et Lyle Fagnan, « Practice-Based Research—“Blue Highways” on the NIH Roadmap », *Jama*, vol. 297, n° 4, 2007, p. 403–406.

Andrew Witt, « Design Hacking: The Machinery of Visual Combinatorics », *Log*, n° 23, 2011, p. 17–25.

Xue Yan et P Gu, « A Review of Rapid Prototyping Technologies and Systems », *Computer-Aided Design*, vol. 28, n° 4, 1996, p. 307–318.

Zhengyou Zhang, « Microsoft Kinect Sensor and its Effect », *IEEE Multimedia*, vol. 19, n° 2, 2012, p. 4–10.

## Ressources en ligne

[Anon.], « Being Material », 2017, en ligne : <https://arts.mit.edu/events-visit/symposia/being-material> (consulté le 22 juin 2017).

[Anon.], « Institut du Monde Arabe : Rénovation des Moucharabiehs (interview de Loic Durand — Spectat) », avril 2015, en ligne : <http://www.alto-ingenierie.fr/articles-newsletter/institut-du-monde-arabe-renovation-des-moucharabiehs-interview-de-loic-durand-spectat> (consulté le 20 avril 2017).

[Anon.], « Agent », *Oxford English Dictionary*, en ligne : <http://www.oed.com/view/Entry/3859> (consulté le 30 décembre 2016).

[Anon.], « Agent », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/agent> (consulté le 30 décembre 2016).

[Anon.], « Analogue », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/analogue> (consulté le 21 avril 2017).

[Anon.], « Concevoir », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/concevoir> (consulté le 27 juin 2017).

[Anon.], « Contrôle », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/controle> (consulté le 10 août 2017).

[Anon.], « Cybernétique », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/cybernetique> (consulté le 1er février 2017).

[Anon.], « Démonstrateur », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/demonstrateur> (consulté le 11 octobre 2017).

[Anon.], « Émergence », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/emergence> (consulté le 4 janvier 2017).

[Anon.], « Governor », *Oxford English Dictionary*, en ligne : <http://www.oed.com/view/Entry/80323> (consulté le 20 février 2017).

[Anon.], « Homologue », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/homologue> (consulté le 21 avril 2017).

[Anon.], « Implémenter », *Académie française*, 7 février 2013, en ligne : <http://www.academie-francaise.fr/implémenter> (consulté le 6 février 2017).

[Anon.], « Intelligence », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/intelligence> (consulté le 28 mars 2017).

[Anon.], « Maintenance », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/maintenance> (consulté le 17 janvier 2017).

[Anon.], « Performatif », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/performatif> (consulté le 4 avril 2017).

[Anon.], « Performative », *Oxford English Dictionary*, en ligne : <http://www.oed.com/view/Entry/140785> (consulté le 4 avril 2017).

[Anon.], « Praticable », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/praticable> (consulté le 18 avril 2017).

[Anon.], « Responsif », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/responsif> (consulté le 28 mars 2017).

[Anon.], « Réflexivité », *Trésor de la Langue Française Informatisé*, en ligne : <http://www.cnrtl.fr/definition/reflexivite> (consulté le 4 mai 2017).

Pieter Adriaans, « Information », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2013, en ligne : <https://plato.stanford.edu/archives/fall2013/entries/information> (consulté le 9 décembre 2016).

Marcelo Coelho, « Pop-Up Factory », 2015, en ligne : <http://www.cmarcelo.com/#/pop-up-factory> (consulté le 21 avril 2017).

B. Jack Copeland, « The Modern History of Computing », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2008, en ligne : <https://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/computing-history> (consulté le 18 août 2016).

Élie During, « Redéfinir le statut de l'œuvre d'art », enregistrement audio d'une conférence donnée à la Friche Belle la Belle de Mai, Marseille, 3 novembre 2016, 2006, en ligne : [https://www.alphabetville.org/article.php3?id\\_article=44](https://www.alphabetville.org/article.php3?id_article=44) (consulté le 16 juin 2017).

Hubert d'Erceville, « Vent de fraîcheur sur l'Institut du monde arabe », *Le Monde*, 5 août 2016, en ligne : <http://www.lemoniteur.fr/articles/vent-de-fraicheur-sur-l-institut-du-monde-arabe-32803774> (consulté le 20 avril 2017).

EC2M, « Matière active », en ligne : <https://www.ec2m.espci.fr/accueil/la-recherche/matiere-active> (consulté le 5 mai 2017).

Alessio Erioli, Andrea Graziano, Bruno Demasi, Stefano Paradiso, Tommaso Casucci et Michele Semeghini, « inFORMed clay matter », vidéo présentée lors de la conférence Rob|Arch 2016: Robotic fabrication in architecture, art and design, 2016, en ligne : <https://vimeo.com/158804664> (consulté le 10 mai 2017).

Demis Hassabis, « What We Learned in Seoul with Alphago », 16 mars 2016, en ligne : <https://blog.google/topics/machine-learning/what-we-learned-in-seoul-with-alphago> (consulté le 22 avril 2017).

Charles W. Hull, « Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography », brevet US4575330 A, en ligne : <https://www.google.com/patents/US4575330> (consulté le 12 juillet 2017).

Mike Isaac, « Facebook, in Cross Hairs After Election, Is Said to Question Its Influence », *The New York Times*, 12 novembre 2016, en ligne : <https://www.nytimes.com/2016/11/14/technology/facebook-is-said-to-question-its-influence-in-election.html> (consulté le 27 mars 2017).

Jeff Kowalski, « CAD is a Lie: Generative Design to the Rescue », *Line//Shape//Space*, 5 janvier 2016, en ligne : <http://lineshapespace.com/generative-design> (consulté le 27 juillet 2016).

Christophe Leray, « Objectile : Des panneaux décoratifs surprenants dans une vaste gamme de finitions », 2008, en ligne : <http://www.travaux.com/dossier/coups-de-coeur-produits-de-la-redaction/11435/Objectile--des-panneaux-decoratifs-surprenants-dans-une-vaste-gamme-de-finitions.html> (consulté le 26 août 2016).

Steve Lohr, « IBM Is Counting on Its Bet on Watson, and Paying Big Money for It », *The New York Times*, 17 octobre 2016, en ligne : <https://www.nytimes.com/2016/10/17/technology/ibm-is-counting-on-its-bet-on-watson-and-paying-big-money-for-it.html> (consulté le 24 mars 2017).

Paul Markillie, « New Materials for Manufacturing », *The Economist*, 5 décembre 2015, en ligne : <http://www.economist.com/technology-quarterly/2015-12-05/new-materials-for-manufacturing> (consulté le 27 juillet 2016).

Paul Pangaro, « THOUGHTSTICKER: An Idiosyncratic History of Conversation Theory in Software, and its Progenitor, Gordon Pask », 2001, en ligne : <http://www.pangaro.com/history-conversation-theory.html> (consulté le 29 mars 2017).

Gilles Retsin et Manuel Jiménez García, « Computational Mereology: Large Scale Discrete Fabrication », 2015, en ligne : <http://www.bartlett.ucl.ac.uk/architecture/programmes/postgraduate/units-and-showcases/march-architectural-design/cluster4/2015-2016> (consulté le 4 janvier 2017).

Markus Schlosser, « Agency », *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2015, en ligne : <http://plato.stanford.edu/entries/agency> (consulté le 29 mai 2016).

Self-Assembly Lab, « Research and Projects », en ligne : [http://www.selfassemblylab.net/research\\_projects.php](http://www.selfassemblylab.net/research_projects.php) (consulté le 19 avril 2017).

Self-Assembly Lab, « Autonomous Mass-Assembly », en ligne : <http://www.selfassemblylab.net/AutonomousMassAssembly.php> (consulté le 19 avril 2017).

Luke Skrebowski, « All Systems Go: Recovering Jack Burnham's 'Systems Aesthetics' », *Tate Papers*, 5, 2006, en ligne : <http://www.tate.org.uk/research/publications/tate-papers/05/all-systems-go-recovering-jack-burnhams-systems-aesthetics> (consulté le 10 août 2017).

Richard Stallman, « On Hacking », 2002, en ligne : <https://stallman.org/articles/on-hacking.html> (consulté le 20 juillet 2017).





# Index des notions

## A

Abstraction, 116, 127, 133, 172, 380, 381  
Adaptation, 214, 227, 236, 325, 339, 341, 344, 346, 349, 351, 354, 356, 357, 360, 362, 363, 365, 368, 377, 381–383, 443  
Agentivité matérielle, 133–135, 137, 139, 140, 143–145, 162, 172, 192, 278, 293, 307, 362  
Algorithme, 74, 76, 103, 169, 170, 177, 180, 183, 231, 259, 260, 262, 265–270, 272, 278, 280, 283, 284, 370–372, 445  
Allographique (régime), 51–53, 56, 81  
Amorce, 121, 228, 257, 268, 323, 324, 360, 384, 436  
Analogie, 219, 221, 222, 344, 349–351, 360, 391  
Animation, 98, 105, 185  
Apprentissage, 266, 311, 331, 332, 349, 354, 367, 368, 370, 372, 373, 445  
Artisanat, 23–26, 31, 59, 61–63, 66, 90–92, 134, 135  
Artisanat numérique, 23, 24, 91, 134, 135, 149, 213, 446  
Auto-maintenance, 211–214, 239, 242, 265, 266, 273, 277, 284, 285, 293, 299, 303, 305–308, 317–320, 325, 327, 364, 378, 379, 384, 394, 434–437, 443  
Auto-organisation, 317–320, 323, 325, 351, 354, 356, 357, 360, 361, 363, 364, 374, 381–384, 388, 389, 391, 394, 396, 419, 432, 433, 435, 436

Auto-organisation matérielle, 384, 433  
Autographique (régime), 56, 81, 213, 214  
Automation, 25, 71, 92, 154, 235, 289  
Autopoïese, 206–211, 216, 317–320  
Autorité, 26, 46, 53, 56, 57, 68, 81, 128, 133, 145, 289, 321, 323, 327, 442, 444, 445

## B

Balayage, 157, 158, 160  
Biais algorithmique, 365, 370, 371  
Boîte noire, 218, 219, 221, 383, 447

## C

CAO/FAO, 72, 80, 82, 91  
Captation, 227, 234, 236, 243, 250, 251, 254, 257, 377, 385  
Cerveau, 339, 344, 348, 349, 351–354  
Cognition, 332, 333, 336, 339, 344, 346, 348, 366–368, 375  
Conception paramétrique, 105, 106  
Continuité, 89, 94, 185, 340  
Contrôle, 71, 87, 174, 216, 219, 289, 300, 308, 315, 320–325, 340, 357, 363, 364, 372–375, 380, 385, 390, 444, 445  
Conversation, 313, 320, 324, 325, 327, 331, 332, 337, 339, 356, 362–366, 373, 374, 376, 380, 383, 445  
Couplage, 207, 285, 349, 352, 354, 356, 357, 360, 361, 363, 381, 382

**D**

Découpe laser, 23, 153–155, 158, 231, 290  
 Dématérialisation, 72, 89, 221, 375, 441  
 Détour représentationnel, 378, 380, 381  
 Dessin, 14–16, 44–50, 54–56, 59, 63, 133, 158  
 Dialogue, 139, 285, 310, 313, 316, 323, 328, 331, 333, 338, 368, 373, 438  
 Diffusion, 360, 384, 435, 436  
 Dispositif analogique, 296, 338, 339, 341, 349, 356, 360, 376, 377, 381, 382, 385, 390, 421  
 Domination, 126, 131–134, 238, 321

**E**

Émergence, 16, 141–144, 147, 155, 158, 163, 164, 174, 186, 208, 212, 214, 285, 307, 310, 322, 324, 331, 346, 362, 364, 443  
 Énergie, 118, 119, 121, 124, 126, 127, 141, 158, 161, 205, 210, 211  
 Entretien, 82, 198, 199, 203, 212  
 Environnement réactif, 311–313, 315, 316, 320, 322, 327, 331  
 Équation paramétrique, 96, 97, 99–103, 106  
 Erreur, 43, 46–48, 50, 57, 90, 126, 192  
 Essentialisme, 111, 112, 127, 208, 443  
 Expression, 133–135, 145, 146, 153, 158, 275, 289, 380, 442

**F**

Fabrication additive, 13, 14, 16, 23–25, 36, 43, 127, 174, 177, 184,

227, 231, 281, 290, 295, 397, 402, 406, 409, 415, 422

File to factory, 25, 36, 81, 87, 108, 125, 127, 131, 133, 154, 185, 201, 231, 290

Forme pure, 114–116, 126, 127, 133, 173, 192, 193, 443

**G**

Générativité, 16, 18, 50, 168, 171, 182, 236, 239, 290, 443

Géométrie descriptive, 53–55, 59, 60, 62

**H**

Hacking, 147, 153, 447–450

Hiérarchie, 109, 131, 132, 137, 138, 143, 145, 148, 150, 172, 191–193, 208, 225, 323, 442

Homéostat, 317, 349, 352–356, 362, 381–383

Hylémorphisme, 109–111, 113–118, 120, 121, 123–127, 131–134, 145, 173, 184, 186, 191–193, 443

**I**

Identité, 50, 52, 53, 56, 91

Implémentation, 214

Indétermination, 16, 19, 48, 55, 146, 147, 365

Individuation, 113–116, 118, 119, 121–126, 131, 132, 143, 205, 210

Individuation vitale, 119, 205, 210

Information, 23, 51, 60, 66, 71, 72, 82, 121, 122, 146, 158, 198, 215, 217, 219, 221, 222, 251, 357

Initialisation, 228, 257, 263

Instance, 56, 99, 100, 109, 126, 193

Instrument, 28, 32, 140, 143, 146, 447, 450

Intelligence artificielle, 169, 327, 328, 333, 337, 338, 365, 366, 368, 369, 372, 373, 376, 378  
 Intention, 136, 137, 139, 141, 143, 145, 217, 299, 346, 433, 446  
 Itération, 228, 246, 266

**K**

*k*-moyennes (Algorithme), 267–269, 280, 283–285

**L**

Linéarité, 43, 72, 89, 150, 191, 193, 197, 205, 209, 233, 289–291, 442

**M**

Médiation, 24, 48, 50, 68, 116–118, 121, 132, 154, 242, 377, 385  
 Métastabilité, 119, 121, 123, 143, 144, 205, 210, 306, 365, 379  
 Matérialité, 141, 153, 163, 164, 174, 184, 208, 275, 344, 375, 376  
 Matière brute, 114, 116, 117, 173  
 Matière responsive, 384–386, 445  
 Modèle physique, 62, 63, 66, 69, 70, 72  
 Modernité, 23, 24, 26, 44, 47, 53, 54, 56, 88, 91, 134, 138, 314, 321  
 Modulation, 109, 110, 112, 113, 123–126, 158, 159, 161, 167, 193  
 Moulage, 87, 109, 114–117, 119–121, 123, 124, 127, 172, 173, 185, 186  
 Mouvement collectif, 169, 386, 388, 389, 391, 392, 400, 430, 432  
 Mouvement maker, 21–24, 26, 90, 149, 446, 449

**N**

Négociation, 140, 167, 185, 239, 285, 322–324, 345, 438, 444, 448

Non-humain, 132, 134–139, 141, 143, 147, 292, 321, 322  
 Notation, 43, 44, 46, 48, 51, 52, 54, 56, 59, 65, 68, 81, 128, 133, 172, 213, 214, 290  
 Notation ouverte, 148, 152, 172, 186, 231  
 Nouveau matérialisme, 19  
 Nouvelle matérialité, 21, 441, 446, 449, 450  
 Nuage de points, 227, 250–252, 254, 257, 265–267, 269, 283  
 Numérisation, 23, 67, 69, 227, 268  
 NURBS, 77, 79, 81, 94, 96, 102, 103, 105, 106

**O**

Objectile, 94, 95, 97, 99, 101, 107–113, 124–126, 157  
 Œuvre interactive, 200, 204, 212, 292  
 Œuvre praticable, 292–296, 299, 302–305, 307, 308, 310–312, 320, 327, 364, 370, 375–379, 384, 394, 438  
 Ontologie, 138, 139, 143, 321  
 Opération transductive, 123, 124  
 Opacité, 383, 444, 446, 447  
 Ordre de grandeur, 115–118, 242  
 Organisation, 207–210, 300, 301, 303, 318, 320, 341, 344, 351, 358, 362, 443  
 Organisme, 206, 208–210, 212, 216, 221, 222, 340, 351, 355

**P**

Paradigme albertien, 44, 46–48, 50, 53, 54, 56, 91, 112, 128, 131  
 Parcours d'outil, 68, 127, 146, 154, 158, 161, 228, 229, 231–233  
 Partitionnement, 265–267, 269, 272, 283–285

- Passivité, 26, 114, 115, 125–127, 135, 138, 141, 162, 191, 243, 324, 380, 446
- Performance, 140, 141, 143, 229, 267, 278, 294, 321, 324, 378, 381, 383, 444, 445, 447, 449, 450
- Prédiction, 331, 381
- Préparation, 115, 116, 119, 127, 173, 185, 354, 404
- Prescription, 24–27, 29, 43–45, 54, 60, 62, 68, 72, 81, 128, 145–148, 150, 158, 192, 233, 289, 290, 324, 442
- Prise de forme, 114–118, 124, 126–128, 158, 195, 225
- Prises, 257, 302, 308, 365, 376, 377, 382, 383, 437, 444, 446
- Processus de maintenance, 204, 212, 214, 215, 239, 299, 300, 305, 306, 308, 312, 316, 325, 327, 339, 365, 374, 381, 383, 384, 395, 426, 433, 437, 438, 442, 445
- Production en série, 56, 80, 81
- Production industrielle, 22–25, 43, 47, 55, 56, 59, 62, 63, 65–69, 71, 75, 80, 88, 90, 91, 126
- Production maintenue, 194, 205, 210, 211, 213, 214, 233, 285, 289–291, 299, 380
- Production non standard, 35, 36, 88, 90–97, 101–103, 105, 107, 108, 111, 112, 124–127, 131, 133–135, 145, 184, 185, 193, 289, 442, 443
- Production participative, 290, 291, 293–295, 305, 327, 328, 332, 339, 363–365, 370, 371, 377, 380, 384, 394, 434, 447
- Programmation, 154, 171, 214, 215, 327, 332, 338, 384, 443, 449
- Programmation matérielle, 216, 297, 374, 384, 391, 398, 401, 404, 426, 433, 438, 442, 444, 446, 450
- Projection, 392, 393, 432–434
- R**
- Réalisation, 208, 210
- Réciprocité, 141, 142, 185, 191, 193, 214, 292, 322, 325, 444, 445
- Réflexivité, 308, 365, 370, 372, 377, 382, 384, 433, 434, 437, 439, 444, 446, 447, 449, 450
- Régénération, 207–210, 212, 214, 239, 266, 277, 284, 292, 303, 305–307, 365, 379, 436, 443
- Réseau, 134, 138, 191, 200, 206, 207, 209, 278, 289, 292, 301, 302, 318, 325
- Rétroaction, 216–219, 221, 227, 234, 236, 239, 243, 261, 265, 268, 305, 349, 351, 443
- Recherche instrumentale, 146, 306
- Relations de production, 193, 200, 208, 210–212, 239, 266, 277, 284, 303–308, 312, 318–320, 357, 362, 382, 436, 443
- Représentation, 24, 25, 44, 53, 55, 60, 62, 82, 88, 89, 102, 103, 106, 137, 139, 229, 233, 266, 268, 321, 332, 333, 348, 378, 379, 381, 445
- Reproductibilité, 47, 53, 56, 59, 95, 127
- Robotique, 16–18, 134, 201, 226, 232, 234, 237, 243, 296, 329, 390
- S**
- Séparation, 25, 43, 44, 49, 125, 148, 150, 152, 191–193
- Simulation, 20, 82, 99, 105, 168, 237, 260, 369, 374, 380, 386, 388, 390, 396, 420, 445

Spécification, 24, 25, 31, 43, 44, 47,  
48, 51, 52, 55, 61, 63, 65, 68, 82,  
87, 146, 172, 186, 228, 231, 233,  
237, 325

Spline, 60, 61, 63, 69, 74–76

Stabilisation, 119, 192, 193, 196,  
205, 209, 211, 212, 214, 291,  
306–308, 319, 339, 354–357,  
360–362, 382, 384, 437

Standardisation, 22, 87, 88, 90–92,  
95, 112, 126, 233, 289

Stratégie, 215

Structure, 207–210, 303, 318, 351,  
354, 375, 435

Structure interne, 177, 178, 180,  
183, 185, 186, 218, 355

Système, 303–305, 313

Système cyber-physique, 234, 236

Système multi-agents, 169, 263,  
386, 390

## T

Temps-réel, 144, 150, 191, 193, 197,  
200, 201, 205, 213–215, 227, 233,  
290, 291, 293, 304, 306, 316, 328,  
380, 394, 443

Tension, 119, 120, 126, 210–212,  
299, 306, 365, 378

Traduction, 23, 50, 57, 61, 65, 70,  
133, 154, 392, 393

Trajectoire, 87, 154, 162, 178, 231,  
232, 258, 447

## U

Usinage soustractif, 23, 25, 127, 154

## V

Variabilité, 46, 90, 95, 99–103, 107,  
109, 125, 135, 193, 289

Variabilité paramétrique, 103, 105,  
106, 110, 111

Virtualité, 50, 53, 89



# Index des noms propres

## A

Abramovitz, Max, 195  
Adriaans, Peter, 122, 220  
Agamben, Giorgio, 300, 308  
Akrich, Madeleine, 138  
Alberti, Leon Battista, 24, 44–46,  
54  
Allende, Salvador, 358  
Ampère, André, 217  
Anderson, Chris, 13–15, 21  
Anscombe, Gertrude Elizabeth  
Margaret, 136  
Ashby, W. Ross, 218, 219, 317, 321,  
338, 340, 349, 351–354, 356, 361,  
362, 381–383  
Augustin (saint), 122  
Austin, John Langshaw, 139

## B

Bézier, Pierre, 63, 71, 72, 75, 77  
Baker, James, 367  
Bateson, Gregory, 218  
Baudrillard, Jean, 445  
Beaucé, Patrick, 108, 295  
Beer, Stafford, 321, 340, 357, 358,  
361  
Benjamin, Walter, 46  
Bianchini, Samuel, 69, 215, 292,  
294, 301, 302, 308, 380  
Bigelow, Julian, 217–219, 350  
Brooks, Rodney, 379  
Burnham, Jack, 312–314

## C

Cache, Bernard, 106, 108, 111, 295  
Cage, John, 187  
Callon, Michel, 138  
Campo, Matias del, 236  
Cannon, Walter B., 355

Caprani, Marco, 226  
Cariani, Peter, 376  
Carpo, Mario, 34, 35, 46, 53, 56, 91,  
92, 100, 289  
Catmull, Edwin, 80  
Cicéron, 122  
Clark, James, 80  
Coletti, Marjan, 17  
Coons, Steven A., 70, 75, 78

## D

Darrach, Brad, 337  
Dauchot, Olivier, 385, 386, 392,  
395, 396, 398–400, 403, 404, 416,  
418, 432–434  
Davidson, Donald, 136  
Davis, Stanley, 87  
de Boor, Carl, 75  
DeLanda, Manuel, 18, 19, 142  
Deleuze, Gilles, 92–97, 99, 108–  
111, 113, 124, 125, 157, 300, 318  
Delvoye, Wim, 201  
Demasi, Bruno, 226  
Denfeld, Zack, 449  
Descartes, René, 222  
Dillenburger, Benjamin, 35, 443  
Dreyfus, Hubert, 300, 366  
During, Élie, 151

## E

Eco, Umberto, 148, 186  
Edmonds, Dean, 376  
Eisenman, Peter, 107  
Erioli, Alessio, 225, 226  
Euler, Leonhard, 65  
Evans, Robin, 48–51, 133

**F**

Féto, Sophie, 147, 202  
 Faget de Casteljau, Paul de, 74, 75  
 Ferguson, James, 69, 75  
 Findeli, Alain, 31, 145  
 Foerster, Heinz von, 210, 218, 223, 317, 320  
 Foucault, Michel, 148, 300, 307, 308  
 Franceschelli, Sara, 99, 381  
 Fremont-Smith, Frank, 218  
 Friedman, Michael, 336, 374  
 Fry, Ben, 247  
 Fuller, Matthew, 370

**G**

Gaiver, William, 29  
 Gannon, Todd, 421  
 García, Manuel Jiménez, 88, 232  
 Gaudí, Antoni, 46, 313  
 Gauss, Carl Friedrich, 65  
 Gehry, Frank, 82, 94  
 Gershenfeld, Neil, 22  
 Giudice, Davide del, 225  
 Golsenne, Thomas, 147  
 Goodman, Nelson, 51–53, 56, 81  
 Gramazio, Fabio, 16, 87, 243  
 Graziano, Andrea, 225, 226, 246  
 Greenberg, Clement, 314  
 Groisser, Leon, 311, 327  
 Guattari, Félix, 318

**H**

Haacke, Hans, 314  
 Hacking, Ian, 140  
 Hadid, Zaha, 107  
 Hansmeyer, Michael, 35, 443  
 Haque, Usman, 311, 324, 372, 373, 375  
 Harrison, Wallace, 195  
 Haugeland, John, 333  
 Hayles, N. Katherine, 222, 349  
 Hebb, Donald, 341

Heider, Fritz, 137, 433  
 Huljich, Georgina, 421  
 Hull, Charles W., 13

**J**

Jacob, François, 336  
 Jahn, Gwyllim, 237  
 Joyce, James, 149

**K**

Kac, Eduardo, 446  
 Kapoor, Anish, 241  
 Keller, Evelyn Fox, 222, 317  
 Knippers, Jan, 234  
 Kohler, Matthias, 16, 87, 243  
 Kramer, Cathrine, 449  
 Kubrick, Stanley, 337  
 Kuhn, Thomas S., 28  
 Kwinter, Sanford, 18, 107

**L**

Lakatos, Imre, 28  
 Latour, Bruno, 138  
 Law, John, 138  
 Le Corbusier, 47  
 Leibniz, Gottfried Wilhelm, 92, 94, 108  
 Lettvin, Jerry, 223  
 Lia, 231  
 Lighthill, James, 366  
 Liming, Roy, 65, 66, 69, 72, 75  
 Littlewood, Joan, 311  
 Longo, Giuseppe, 368  
 Louis-Rosenberg, Jesse, 290  
 Lynn, Greg, 94, 95, 98, 99, 107, 108, 184, 381

**M**

MacQueen, James, 267  
 Manovich, Lev, 370  
 Marx, Karl, 91  
 Massumi, Brian, 318

Mathews, Stanley, 323  
 Matta-Clark, Gordon, 198  
 Maturana, Humberto, 205–209,  
 211, 216, 218, 223, 301  
 Maxwell, James Clerk, 217  
 McCarthy, John, 333  
 McCorduck, Pamela, 375  
 McCulloch, Warren S., 218, 223,  
 341, 376  
 McCullough, Malcom, 91  
 Mead, Margaret, 218  
 Menges, Achim, 234  
 Mennan, Zeynep, 88  
 Migayrou, Frédéric, 88  
 Minsky, Marvin, 328, 333, 336, 337,  
 375, 376  
 Monge, Gaspard, 53–56, 60, 62, 66  
 Morin, Edgard, 215  
 Morris, Robert, 240, 241, 243

## N

Negroponte, Nicholas, 311, 327,  
 328, 331, 333, 338, 357, 366, 371,  
 373, 441  
 Neumann, John von, 218  
 Newell, Allen, 333, 336  
 Newton, Isaac, 93  
 Nouvel, Jean, 196

## O

Otto, Frei, 46  
 Oxman, Neri, 21, 446

## P

Paine, Roxy, 16, 36, 201, 211, 241,  
 305  
 Palma, Marco, 226  
 Pangaro, Paul, 357  
 Papert, Seymour, 376  
 Paradiso, Stefano, 226  
 Pascal, Blaise, 66

Pask, Gordon, 308, 310–317, 320–  
 325, 327, 328, 331, 338, 340,  
 356, 357, 360–365, 373, 374, 376,  
 381–384, 433, 445  
 Pickering, Andrew, 139–145, 307,  
 311, 321–323, 348, 349, 378, 383  
 Picon, Antoine, 24, 47, 48, 82, 134,  
 145, 150, 294, 450  
 Pitts, Walter, 218, 223, 341, 376  
 Popper, Karl R., 28  
 Price, Cedric, 311, 323  
 Prigogine, Ilya, 317

## Q

Quagliola, Davide, 201  
 Quinz, Emanuele, 187

## R

Rabinow, Paul, 300  
 Ralph, Paul, 31  
 Reas, Casey, 247, 387, 390  
 Reichardt, Jasia, 310  
 Retsin, Gilles, 88, 232  
 Reynolds, Craig W., 169, 260, 262  
 Ribault, Patricia, 147  
 Rifkin, Jeremy, 235  
 Robinson, Abraham, 90  
 Roosegarde, Daan, 296  
 Rosen, Margit, 310  
 Rosenblatt, Frank, 339, 341, 344,  
 376  
 Rosenblueth, Arturo, 217–219, 350  
 Rosenkrantz, Jessica, 290  
 Ruskin, John, 90, 134, 135  
 Rutten, David, 182

## S

Sack, Warren, 371, 379  
 Sample, Hillary, 195, 198  
 Schöffner, Wolfgang, 336, 374, 441  
 Schumacher, Patrick, 107, 147  
 Sedol, Lee, 369

Sehgal, Tino, 303  
Shannon, Claude, 122, 218–222  
Simmel, Marianne, 137, 433  
Simon, Herbert A., 333, 336, 337  
Simondon, Gilbert, 109, 110, 113–  
126, 131–134, 143, 144, 158, 173,  
205  
Snooks, Roland, 104, 237, 387  
Spina, Marcelo, 421  
Spuybroek, Lars, 91, 108, 134, 135  
Stallman, Richard, 22  
Steele, Jack, 340  
Stenson, Molly Wright, 331, 372  
Stuart-Smith, Robert, 387  
Sutherland, Ivan E., 79

## T

Tinguely, Jean, 201, 203  
Toffler, Alvin, 88  
Tondeur, Anaïs, 394

## V

van Herpt, Olivier, 16, 231, 243  
Varela, Francisco, 205–209, 211,  
216, 218, 223, 301  
Verhagen, Erik, 292, 294, 301, 302,  
308  
Versprille, Kenneth, 78

## W

Waddington, Conrad Hal, 98, 381  
Walter, W. Grey, 321, 338, 340,  
344–346, 348, 349, 379  
Wand, Yair, 31  
Wiener, Norbert, 210, 216–219,  
350, 447  
Winograd, Terry, 334  
Witt, Andrew, 147, 450

## Z

Zakhama, Nabil, 368



Ce document a été mis en forme à l'aide du système L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Le texte est composé dans le caractère URW Garamond, dessiné par la fonderie URW++ et distribué sous les termes de la Aladdin Free Public Licence.

Imprimé en novembre 2017 à l'imprimerie Launay, Paris.



Alors que l'évolution des pratiques de fabrication numérique dans les champs de l'art, de l'architecture et du design semble pointer vers l'émergence d'une « nouvelle matérialité », marquée par les développements contemporains de la robotique, de la computation et des sciences des matériaux, les discours entourant l'usage des machines à commande numérique restent trop souvent dominés par une compréhension passive de l'idée de matière. Cette thèse se propose d'actualiser la vision des rapports entre conception numérique et matérialité, en développant des schémas productifs ouverts à l'expression de formes d'agentivité matérielle. Cherchant à dépasser l'articulation prescriptive traditionnelle entre conception et fabrication, elle défend l'idée d'une redistribution de l'autorité vers un réseau d'acteurs productifs autonomes. L'argument développé vise avant tout à mettre à jour des méthodologies pratiques ainsi qu'un cadre conceptuel partageables, susceptibles d'être réinvestis par d'autres praticiens. Cinq expérimentations pratiques, reliées par leurs usages prospectifs de la programmation et de la fabrication numérique, en constituent l'ossature empirique. Mobilisant des auteurs comme Gilbert Simondon et Andrew Pickering, le travail de conceptualisation réalisé permet d'opérer un retour réflexif sur ces expériences, et d'en situer les enjeux au regard d'un certain nombre de précédents historiques, tels ceux de la production numérique non standard et de la cybernétique.

## Résumé

Alors que l'évolution des pratiques de fabrication numérique dans les champs de l'art, de l'architecture et du design semble pointer vers l'émergence d'une « nouvelle matérialité », marquée par les développements contemporains de la robotique, de la computation et des sciences des matériaux, les discours entourant l'usage des machines à commande numérique restent trop souvent dominés par une compréhension passive de l'idée de matière. Cette thèse se propose d'actualiser la vision des rapports entre conception numérique et matérialité, en développant des schémas productifs ouverts à l'expression de formes d'agentivité matérielle. Cherchant à dépasser l'articulation prescriptive traditionnelle entre conception et fabrication, elle défend l'idée d'une redistribution de l'autorité vers un réseau d'acteurs productifs autonomes. L'argument développé vise avant tout à mettre à jour des méthodologies pratiques ainsi qu'un cadre conceptuel partageables, susceptibles d'être réinvestis par d'autres praticiens. Cinq expérimentations pratiques, reliées par leurs usages prospectifs de la programmation et de la fabrication numérique, en constituent l'ossature empirique. Mobilisant des auteurs comme Gilbert Simondon et Andrew Pickering, le travail de conceptualisation réalisé permet d'opérer un retour réflexif sur ces expériences, et d'en situer les enjeux au regard d'un certain nombre de précédents historiques, tels ceux de la production numérique non standard et de la cybernétique.

## Mots Clés

Conception, fabrication numérique, matérialité, agentivité, code.

## Abstract

Recent developments in digital fabrication practices across the fields of art, architecture and design have inspired the notion of a "new materiality" — a rethinking of our relationship to the physical world in light of the ever-increasing convergence between robotics, computation and materials science. Yet, the very use of computer-controlled machinery remains, more often than not, envisioned in terms of a passive understanding of matter. This thesis aims at offering an updated vision of the relationship between materiality and design, by developing new production schemes allowing for an expression of material agency. Criticizing the traditional idea of a prescriptive, deterministic link between design and fabrication, the proposed argument reframes authority as a shared resource, spread through a network of productive and autonomous agents. The thesis' main outcomes consist in a set of practical methodologies as well as an encompassing conceptual framework, which may both be reinvested by other practitioners. Informed by and grounded in practice, the research builds on five experiments, adopting a prospective approach towards programming and digital fabrication. Drawing on authors like Gilbert Simondon and Andrew Pickering, the accompanying conceptualization allows for a reflexive discussion of the thesis' practical developments, while situating them in respect to such historical precedents as non standard production and cybernetics.

## Keywords

Design, digital fabrication, materiality, agency, code.