

Machines à voir, machines à penser : écosystème robotique situé pour la conception architecturale

Machines to see, machines to think: A situated robotic ecosystem for architectural design

Raphaël Masbernat¹, Églantine Bigot-Doll^{1,*}, Maxime Fouillat¹, Elisabeth Sulmont¹, François Pacquelet¹, Antoine Chevalier¹, Naomi Pereira¹, et Chloé Blanc¹

¹MAP-Aria, ENSA de Lyon, Vaulx-en-Velin, France

Résumé. L'équipe cobotique du MAP-Aria a développé un dispositif de prototypage robotique à petite échelle visant à exacerber les dimensions tactile et proprioceptive de l'expérience de conception. Nous programmons et expérimentons des protocoles de fabrication additive mis en orbite dans une boucle feedback en tant que capture analogique sur l'environnement par un robot 6-axes modifiant pas à pas la trajectoire du système. De ce « *machine behavior* » résulte un « *design behavior* » à travers la mise au point d'instruments haptiques et la production d'objets en série. Le processus de conception intègre alors dès ses premières itérations une perception approfondie des écarts et des résonances entre objets numériques simulés et artefacts physiques fabriqués. Navigant entre nécessité de simulation située et volonté de fiction, la mise en œuvre de schémas technologiques ouverts à la reprogrammation et à l'indétermination rencontre les activités fécondes de bricolage et d'improvisation, de spatialisation et de fabulation propres au moment de conception.

Mots clés. Processus ; Substrat ; Fiction ; Rétroaction ; Interface ; Instrumentation – Haptique ; Cobotique.

Abstract. The MAP-Aria cobotics team has developed a small-scale robotic prototyping device aimed at exacerbating the tactile and proprioceptive dimensions of the design experience. We have programmed and experimented additive manufacturing protocols, put into orbit in a feedback loop - an analog capture of the environment by a 6-axis robot - modifying step by step the trajectory of the system. From this "machine behavior" results a "design behavior" through the development of haptic instruments and the production of objects in series. The design process then integrates from its first iterations a deep perception of the gaps and resonances between simulated digital objects and manufactured physical artifacts. Navigating between the need for situated simulation and the desire for

*eglantine.bigot-doll@lyon.archi.fr

fiction, the implementation of technological schemes open to reprogramming and indeterminacy meets the fertile activities of tinkering and improvisation, of spatialization and fabrication proper to the moment of conception.

Keywords. Process; Substrate; Fiction; Feedback; Interface; Instrumentation - Haptics; Cobotics.

1 Introduction

L'activité de conception implique de plus en plus de comprendre le fonctionnement d'outils numériques de dessin, de modélisation et de prototypage. Mais elle permet au-delà de comprendre leurs modes d'existence, qui impliquent et révèlent leur dimension physique et située - temps de calcul, défaillance du hardware, restriction des interfaces à un corps « opérateur », etc. Cette dimension permet en retour d'étudier ce qui dans le design en tant que « processus de conception » relève de l'automatisme déterritorialisé, asservi à l'outil numérique, ou d'une perception hybride qui agit sur et altère son milieu.

Du fait de sa situation, un laboratoire intégré à une école d'architecture et impliqué dans sa pédagogie, notre démarche expérimentale a pris pour terrain d'enquête l'expérience d'apprentissage, considérée comme essentielle pour la compréhension des pratiques de création ou de conception. La pédagogie est en effet le lieu par excellence où sujet et objet de connaissance se co-constituent mutuellement en adoptant des outils, des méthodes, constitutives d'un regard concepteur.

Dans le contexte d'une pédagogie du processus de conception architectural, il s'agit de questionner l'usage d'interfaces de CFAO standards avec les étudiant.e.s. En élaborant des stratégies pour les « territorialiser » - ce qui en implique la modification, la singularisation - il devient possible de prendre la mesure des impacts sociaux et environnementaux de ces dispositifs à travers leur manipulation.

A ce titre, l'exploration des dispositifs cobotiques au service d'une conception architecturale prospective est au cœur de notre questionnement : comment, par ces continuums d'outils dits avancés, les appareils produits sont-ils en mesure d'informer la matière entre geste et algorithme, marge d'indétermination et robustesse de la machine robotique, individuation et rhéologie ?

2 Transduction, rétroaction et interface haptique

2.1 Incarnations par objets-images

Compris à travers le prisme du projet, le processus de conception est réputé mettre les architectes en rapport avec une situation distante ou encore inexistante (tabula rasa), un lieu inconnu à connaître dont il faut produire l'image, le récit ou la carte pour s'en donner l'accès. Dans le *Le Mont Analogue* de René Daumal, des explorateurs se lancent dans un voyage vers une île imaginaire, qu'ils finissent par faire exister réellement à force d'en produire ou d'en poursuivre l'image. Dans le conte d'E. A. Poe *The Pit and the Pendulum*, c'est à travers la perception d'un captif tentant de trouver son chemin en tâtonnant dans les ténèbres qu'une architecture carcérale est peu à peu reconnue avec effroi. Ces fictions où l'existence d'un lieu est contingente de son exploration témoignent d'un passage à l'existence particulier, où l'on ne retrouve pas le processus de réalisation linéaire du projet mais plutôt une réalité intermédiaire, une situation réversible, un milieu entre lieu inventé et lieu découvert. Peuplé

d'outils, de tableaux et d'écrans, d'instruments de mesure et de dessin, cet environnement technologique et fictionnel est constitutif de l'activité de conception.

Ainsi elle n'est pas une « boîte noire » [1], mais au contraire un milieu actif d'individuation technologique, d'expression et d'implication du savoir. Comme développé par V. Beaubois, ni l'intentionnalité des concepteur.ices ni la finalité de l'objet produit ne permettent de saisir la conception comme processus pragmatique et milieu technique. Le concept simondonien d'objets-images nous en livre un axe de compréhension décisif [2] :

« L'objet-image est un véritable intermédiaire entre concret et abstrait quand il condense plusieurs fonctions en unité (s'il correspond à une seule fonction il reste abstrait) et emploie des solutions qui le rattachent au réseau des réalités contemporaines ; sa réalité d'image est alors paradigmatique : elle permet de comprendre d'autres réalités connexes avec lesquelles elle s'articule et dont elle est solidaire. »

« Le design ne produit pas d'objet » [1] au sens d'assemblage solide formant un « bloc » [3], mais des objets intermédiaires mis en tension, entrant en résonance, atteignant divers degrés de réalité ou de concrétisation du projet. En phase de conception, les modélisations, les descriptions d'un lieu à habiter ou d'un objet à construire, tendent à jouer le rôle d'interfaces affectives permettant de connecter et articuler des structures de signification et de fonctionnement hétérogènes, non également stabilisées ou achevées. Cette sphère de la génération et de la re-production d'objets-images bouclant « les uns dans les autres » [1] requiert la participation sensible et singulière des designers ou architectes et pourtant la précède en tant que réalité pré-individuelle et collective - qui renvoie aux conditions de production matérielle et immatérielle d'une époque.

A ce titre on doit noter qu'ayant mis en lumière cette caractéristique générale de l'activité de conception, Beaubois ne semble pas vouloir traiter les objets-images de design ou d'architecture dans leur spécificité historique. La prise en compte de cette histoire pourrait toutefois avoir des retombées pragmatiques sur l'étude de ces pratiques comme "regards" ou points de vue - comment l'image passe dans l'outil, la rationalité dans la technique, le représenté dans la représentation, etc. ?

2.2 Lignes trajectives

Certes, l'objet-image n'est pas à comprendre au pur sens d'image optique, ni simplement dans l'acception classique de modèle, de copie ou de substitut. Pourtant ces images sont historiquement produites pour et au sein d'un espace d'aménagement du regard et de reproductibilité technique [18], un espace optique de pré-vision dont les lignes pures instruisent la découpe des surfaces en panneaux standards et en assemblages modulaires.

Dans *Le destin des images*, Rancière distingue pour son compte trois types de lignes caractérisant l'émergence du design : ligne sans épaisseur du dessin, ligne d'objets vendus en série, et enfin une « ligne d'assemblage » [4]. Cette dernière nous intéresse particulièrement car elle révèle l'épaisseur d'un milieu vivant au cœur même ou sous la surface de ce règne du « regard concepteur » [1] : la condition de possibilité de ses objets-images réside dans la réalité sociale du travail mécanisé, leur structuration visuelle dépend d'une réalité proprioceptive automatisée, schématisée et transférée du corps humain à la machine [5]. Les objets-images du processus de conception ne sont certes pas purement rétinien, mais au contraire massivement sémiotisés. Toutefois, plus que de simples « réservoirs à images » cognitifs constitués dans le déroulement pragmatique du processus de conception, ils peuvent être conçus comme cristallisant « l'orbite du mouvement » d'un processus de fabrication et d'assemblage. Abstraite des rapports sociaux de production qui les a rendus possible, cette orbite devenue chaîne opératoire (usiner tel élément pour l'assembler de telle manière, etc.) structure l'inconscient du processus de conception, moins

comme un langage que comme gestes de réalisation technique – n’a-t-on pas de ce point de vue moins à faire à un vocabulaire transparent qu’à une géométrie cachée ?

Enfin Alexandra Midal [6] qui présente Catharine Beecher comme la pionnière du design industriel, propose en filigrane un quatrième type de lignes encodé dans la ligne de conception : la ligne de conduite. Au XIX^e siècle, Beecher édite plusieurs manuels à l’adresse des pionnières américaines, où elle énonce un ensemble de règles devant gouverner l’économie domestique : optimisation des outils et des gestes du quotidien pour gagner du temps de vie sur le travail gratuit d’entretien du foyer alors essentiellement féminin, et améliorer son existence au travers d’une rationalisation des usages habituels. Ces nouveaux modes de conditionnement des conduites individuelles faisaient l’objet d’une discipline domestique (à vocation émancipatrice selon Midal, puisqu’ayant vocation à alléger l’effort et la charge de travail) enseignée dans les écoles de jeunes filles également créées par Beecher.

Le fond sur lequel sont tracées ces lignes est un espace de gouvernement des corps et de planification de l’économie industrielle autant que de l’aménagement du territoire [7]. Cette rationalisation des routines quotidiennes comme des gestes d’assemblage ou de fabrication, qui connut son paroxysme en Europe dans l’hygiénisme du tournant du XX^e siècle [8], prend place dans un programme spatialisé autant que dans un « espace scripté » [9] que construisent et peuplent les outils de conception. Si ces derniers renvoient au premier regard à des pratiques et des cultures visuelles, la territorialité activée dans leur usage sous-tend une réalité sensorimotrice complexe. Quand bien même se prêtent-ils amicalement aux manipulations graphiques de « montages » et « mises à l’échelle » des architectes [1], ces objets-images communiquent avec la sphère plus obscure des gestes et des performances. Sous les images des gestes, sous ces gestes d’autres images, etc. : cette réalité intermédiaire entre objectif et subjectif des objets-images pourrait bien être « trajective » [10].

L’intérêt de mettre à jour une dimension proprioceptive et trajective propre aux processus de conception, cristallisée dans ses objets-images associés, apparaît plus évident dès qu’il s’agit de concevoir un monde où des agentivités non-humaines ou imperceptibles (dont la visibilité et la gestualité n’ont rien d’évident) auraient vocation à inclure les processus de fabrication. Mais il s’agit peut-être également de reconnaître ce qui de vivant pensant et percevant subsiste déjà en tant que tel dans la genèse des dispositifs numériques, dans leurs opérations de capture et de schématisation - ce qui de vivant s’y hybride ou s’en soustrait déjà.

2.3 Boucles situées

Établir une forme de proximité sensible avec les objets numériques modélisés, flottant par défaut dans un espace optique délivré des frictions et durées matérielles, constitue depuis une cinquantaine d’années un effort inhérent à la conception architecturale en tant que pratique *spatialisante*, mais également comme processus d’apprentissage continu (répondant d’une « techno esthétique » chère à Simondon). Le projet de John Frazer [11] et ses algorithmes génétiques contrôlant un traceur peut être considéré comme précurseur et directeur de ce champ de la recherche en design.

Ce sont moins des plans anatomiques que des schèmes dynamiques et des phénomènes d’autopoïèse qu’il s’agit alors de rendre visibles. Les robots permettent d’atteindre et cartographier des milieux inconnus ou réputés inaccessibles, où le corps humain fait ou est mis en défaut [5]. Un robot n’est en réalité pas plus « situé » qu’un rocher inanimé mais, comme nous le proposons expérimentalement dans la suite de cet article, le dispositif qui agence les attentes des concepteurs et usagers à un lieu par la volonté de le cartographier guide l’individuation du dispositif robotisé, anime sa conduite, et nourrit une forme distribuée de perception et d’intelligence dans l’appréhension d’un milieu vivant.

Le principe de rétroaction peut également décrire le processus de conception même, en tant qu'adaptation continue d'un comportement ciblant un objectif, réduisant le plus possible la marge d'indétermination à son approche. Si on conçoit que les objets manipulés par les architectes peuvent s'apparenter à des images cognitives, il revient à « l'approche pragmatique » [1] de considérer l'empreinte matérielle et tactile cheminant dans le processus de production d'un projet de design ou d'architecture, médiée par des objets et des outils tangibles (maquette, hardware, etc.) et avant tout par des gestes de manipulation.

2.4 Bake makers

L'introduction des outils robotiques dans l'enseignement et la recherche en architecture ouvre, dans un moment d'intégration intensive des outils numériques dans tous les processus de production, à un retour des pratiques de prototypage au cœur de l'activité de conception. Simuler un assemblage ou la mise en œuvre d'un matériau consistera moins dans une production d'images prescriptives ou suggestives que dans la démonstration d'une procédure maîtrisée, passant par l'étape du protocole expérimental. Mais de la même manière que les objets du design ne sont pas des objets au sens trivial, les gestes qu'ils permettent d'abstraire ne sont pas des gestes anodins : du parcours d'outil à la manipulation d'un objet, à l'appropriation d'un espace, on trouve des schémas sensorimoteurs toujours plus complexes, des routines et des rythmes de plus en plus difficilement programmables.

Afin d'explorer nos hypothèses par la pratique cette recherche a débuté par la création d'un environnement de conception-fabrication robotisé, puis de la mise en place de trois protocoles : **Concoction**, **Calibration** et **Sériation**. Cette méthodologie a été mise en place à la fois pour encadrer une pratique de recherche-crédation nourrie par des protocoles expérimentaux répliquables, et à la fois pour encadrer une pratique pédagogique d'initiation aux problématiques, aux corpus et aux outils relatifs à l'automation en architecture. Elle a donc été pensée pour s'adapter à des contextes d'expérimentation par la pratique collective (workshops, ateliers) et s'adresser à un public étudiant en design ou en architecture.

3 Conception du dispositif de prototypage

3.1 Description du dispositif

Le dispositif consiste en une plateforme de prototypage à usage collectif, gravitant autour d'une interface de fabrication robotique comprenant un bras 6-axes et une simulation de ce robot dans Rhino-Grasshopper, permettant de simuler ses mouvements et de lui envoyer des instructions pas à pas. Nous avons conçu cette interface pour programmer aussi bien des parcours d'outils linéaires (avec un début et une fin comme un g.code dans l'impression 3D) que des routes évoluant d'itérations en itérations par un apport de données prélevées sur l'environnement du robot. Le dispositif a ainsi vocation à potentiellement soumettre le développement algorithmique à une physicalité qui l'informe en retour – rétroaction de l'environnement de fabrication sur le comportement du robot [Fig. 1.]. L'élaboration de cette plateforme débute par le choix d'un matériau et d'une technique de mise en forme.



Fig. 1. Protocole d'extrusion à la demande via capture de distance.

L'impression 3D (*fused filament fabrication*) est une technique dite de fabrication additive (*additive manufacturing*) consistant généralement à reproduire un volume numérique quelconque initialement décrit comme un maillage, en le découpant en stries horizontales. Ce découpage coïncide avec le parcours d'un outil d'extrusion qui superposera des filaments de matière adhérant entre eux couche par couche, comme pour « remplir » l'enveloppe virtuelle du volume à reproduire. Tout matériau pouvant se structurer sous cette forme en sortie de buse, c'est-à-dire pouvant être réduit en pâte semi-fluide (ou réduit en fine poudre, jouant le rôle de matrice dans cette pâte) semble pouvoir candidater à l'imprimabilité. Le matériau devient « matière préparée pour la forme » [12] : mais matière quelconque pour forme quelconque ? Il s'agit bien d'une procédure de sémiotisation des matériaux, les « infinies possibilités » [13] offertes n'étant autres que celle de la programmation de leurs comportements dans le temps. Faire fil de toute essence, pour pouvoir faire signe de tout corps, renvoie à une image de la production matérielle entièrement polarisée par le regard concepteur dont les modèles ordonnent le réel pour y médiatiser ses (objets-) images.

3.2 Définition du matériau

On choisit donc d'investir un protocole de fabrication en tant que sa genèse et son processus d'individuation nous semble symptomatiques d'une prédominance du regard concepteur sur la prise de forme matérielle, reléguée à un pur régime d'exécution. C'est une même démarche « symptomatologique » qui nous donne à choisir un premier matériau d'enquête.

En tant que promesse technologique, l'impression 3D argile congédie les pratiques séquencées de mise en forme propres aux artisans de la terre crue ou de la céramique, pour faire de l'argile un « plastique minéral » [14] assimilable à un filament. La scalabilité du procédé consiste donc d'une certaine manière dans la déterritorialisation de ce matériau, au profit de l'achèvement d'un objet dessiné au préalable (prévisible) : tout l'effort de création et le pouvoir de décision semble par-là délégué à l'activité de conception. Enfin, en tant que média, elle peut être décrite comme une technique de reproduction physique tridimensionnelle d'une image numérique bidimensionnelle - au sens d'image optique comme au sens d'image idéale à copier.

Matériau adopté dans une large diversité de pratiques de fabrication - de l'échelle domestique voire cosmétique, aux échelles architectonique et urbaine - l'argile témoigne d'une intense territorialisation et d'une haute spécialisation des techniques à travers l'histoire et les climats, évidemment liées à la composition des sols. Ses propriétés physico-chimiques en font un matériau modelable, adéquat au moulage ou à la gravure, et réemployable : il semble donc parfait pour les processus de recherche de forme et d'achèvement d'objets de

toute espèce. Ses propriétés mécaniques et thermiques (terre crue ou terre cuite) ont pu être exploitées dans la construction, aussi pour la facilité d'accès à de vastes gisements. Largement présente dans les usages alimentaires, l'argile est également utilisée comme médicament ou encore comme modèle miniature d'un membre à guérir, objet offert aux dieux lors de rituels de soin en Rome Antique. Cette omniprésence dans le réel par le biais d'artisanats traditionnels, semblant conformer la matière à des formes parfaites et idéales, s'accompagne d'une omnipotence dans le mythe faisant l'expérience d'un terrible changement d'état, de tas de glaise inerte à corps animé, de non-être informe à forme intelligente organisée. Cette réputation de « matière abstraite » ou « matière passive », en attente de recevoir sa forme d'une intentionnalité créative agissante, renvoie à la plasticité de l'argile, qui la rend modelable « à volonté », plutôt qu'à des conditions de production réelles et situées [15].

On fait l'hypothèse qu'on peut étudier ces logiques de conception, reposant sur le principe d'une matérialité programmée (modélisation, simulation, abstraction, sémiotisation) en faisant se « rencontrer » l'agentivité d'une pâte d'argile avec une routine robotique de fabrication dérivé du procédé d'impression 3D. On reformule le procédé dans un modèle schématique : rencontre d'un matériau-pâte ou filament extrudé et d'une surface de contact, la couche inférieure faisant office de support d'adhésion à la couche supérieure en cours de déposition. Il s'agit également de retraverser le processus d'automatisation d'une tâche complexe par schématisation d'un geste vivant - qui ici doit percevoir et orienter l'écoulement d'une fluide visqueux pour en tirer des motifs reproductibles. La méthode retenue pour faire émerger un dispositif viable repose sur deux boucles d'apprentissage précédant les boucles de production.

4 Apprentissage et incertitude

4.1 Concoction

Le protocole **Concoction** a consisté dans un workshop de trois jours accueillant sept étudiant.e.s à l'Ensa Lyon. Cette expérimentation proposait une exploration ludique des potentialités de prise de forme générées par l'extrusion d'argile au moyen d'un dispositif DIY (une seringue de 100 mL pluggée à une entrée d'air comprimé), invitant à cheminer dans un procédé allant du geste au matériau, à l'écran et au dessin, enfin au code et à la fabrication numérique. La matérialité et la spatialité de ces gestes sont projetées par les participant.e.s, dans l'action d'un outil porté par un robot : des textures répétitives émergent, initiant des variations de motifs. On a pu classer ces textures selon deux typologies : (1) filament tissé – un fil continu d'argile rend lisible le parcours de l'outil (2) bulles agrégées – l'argile est ponctuellement extrudée et agrégée dans sa propre masse. Malgré l'adoption et le mimétisme d'un comportement automatisé, on a pu observer des gestes soignés. En outre, la fatigue qui suit l'effort nécessaire à pousser la matière, redoublée par l'inhomogénéité de la pâte, a généré des gestes lents, hésitants, tremblants. Favorisant la spontanéité et l'improvisation, ce contact manuel avec la technique investiguée constitue la première boucle d'apprentissage du dispositif, une compréhension empirique des schèmes perceptifs et des paramètres en jeu, mais permet également d'ouvrir ce schématisme à des conduites improductives, à l'expression de durées matérielles, psychologiques, ou physiologiques, ne résultant sur aucune forme. L'expérimentation s'est clôturée par une session de scans numériques des structures miniatures [Fig. 2.] produites par photogrammétrie et par la sélection d'une typologie de gestes de déposition à automatiser, schématisé dans un graphe « idéal » de rétroaction robotique.



Fig. 2. Numérisation d'un artefact extrudé manuellement. De l'encre de Chine a été injectée dans l'objet avant séchage afin d'en accentuer les contrastes et rendre son relief plus « lisible » pour le logiciel de photogrammétrie.

Cette logique d'activation-désactivation de l'extrusion, qualifiée d'« extrusion sur commande » dans la littérature (*on-demand extrusion method*), offre la possibilité de contraindre la modulation du débit d'extrusion à l'activité d'un organe sensoriel captant le « substrat » - le support de déposition de la pâte. Deux logiques d'acquisition ont été initialement sélectionnées : 1/ un capteur infrarouge de distance monté en tête d'outil, qui a vocation à prélever une information en « temps réel » sur l'environnement du robot - information de distance utile dotant le robot d'un équivalent à la proprioception 2/ un scanner laser tridimensionnel qui permet d'actualiser pas à pas une cartographie précise de l'environnement de fabrication par nuages de points, au voisinage desquels les trajectoires du robot seront re-calculées à chaque itération. La matérialité préalable et émergente du processus de fabrication se manifeste donc sous la forme d'un signal en temps réel et sous la forme d'une carte sur laquelle naviguer. Du point de vue de cette fonction haptique, l'action robotique et l'agentivité de l'argile peuvent être interprétés comme des instruments de perception consistant à « palper » le substrat, et les artefacts produits comme traces sédimentées de ce geste d'appréhension d'un milieu préalable inconnu, exploré et reconnu pas à pas.

4.2 Calibration

Le protocole **Calibration** propose de faire entrer en résonance deux boucles d'apprentissage distinctes : parallèlement à la prise en main du système d'extrusion industriel par les chercheur.euses (assemblage des outils, formulation de la pâte, identification des variables d'impression, programmation de la trajectoire robot, observation de l'écoulement de l'argile à travers la filière et en sortie de buse), une stratégie de réalisation du « graphe idéal » par *deep learning* a été expérimentée. A travers la variation de deux paramètres d'impression corrélés (vitesse de déplacement du robot et vitesse du moteur pas à pas, déclenchant et désactivant l'extrusion de la pâte), une série d'éprouvettes est imprimée, numérisée et traitée par un outil de comparaison algorithmique – les paramètres liés au comportement de l'argile (composition, viscosité, pression de l'air comprimé, etc.) sont volontairement abstraits. Cette procédure consiste à comparer une photographie de profil de l'éprouvette avec une surface abstraite, considérée comme modèle idéal. Le taux de coïncidence entre les deux images (établi par parcours de pixels) est alors calculé et classé dans un tableau affichant chaque image. Ce tableau met en lumière des symétries par diagonales, proportionnalité entre deux valeurs d'entrée : il témoigne d'un équilibre entre débit d'argile extrudé, force motrice du

robot, réaction du substrat et forces de cohésion de l’argile. Les données résultantes de cet abaque peuvent ensuite être traitées par un réseau de neurones dans le but de calculer des corrélations avec les autres variables d’impression, initialement fixées comme constantes. Implémenté dans le code du robot, cet algorithme pourrait théoriquement décider de faire varier ces paramètres en cours de déposition, par analyse numérique du substrat en temps réel, pour maximiser le taux de réussite de prise de forme de l’argile. Ce qui ressort pourtant de plus notable des paramètres physiques du processus est l’absence d’un rapport de proportionnalité en termes de textures, de temps d’impression et donc de séchage de l’argile en cours de déposition. Il n’y a donc pas d’extrapolation du processus possible à ce stade. Nous nous questionnons quant à la possibilité d’une déposition oblique.

On préfère prendre place dans la boucle et actualiser empiriquement la trajectoire du robot en fonction de l’observation des séries d’objets produits. Le choix de déconnecter l’outil actuateur du système central de contrôle du robot ouvre la piste d’un “outil percevant” modulaire, pouvant être adapté d’une machine à l’autre, voire utilisé manuellement en phase de simulation initiale (voir **Concoction**) ou de collaboration avec la machine en cours de fabrication. L’interface reste un assemblage solide dans la mesure où l’on a pu établir des corrélations empiriques et numériques entre déplacement du robot et activité de l’outil percevant. La déclinaison et l’extrapolation de ces corrélations peuvent être à présent anticipées dans l’interface Rhino-Grasshopper à travers la modélisation des trajectoires robotiques. L’environnement de modélisation 3D, conçu pour manipuler des « géométries solides », permet de stocker et d’afficher les informations collectées durant le processus, conférant une prédictibilité - certes empirique - au système.

4.3 Sériation

Le protocole **Sériation** prolonge l’expérience des abaques en expérimentant d’autres boucles de numérisation et de production en série. Il s’agit de développer un point de vue sur la conception paramétrique en comprenant une logique de prototypage physique. Le contexte pédagogique offre un moment privilégié de réflexion sur cette dimension rétroactive de la conception, un moment de réflexivité créative pour la conception elle-même. La progression et la réussite de l’apprentissage du projet en autonomie maximale par répétition et feedback ne sont pas quantifiables et lorsque les premiers imprévus surgissent, on développe à la fois des réflexes et à la fois on désautomatise le processus de conception. L’objectif à atteindre est encore très flou et méconnu : il s’agit moins de reproduire une image attendue que d’habiter ludiquement et consciencieusement le processus même. Par ailleurs, lors du contact neuf avec les outils, on ne développe pas simplement une compétence, on subjectivise les outils mêmes - et les outils nous subjectivisent en retour. En résultent des « matériaux de conception » incongrus au regard des objets-images traditionnels - hybridations analogiques-numériques, empreintes de durées matérielles significatrices, affabulées aux marges de logiques d’efficacité et d’optimisation.



Fig. 3. Rampe d’extrusion. Trajectoire paramétrique dessinée sur Rhino-grasshopper et photographie de l’objet de porcelaine produit. La distance de captation ne varie pas significativement, l’extrusion s’achève lorsque le robot se retire de la zone de déposition.



Fig. 4. Rampes d’extrusion modifiées. La distance de captation varie en fonction des sinuosités de la trajectoire et du fil en cours de déposition. La rencontre d’une infructuosité génère une symétrie ou un motif imprévu. L’analyse de la génération de cet objet-texture permet de programmer une nouvelle trajectoire reproduisant volontairement ces motifs ou asymétries.

5 Matériaux de conception

L’outil numérique dans la profession architecturale affiche et manipule des lignes, des surfaces, des « géométries solides » projetées à l’écran. Ces objets atteignent un degré d’achèvement élevé sans passer par l’épreuve de la manipulation du matériau ou de l’assemblage. Ils tendent par défaut à rester captifs de l’environnement clos de la modélisation. De la même manière, malgré les efforts d’intégration de l’outil fabricant à l’outil modélisant, la séparation méthodologique aussi bien que dynamique existe toujours et s’en voit parfois renforcée par le mur de la simulation. Cela explique-t-il qu’une fois érigés, beaucoup d’artefacts conservent un rapport d’objet-image au réel, soit un rapport d’abstraction ? Si l’on considère que cette abstraction peut concourir à un impact néfaste de la construction industrielle sur le vivant - par exemple par raréfaction des aspérités, niches, zones invisibles - on entrevoit comment ce problème prend naissance dans l’adoption et l’usage d’outils de conception génériques.



Fig. 5. Protocole Sériation - interaction matériau-substrat. Contamination de l’objet texture par le substrat, les plis de porcelaine s’enrobage de bâtonnets de sucre. L’adhésion de particules à l’argile extrudée génère un nouveau paysage dans l’objet.

Entre moulage et modelage, la modulation engendre une prise de forme entre vitesses et trajectoires. La forme est donc l’incarnation d’un état d’équilibre d’une tension matériau-force produisant des « objets-textures » paradoxaux, en tant qu’objets-images ayant atteint un degré d’individuation permettant de les identifier comme unité, et comme échantillon de texture : c’est-à-dire un programme de fabrication plus qu’un volume ou une forme à reproduire. Ainsi, ces boucles rétroactives laissent-elles place à une marge d’indétermination propre au passage d’un objet virtuel idéal vers un modèle soumis aux aléas de la matière,

d'un environnement physique variable. Cette indétermination n'est pas sans rappeler la vision d'une « machine parfaite » selon Simondon [16] :

« Le véritable perfectionnement des machines [...] correspond non pas à un accroissement de l'automatisme, mais au contraire au fait que le fonctionnement d'une machine recèle d'une certaine marge d'indétermination. [...] La machine qui est douée d'un haut niveau de technicité est une machine ouverte. »

Le projet a pour cœur d'exploiter cette marge d'indétermination en envisageant le robot comme une « machine ouverte » capable d'alimenter le processus créatif au sein d'un environnement que nous appelons ici substrat en tant que milieu de fixation. La nature de l'indétermination y est multiple, et constitue toujours le point de scission entre le modèle numérique, virtuel et idéal, et celui, physique, soumis aux variations d'un environnement parfois trop chaud, d'une argile trop peu visqueuse, d'un temps d'extrusion trop long. Cette indétermination naît également de la réduction d'échelle [17] : en effet, le contrôle sur la forme est modulable, jouant sur un équilibre entre force de gravitation et contraintes mécaniques (macro) et force de cohésion de l'argile, tensions de surfaces, etc. (phénomènes méso ou micro). L'objet-texture lui-même, résultant du contact entre outil extrudeur, bulle d'argile et substrat participe de l'interface haptique sous forme de témoin tactile et cinématique du processus de déposition.

6 Discussion

La rétroaction est dans ce contexte une *méta-phase* de conception, un plan où préfigurent non seulement des demandes explicitées mais aussi des décisions inconscientes. On donne le temps aux objets-images produits d'interagir sur différents plans, selon des règles à déterminer parfois en chemin. Proximité et tactilité lient les actions aux résultats pour extraire les caractéristiques haptiques d'une architecture. Cette extraction n'est pourtant pas cristallisée par une intention donnée mais distribuée stratégiquement entre humain et outil. D'une action à l'autre, on laisse une marge d'autodétermination équivoque, qui joue du déphasage entre les plans d'action du concepteur et de la machine pour signifier. De la donnée gravée traduite depuis une vision conceptrice virtualisée, on passe à du nomadisme numérique : on ne relie pas des points prédéterminés, on dessine le chemin en l'empruntant. Il s'agit alors d'encadrer, de doter de membres et d'articulation sous formes de règles plutôt que d'ordonner. L'approche de l'assemblage automatisé par Jeffers définit un livret de règles comme modalité constructive plutôt qu'une forme et matérialité anticipée [18]. En implémentant la mémoire, le retour (feedback) et les décisions l'actuateur révisé sa réalité dans toutes ses variations, dans cet exemple en isolant la longueur d'un élément sujet d'une action constructive. Le prototypage rétroactif permet de mettre plusieurs instances pensées de fabrication en parallèle et à différent degré de physicalité et de signification. Parallèlement à la boucle de production, se déploie une boucle d'apprentissage physique-numérique qui désautomatise la perception des machines. Il revient à l'interface de ménager une marge d'indétermination pour garantir d'inclure une perception dynamique active dans l'émergence de ses artefacts. Une boucle d'individuation s'instaure dans le processus entre machines et opérateurs, qui se commandent et se guident mutuellement.

Nous revendiquons la possibilité de déplacer le processus de conception architecturale dans un tout autre régime de parenté que celui de la création et de la génération : un régime d'adoption d'outils, qui implique leur circulation de mains en mains et donc une forme de projet itérative, processuelle et simultanément (parallèlement) *in vitro*, *in silico* et *in vivo*. En effet l'automatisation totale d'un chantier est très improbable : une activité d'évaluation sensible et de correction empiriques du comportement de la machine est continuellement nécessaire. De plus les outils de construction robotiques sont des interfaces qui demandent la participation active de savoir-faire artisanaux de fabrication : concevoir des interfaces entre

des mondes techniques distincts et distants. Leur facilité d'utilisation laisse néanmoins imaginer une zone d'échange entre amateurisme et expertise, prédiction et improvisation. La dimension du prototype, du modèle et de la miniature, où s'imaginent des procédures automatiques idéales et où se réalisent des processus rétroactifs percevants, pourrait ouvrir cette zone d'échange et d'adoption réciproques. Mais dans cette nouvelle approche des environnements ou « milieux » de conception-fabrication, les objets-images perdent significativement leur qualité d'objet pour devenir échantillons, fragments, traces vivantes ; un paysage sensible à habiter plutôt qu'un inventaire typologique à définir ex-nihilo. Il serait pour l'heure pertinent d'expérimenter la méthode décrite dans le présent article auprès de nouveaux bricoleurs et sur des modes de fabrication autres : soustractifs, composites, filières sèches, milieux et substrats diversifiés, etc.

Références

1. V. Beaubois. *Ethnographies du design ? : Vers une diagrammatisation de la conception*. Techniques & culture, **64**, 48-63 (2015) doi.org/10.4000/tc.7558
2. G. Simondon, N. Simondon et J.-Y., *Château. Imagination et invention* (PUF, pp. 14-15, 2014).
3. J. Parent. Entretien sur la mécanologie. Office National du Film du Canada (1968) : <https://www.youtube.com/watch?v=VLkjI8U5PoQ>
4. J. Rancière, *Le Destin des images* (La Fabrique, 2003)
5. G. Chamayou, Une brève histoire des corps schématiques, dans Avant-propos sur les sociétés de ciblage, extrait du numéro 2 de Jef Klak, "Bout d'ficelle", Coudre / En découdre, (2015) <http://jefklak.org/?p=2441>
6. A. Midal, *Design ? : Introduction à l'histoire d'une discipline* (Pocket, 2009)
7. P. Virilio, *L'insécurité du territoire* (Éditions Galilée, 1993).
8. B. Colomina, *X-Ray Architecture* (Lars Müller, 2019).
9. N. M. Klein, *The Vatican to Vegas?: A History of Special Effects* (New Press, 2004)
10. H. Schmidgen, Entretien avec Paul Virilio sur Félix Guattari (1994) https://www.academia.edu/24769138/Entretien_avec_Paul_Virilio_sur_F%C3%A9lix_Guattari_31_janvier_1994
11. J. Frazer et P. Johnston, *An Evolutionary Architecture?: Themes VII* (Architectural Association Publications, 1995)
12. G. Deleuze et F. Guattari, F., *Mille plateaux* (Paris, Minuit, 1980)
13. E. Manzini, *Towards a New Ecology of the Artificial Environment*. 4.
14. E. Rhomer (réalisateur), J. Rudel (Auteur), *Entretien sur le béton* (1969) <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k13203919/f1>
15. G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information* (Éditions Jérôme Millon, 2005)
16. G. Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques* (Aubier, 2012)
17. É. Bigot-Dol, Du figment au fragment, Miniature et conception architecturale (I. Roussel-Gillet & E. Thoizet, Éd. Brill., 2018)
18. M. Jeffers, Autonomous Robotic Assembly with Variable Material Properties. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*, p. 48-61. Springer International Publishing, 2016) doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_4