



HAL
open science

Matérialité numérique et tectonique paramétrique

Philippe Marin, Yann Blanchi, Rossella Siani

► **To cite this version:**

Philippe Marin, Yann Blanchi, Rossella Siani. Matérialité numérique et tectonique paramétrique. Cahiers thématiques, 2016, Matérialités, pp.105-114. hal-02016681

HAL Id: hal-02016681

<https://hal.science/hal-02016681>

Submitted on 12 Feb 2019

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.

(Philippe Marin)

(Résumé)

Notre époque est marquée par l'utilisation des technologies numériques, et nos modes de compréhension du monde sont modifiés. En considérant l'application des technologies de l'information à l'architecture, nous nous proposons de revisiter la notion de matérialité qui passe par une hybridation des réalités physiques et numériques. Nous distinguons les modes d'intégration de la matérialité en identifiant des processus singuliers de conception et de fabrication. Nous identifions les processus de morphogenèse qui intègrent les logiques algorithmiques, qui s'adosent au continuum conception-fabrication numérique, qui passent par la mise au point de machines spécifiques, qui intègrent des matériaux conçus sur mesure ou qui conduisent au développement de dispositifs cyber-physiques. La tectonique informée, la conception basée sur les matériaux, l'exploration d'une matérialité numérique, les conceptions assistées par des données, représentent des démarches qui se caractérisent avant tout par la définition des processus de morphogenèse, de fabrication et d'interaction.

(Présentation des auteurs)

Philippe MARIN

École nationale supérieure d'architecture de Grenoble, Laboratoire MAP-ARIA UMR CNRS-MCC 3495.

Yann BLANCHI

École nationale supérieure d'architecture de Paris-Val de Seine, Laboratoire EVCAU, Agence Black Mountain Office.

Rossella SIANI

Università degli Studi di Napoli Federico II - DiARC - Dipartimento di Architettura.

Matérialité numérique et tectonique paramétrique

Philippe Marin, Yann Blanchi, Rossella Siani

Notre époque est marquée par l'utilisation des technologies numériques, et nos modes de compréhension du monde sont modifiés. Ces nouveaux modes opératoires bouleversent les champs de la conception, de la création et de la fabrication. En considérant l'application des technologies de l'information à l'architecture, nous nous proposons de revisiter la notion de matérialité qui passe par une hybridation des réalités physiques et numériques. Nous chercherons à distinguer les modes d'intégration de la matérialité en identifiant des processus singuliers de conception et de fabrication. À partir d'un rappel des modes opératoires établis au cours de l'histoire récente, nous identifierons les processus de morphogenèse qui intègrent les logiques algorithmiques, qui s'adosent au continuum conception-fabrication numérique, qui passent par la mise au point de machines spécifiques, qui intègrent des matériaux conçus sur mesure ou qui conduisent au développement de dispositifs interactifs et augmentés en ouvrant la voie aux objets cyber-physiques. Ces pratiques participent au renouvellement de la notion de matérialité et autorisent l'émergence d'une forme de tectonique paramétrique.

Morphogenèse, tectonique, matérialité

La morphogenèse, approche techno-organique

Nous revenons sur quelques-uns des acteurs récents sur lesquels les pratiques computationnelles émergentes s'appuient. Au début du XX^e siècle, le biologiste et mathématicien D'Arcy Thomson (1860-1948) (Thompson *et al.* 2009) porte un regard sur la morphogenèse naturelle. Il considère la croissance comme un mécanisme évolutionnaire et transformationnel. C'est ici la déformation des structures géométriques naturelles, sous l'effet des forces environnementales, qui permet d'explicitier l'univers des formes. Les relations entre formes et forces environnementales sont posées. La forme est conçue comme un processus naturel en évolution, soumis aux conditions extérieures, et les mécanismes de prise de forme confèrent des qualités autoadaptatives aux structures naturelles. Robert Le Ricolais (1894-1977) (Ricolais 1968) situe son travail entre la résistance des matériaux et la biologie. Il suggère que la matière, les matériaux, les systèmes constructifs, les configurations structurelles et l'espace participent d'un même champ de connaissance. L'organisation des forces, des efforts et des effets est commutative et déclinable à différentes échelles. Il s'intéresse aux structures naturelles et opère par analogie pour proposer des structures habitables. Buckminster Fuller (1895-1983), ingénieur et inventeur atypique, contribue à cette vision systémique de notre environnement et propose une lecture multiscalair de nos réalités. Les travaux de Gaudi (1852-1926) se caractérisent à la fois par un vocabulaire formel ornemental, faisant référence à la nature, et par l'utilisation de dispositifs expérimentaux, de type maquettes funiculaires, facilitant la mise en forme de surfaces souvent complexes. Frei Otto (1925-2015) est célèbre pour l'efficacité et la pureté des structures qu'il conçoit. Son travail est étroitement associé aux formes naturelles, il cherche à optimiser l'arrangement de la matière par l'étude des processus naturels de recherche de forme, dits processus de formation autonome¹. Il s'intéresse aux processus physiques plutôt que biologiques. C'est à l'aide de reconstitutions expérimentales des conditions physiques de mise en tension des forces externes et internes présentes dans une structure, qu'il met au point un ensemble de dispositifs dynamiques de recherche de forme.

L'ensemble de ces concepteurs, dont l'intérêt pour une approche bio-inspirée est largement associé à des considérations structurelles et constructives, porte une attention particulière au triptyque matière-forme-force. Ces démarches constituent un socle de référence en matière de morphogenèse. Les procédures analogiques de recherche de forme mises au point durant cette période trouvent un prolongement numérique. De nombreux outils ou algorithmes sont disponibles pour réaliser des modélisations à base de contraintes géométriques soumises à l'influence d'un champ gravitationnel inversé (fig. 1). Une première relation entre processus naturels et processus numériques apparaît.

De la tectonique à la matérialité

Ces résolutions constructives font référence à la notion de tectonique qui retrouve une actualité à la fin du XX^e siècle (Frampton 2001) (Chupin *et al.* 2005). La tectonique renvoie à l'étude de la forme construite des objets architecturaux, elle est liée à l'expression d'une dimension poétique de la construction. La tectonique recouvre les dimensions matérielles, constructives et tactiles de l'architecture, elle est considérée comme l'expression des efforts qui donnent forme au projet et élève la construction au niveau de la forme artistique. En 2004, l'ouvrage de Leach (Leach *et al.* 2004) confère aux technologies numériques une place centrale. Les enjeux de structure et les processus de morphogenèse sont explorés à travers la mise en œuvre d'algorithmes, de modélisations paramétriques ou associatives. La dimension symbolique de l'architecture est réexaminée avec le renouveau d'une forme d'ornementation (Moussavi and Kubo 2006) (Picon 2013). Ainsi, les ordres structurels et architectoniques s'appréhendent à l'aide de la compréhension des processus de conception, de production et d'assemblage qui les ont engendrés.

La notion de matérialité renvoie à nos capacités à matérialiser, à rendre concret et réel un artefact. Le matériau et la matière sont au centre des activités de construction. Cependant, cette matière est polysémique, elle s'entend également dans une dimension immatérielle à travers la prise en compte des conditions, des effets, des performances qui représentent autant de vecteurs de conception. Par ailleurs, la matérialité induit une relation sensible aux choses, elle fait référence aux relations émotionnelles que nous entretenons avec les objets, aux rapports tactiles qu'évoquent ou portent en eux les artefacts de notre environnement. La matérialité s'appréhende dans son contexte culturel, lui-même sous influence de l'état des conditions techniques de son époque. Nous percevons et comprenons le monde à travers nos instruments techniques, et nous nous trouvons immergés dans un réel construit, compris et perçu à travers notre culture, nos sciences, nos techniques et nos arts. Tous nos objets nous appareillent le monde, ils construisent le régime d'expérience auquel ils donnent accès. Les conditions technologiques d'une époque deviennent alors les marqueurs des modes de compréhension et de production des artefacts. Par extension, l'état des connaissances scientifiques, techniques et philosophiques contribue à influencer notre perception dans une dynamique phénoménotechnique.

Hybridation des réalités physiques et numériques

Les pratiques émergentes prennent place dans un contexte d'instrumentation numérique des processus de conception, de fabrication et de l'espace physique. Le continuum conception-fabrication numérique renouvelle notre outillage de projétation, et celui-ci s'inscrit désormais dans un continuum informationnel plus large qui caractérise les systèmes ubiquitaires et les dispositifs cyber-physiques.

Matérialité « étendue » et continuum conception-fabrication

Les logiques de morphogenèse ont trouvé avec les technologies numériques des modes d'expérimentation et d'expression. Ces techniques proposent, sous forme d'« extensions² », des fonctionnalités de simulation des performances et des comportements. Elles autorisent la définition de processus morphogénétiques qui intègrent les caractéristiques des matériaux et les modalités de mise en œuvre. Les relations entre forme, structure et matériau sont informées, ces derniers interagissent, ils font système, et à travers des mécanismes d'auto-organisation, ils conduisent à l'émergence de qualités et propriétés spécifiques. Les approches génératives avec l'utilisation d'algorithmes évolutionnaires, d'algorithmes à base d'agents, de L-système, de géométries fractales ou autres systèmes de fonction itérative³, confèrent à la machine une forme d'autonomie (fig. 2). La place du concepteur est questionnée, et son activité bascule vers une forme de méta-conception. Les modélisations paramétriques, basées sur une programmation associative, conduisent à la construction de modèles topologiques et facilitent l'exploration de l'univers des possibles à travers la manipulation des valeurs des paramètres retenus. Les performances, qualités structurelles ou environnementales, sont intégrées et participent à l'évaluation des solutions.

Les technologies de fabrication numérique relient les phases de conception et de fabrication. Un continuum conception-fabrication numérique s'instaure. Les contraintes et caractéristiques des méthodes de fabrication numérique⁴ sont encodées, intégrées et décrites au sein du modèle paramétrique. Les propriétés organisationnelles de la forme, de la structure et du matériau informent le modèle dans une dynamique intégrative. Les données descriptives du dispositif sont manipulées, importées, traitées et traduites pour participer à la simulation, pour alimenter le processus génératif, pour piloter des machines robotiques, pour alimenter des bases de données d'information et de pilotage. Une logique non standard s'impose et renouvelle le modèle de production industrielle en favorisant une logique de « personnalisation de masse ». Ce nouveau modèle industriel s'appuie sur des usines numériques⁵ plus flexibles et adaptatives. Les techniques de production basées sur de nouveaux processus, intégrant les technologies de l'information et les méthodes de fabrication à haute performance (impression 3D, fabrication robotisée), constituent le socle des troisième et quatrième révolutions industrielles.

Plusieurs expérimentations récentes illustrent ces problématiques qui renouvellent les processus de mise en œuvre et de production. Les travaux de Marta Male-Alemany (Male-Alemany and Portell 2014) portent sur la mise au point de machines spécifiques, capables de construire des dispositifs tectoniques singuliers. Le comportement du matériau et la logique tectonique sont encodés, des machines sur mesure sont construites pour mettre en œuvre et réaliser le dispositif. Gramazio et Kohler (Kohler *et al.* 2014) explorent depuis plusieurs années la construction architecturale robotisée. Menges (Menges 2012) intègre comme paramètre computationnel les qualités des matériaux et les processus de fabrication avancée. Oxman (Oxman 2014) propose une approche générative de géométries bio-inspirées et fabriquées à l'aide des technologies avancées d'impression 3D multimatériaux. Des machines sont utilisées pour couper, plier, imprimer, usiner, empiler, des tectoniques informées et des matérialités spécifiques se font jour, dans lesquelles le concept d'information prend une place particulière. Une conception assistée par des données se généralise.

Par ailleurs, des travaux portent sur la réalisation de dispositifs architecturaux adaptatifs ou interactifs. Fox (Fox and Kemp 2009) propose un état de l'art, la rencontre ACADIA⁶ 2013 (Khan *et al.* 1705), sous le titre *Adaptive Architecture*, offre un panorama des expérimentations récentes. Les problématiques dites de « robotique douce⁷ » s'attachent à

explorer des dispositifs automatiques, constitués d'un ensemble de capteurs, d'actionneurs, et intégrant des fonctions d'analyse et de calcul pour interagir dans une situation complexe, avec des systèmes vivants ou des environnements humains (Rossi *et al.* 2014).

Matériau intelligent et matériau programmable

Ces démarches conduisent à une spécification de plus en plus fine des composants du projet d'architecture en allant jusqu'à la définition du matériau. Depuis les années 1970, des matériaux nouveaux apparaissent, ils présentent des caractéristiques singulières, ils sont adaptés à des tâches spécifiques et qualifiés de matériaux fonctionnels (légers, résistants en traction, en compression, présentant des qualités supra- ou semi-conductrices, des qualités isolantes...). Ces matériaux composites deviennent malléables, adaptables, ils sont conçus pour une utilisation précise. L'expression « matériau intelligent » désigne une nouvelle génération de produits susceptibles d'accomplir diverses fonctions jusqu'ici réservées au vivant (Bensaude-Vincent 1998). Les degrés d'intelligence peuvent correspondre à des fonctions de captation, action ou traitement, impliquer des fonctions de mémoire et remplir des conditions d'auto-organisation ou d'autoréparation, ou intégrer des modalités d'apprentissage. L'intelligence peut être apportée de l'extérieur par l'électronique ; elle est alors ajoutée à une structure matérielle qui fonctionne comme un support. Un état de l'art et un inventaire des applications en architecture sont proposés par Addington (Addington and Schodek 2004) et Ritter (Ritter 2007).

De contrainte, la matière est devenue paramètre de conception, elle est un attribut modulable, adaptable. Elle n'appartient plus seulement au champ du réel, mais également à celui des possibles, elle incarne des potentialités et se conçoit comme une configuration singulière de variables.

En associant les capacités des technologies numériques de modélisation et de fabrication, les concepteurs ont désormais la possibilité d'explorer et de fabriquer des matériaux multifonctionnels capables de s'adapter aux conditions changeantes de l'environnement. Des matériaux programmés apparaissent et révèlent leurs potentiels d'adaptation aux conditions extérieures ou à des stimuli particuliers. Une forme de matière « automotivée », active et intelligente se dévoile. La programmation de ces artefacts physiques passe par la définition de processus de fabrication spécifiques, conduisant à la réalisation de matériaux composites hétérogènes, dont les géométries et compositions donnent lieu à des recherches et des expérimentations créatives. Matériaux, procédés et formes sont étroitement associés pour favoriser l'émergence de propriétés autoadaptatives.

Plusieurs explorations autour du pliage automatique ont été réalisées (Liu *et al.* 2012). Étienne Cliquet, avec le projet Flottille, montre des pliages automatiques sous les effets de la capillarité et la tension superficielle qui s'exercent entre une feuille de papier aux motifs géométriques fractals et un liquide. Christophe Guberan, avec le projet Hydro-Fold, exploite les propriétés du papier dont la structure est modifiée sous l'effet de l'impression d'un motif réalisé avec une encre à forte teneur en eau. Dana Zelig, avec Self Folding Structure, expérimente des pliages automatiques de film rétrécissant soumis à un rayonnement et conditionnés par l'impression de motifs. Dans le champ de l'architecture, le laboratoire Self Assembly Lab et Tibbits explorent des méthodes d'« impression 4D » ou d'auto-assemblage de matériaux programmés capables de réagir aux conditions physiques. L'HygroSkin de Menges propose une enveloppe réactive aux conditions climatiques. Les modifications de l'environnement – chaleur, humidité, mouvement, champ magnétique ou électrique – conduisent à animer la matière.

Matérialité augmentée et objets cyber-physiques

En prolongement de ces activités d'hybridation des fonctions matérielles et informationnelles, le développement de l'Internet des objets accentue la mise au point d'objets cyber-physiques interconnectés. La multiplication des objets communicants et leurs interconnexions ont porté, à la fin du XX^e siècle, les concepts d'intelligence ambiante et d'informatique ubiquitaire. Les objets communicants multisensoriels enrichissent ces notions avec une dimension expérientielle et des possibilités d'interaction. Les interfaces sensibles requièrent les sens, elles sont dotées de modalités interactives et sollicitent l'utilisateur dans une dynamique relationnelle. La définition de l'espace par ses limites physiques se trouve modifiée et enrichie par son imbrication avec l'espace virtuel. Des couches informationnelles jalonnent le territoire, elles s'intègrent à notre environnement bâti, aux artefacts qui nous entourent. Ces artefacts rassemblent les notions de situation, de service, d'information, de relation et d'usage. Les objets inertes ont laissé la place à des systèmes, des dispositifs, des objets relationnels, des objets interfaces, des objets d'information et de communication. Ils représentent des conjonctions de situations, d'interactions et de représentations, en explorant de nouvelles formes de matérialité, de nouvelles temporalités, de nouvelles situations.

Les matériaux, les surfaces, les objets ou les composants architecturaux sont désormais capables d'interagir avec les conditions extérieures ou avec les activités humaines. Ces dispositifs intelligents hybrides constituent eux-mêmes un réseau à travers leurs interconnexions. L'informatique spatialisée ⁸ cherche à intégrer les fonctions computationnelles, les dispositifs physiques de types capteurs et actionneurs, l'identification et l'anticipation des activités sociales ainsi que les propriétés de l'espace physique pour concevoir et réaliser ces objets cyber-physiques (Dulman 2014). Klooster présente une sélection de projets et technologies appliqués à l'architecture et au design. Le studio Roosegaarde propose des installations interactives intégrant des capteurs et actionneurs ou exploitant les propriétés de matériaux à mémoire de forme. L'agence Minimaforms explore les formes de communication entre les choses et les personnes, des environnements immersifs et interactifs réagissent à la présence des visiteurs. Le projet Smart Concrete (Marin *et al.* 2011) (fig. 3) intègre dans une dalle de béton un ensemble de capteurs capacitifs, de leds, et propose des scénarios lumineux en détectant la proximité d'un corps.

Conclusion

À partir d'un rappel des fondements des approches morphogénétiques, nous avons identifié les pratiques émergentes qui mobilisent l'information dans le cycle de conception, de fabrication et d'instrumentation du cadre bâti. Aux échelles micro-, méso- ou macroscopiques, les possibilités d'instrumentation et de fabrication de matériaux sur mesure, aux propriétés spécifiques, induisent une redéfinition des modalités de conception, de fabrication et d'exploitation du cadre bâti. La tectonique informée, la conception basée sur les matériaux, l'exploration d'une matérialité numérique, les conceptions assistées par des données, représentent des démarches qui se caractérisent avant tout par la définition des processus, de morphogenèse et de fabrication, plutôt que par la définition d'une forme fixée. Les matériaux programmés ou instrumentés d'électronique ouvrent la voie à la conception d'objets dotés de nouvelles perspectives fonctionnelles.

Dans ce contexte, le concept de « chréode », appliqué au champ de l'architecture par Kwinter (Kwinter 2008), trouve une place privilégiée en expliquant comment les « forces viennent à

s'intégrer en formes » dans une appréciation systémique des choses et des êtres. Un rapprochement des sciences du vivant et des sciences de l'information s'opère avec l'intégration de compétences en mécanique ou en science des matériaux.

Bibliographie

- Addington (M.) and Schodek (D. L.), *Smart Materials and Technologies in Architecture*, Architectural Press, 2004.
- Bensaude-Vincent (B.), « Éloge du mixte : Matériaux nouveaux et philosophie ancienne », 1998, p. 358.
- Chupin (J.-P.), Simonnet (C.), Frampton (K.), Legault (R.), and Collectif, *Le Projet tectonique*, Infolio, 2005.
- Dulman (S.), « Spatial Computing in Interactive Architecture », in *Advancements in Adaptive Architecture*, edited by M. Kretzer and L. Hoverstadt, Basel: Birkhäuser, 2014, p. 120-124.
- Fox (M.) and Kemp (M.), *Interactive Architecture*, Princeton Architectural Press, 2009.
- Frampton (K.), *Studies in Tectonic Culture*, New Ed ed. MIT Press, 2001.
- Khan (O.), Stacey (M.), and Beesley (P.), *Acadia 2013: Adaptive Architecture*, Riverside Architectural Press, 2014.
- Kohler (Matthias), Gramazio (Fabio), and Willmann (J.), *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*, Park Books, 2014.
- Kwinter (S.), « Discours sur la méthode », in *Explorations in Architecture*, Teaching, Design, Research, edited by R. Geiser, Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2008, p. 34-47.
- Leach (N.), Turnbull (D.), and Williams (C.), *Digital Tectonics*, 1 ed. Academy Press, 2004.
- Liu (Y.), Boyles (J. K.), Genzer (J.), and Dickey (M. D.), « Self-Folding of Polymer Sheets Using Local Light Absorption », *Soft Matter* 8, issue 6: 1764-69, 2012.
- Male-Alemany (M.) and Portell (J.), « Fabbots : Resear in Additive Manufacturing for Architecture », in *Fabricate: Negotiating Design and Making*, edited by F. Gramazio, M. Kohler, and S. Langenberg, gta publishers, 2014.
- Marin (P.), Blanchi (Y.), Liveneau (P.), and Guiga (A.), *Digital Materiality: An Experiment With Smart Concrete*, Presentation, Rethinking the Human in Technology-Driven Architecture. Chania, Crete, 2011.
- Menges (A.), *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design Architectural Design*, John Wiley & Sons, 2012.
- Moussavi (F.) and Kubo (M.), *The Function of Ornament*, Actar, 2006.
- Oxman (N.), « Material Ecology », in *Theory of the Digital in Architecture*, edited by R. Oxman and R. Oxman, Routledge, 2014, p. 319-326.
- Picon (A.), *Ornament: The Politics of Architecture and Subjectivity - Ad Primer (Architectural Design Primer)*, John Wiley & Sons, 2013.
- Ricolais (R. L.), *Le Ricolais: Espace Mouvement Et Structures*, S. Chiffolleau, 1968.
- Ritter (A.), *Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Design*, Birkhauser Verlag AG, 2007.
- Rossi (D.), Nagy (Z.), and Schlueter (A.), *Soft Robotics for Architects: Integrating Soft Robotics Education in an Architectural Context*, Presentation, Soft Robotics, 2014.
- Thompson (D. A. W.), Bonner (J. T.), and Prochiantz (A.), *Forme et Croissance*, Seuil, 2009.

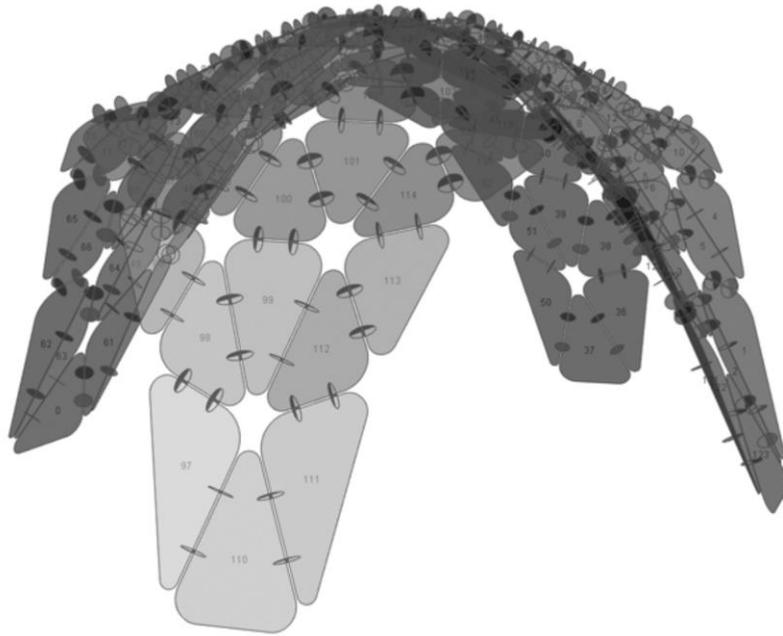


Fig. 1 : Surface funiculaire, simulation dynamique et continuum conception-fabrication.

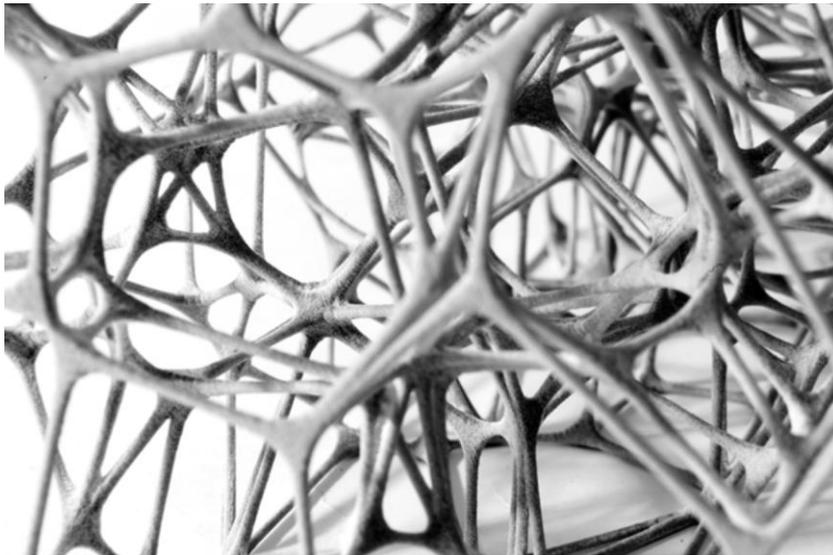


Fig. 2 : Géométrie et performance, maquette impression 3D, ENSA Lyon. Photo ©JP Angei/

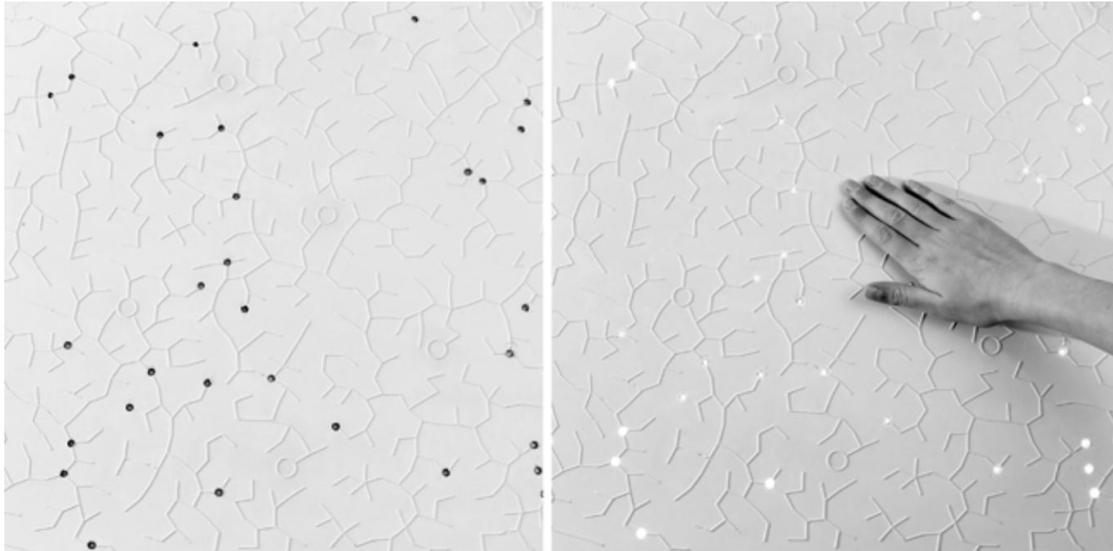


Fig. 3 : Béton instrumenté. Photo ©JP Angei.

1- L'expression anglaise *form-finding* est communément utilisée.

2- Extension est ici à entendre comme la traduction de l'expression anglaise *plug-in*.

3- Les approches génératives se caractérisent par la mise en œuvre d'algorithmes qui présentent une forme d'autonomie ou dont les résultats ne peuvent pas être anticipés sans l'exécution de la séquence de commandes. On trouve généralement dans ces approches procédurales un ensemble d'algorithmes bio-inspirés. Les algorithmes génétiques, de la famille des algorithmes évolutionnaires, s'inspirent des mécanismes de la sélection naturelle proposés par Darwin. Les algorithmes à base d'agents s'appuient sur les interactions entre un grand nombre d'individus et sur des comportements dits sociaux. Les géométries fractales mobilisent les principes de récursivités et d'itérations. L'ensemble de ces approches cherche à reproduire des conditions d'auto-organisation permettant l'émergence de propriétés nouvelles à travers les interactions des composants du système.

4- Machines de fabrication numérique : usinage numérique, impression 3D, découpe laser, fabrication robotisée, impression 3D en grandeur.

5- Les expressions suivantes sont également utilisées : *digital factories*, *smart factories* ou industrie 4.0.

6- *Association for Computer Aided Design in Architecture*.

7- Traduction de l'expression anglaise *soft robotic*.

8- Traduction de l'expression anglaise *spatial computing*.