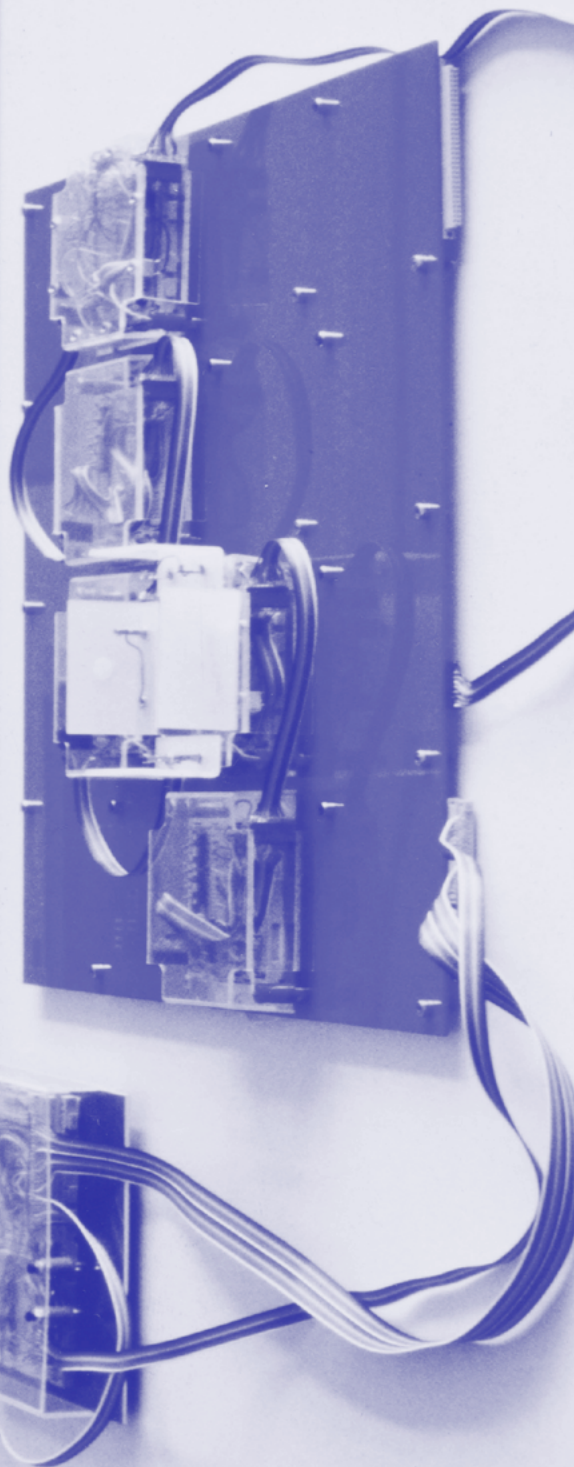


INTELLIGENCE ARTIFICIELLE & ARCHITECTURE



Generator Project, 1976-1980

Cedric Price, architecte

© Fonds Cedric Price/Centre Canadien d'Architecture

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE & ARCHITECTURE

Publication sous la direction de
Stanislas Chaillou, Architecte,
Chercheur en intelligence artificielle

Artificial Intelligence (AI) has already made its way into the industry, providing it with the means to meet new challenges. Its use in the field of architecture is still in its infancy, but the expected results already obtained are promising. This technology is much more than a mere opportunity, it is without doubt a decisive step forward, quite capable of transforming the architectural practice. This exhibition explores this engagement and its application to the built environment. Defining AI, explaining what it encompasses, both as techniques and as paradigms, is central to understanding its advent in architecture.

AI first needs to be considered from the perspective of the history of science and that of architecture. Rather than a "disruption", the technological evolution surrounding and supporting AI is the result of a slow maturation. Indeed, the profession has been undergoing a transformation for quite some time. The progressive adoption of technological solutions has already profoundly changed each stage of its value chain: first by exploiting new construction techniques, then by developing appropriate design software, and now by introducing statistical computing capacities, including, in the forefront, data science and artificial intelligence. Henceforth, rather than a radical orbit change, we want to see a change of trajectory whose acceleration is ultimately in the continuity of a practice that has led architecture to what it is today. Modularity, Computer Aided Design (CAD), Parametricism and Artificial Intelligence (AI) are the four inexorably interwoven stages of a sequence that frames the slow hybridization of our practices such as we live them and can imagine them today.

Bringing together concrete examples and recent results achieved in various fields of research, we showcase for the first time an inventory of AI's presence in architecture and a panorama of the latest advances in this field. Facade, plan, structure, perspective : as many scales for measuring the city to which AI can already contribute, whether real or hypothetical.

Between current theory and experimentation, this exhibit intends to shed light on the inception of a new technological era, leveraging the architectural practice, while offering it a renewed relevance.

L'intelligence artificielle (IA) a déjà pénétré nombre d'industries, en donnant les moyens de relever des défis inédits. Son utilisation dans le domaine de l'architecture en est encore à ses débuts, mais les résultats obtenus et escomptés sont prometteurs. Cette technologie est bien plus qu'une simple opportunité, elle est un pas en avant, sans doute décisif, à même de faire évoluer la pratique de l'architecture. La présente exposition explore cette promesse et son application au monde bâti.

Définir l'intelligence artificielle, expliquer ce qu'elle englobe, à la fois comme technique et comme paradigme, est une question centrale à la compréhension de son avènement en architecture. Il faut en premier lieu replacer l'IA dans l'histoire des sciences et celle de l'architecture. À l'inverse d'une disruption, cette évolution technologique est le résultat d'une lente maturation. En effet, le métier d'architecte a commencé à se transformer il y a longtemps. L'adoption progressive de solutions technologiques a d'ores et déjà profondément modifié chaque étape de sa chaîne de valeurs : d'abord en exploitant de nouvelles techniques de construction, puis en développant des logiciels de conception adéquats, enfin en y introduisant aujourd'hui des capacités de calcul statistique, dont, au premier plan, la *data science* («science des données») et l'intelligence artificielle. Dès lors, plutôt qu'un changement d'orbite radical, nous voulons voir ici un changement de trajectoire, dont l'accélération s'inscrit dans la continuité d'une pratique qui a conduit l'architecture à ce qu'elle est aujourd'hui. La modularité, la conception assistée par ordinateur (CAO), le paramétrisme et l'intelligence artificielle (IA) sont les quatre étapes inexorablement intriquées qui constituent la trame d'une lente hybridation de nos processus de travail, tels que nous les vivons et pouvons aujourd'hui les envisager.

En rassemblant ici des exemples concrets, résultats récents de différents champs de la recherche, nous dressons pour la première fois un état des lieux de l'IA en architecture et proposons un tour d'horizon des dernières avancées en ce domaine. Façade, plan, structure, perspective : autant d'échelles de la ville auxquelles l'IA pourrait dès maintenant apporter sa contribution, réelle ou spéculative.

Entre théories et expérimentations contemporaines, cette exposition entend éclairer les débuts d'une nouvelle ère technologique, à même d'assister la pratique architecturale, tout en lui rendant ses lettres de noblesse.

MODULARITÉ

1930 - 1960

La modularité peut être définie comme le point de départ de la systématisation de la conception architecturale. La «grille modulaire», théorisée au Bauhaus par Walter Gropius dès 1920, porte l'espoir d'une simplicité technique et la promesse d'une architecture économique. Elle est d'abord un sujet d'investigation qui mobilise des universitaires et des praticiens de différents horizons. Gropius introduit avec Adolf Meyer l'idée de *Baukasten*, un module type aux règles d'assemblage strictes. À la même époque, Richard Buckminster Fuller offre une vision plus systémique du module, qui intègre les canalisations, les structures, etc. Appliquée à la maison Dymaxion (1929-1946), qui pousse à l'extrême le logement modulaire, celle-ci s'avère la première démonstration probante du concept pour l'industrie.

Cette normalisation est développée plus tard par le «Modulor» (1945) de Le Corbusier, qui applique l'idée de la trame modulaire à l'homme, offrant dès 1946 une mise en œuvre holistique de ce principe. Les dimensions du bâti s'alignent sur des métriques et des ratios clés dérivés de l'échelle du corps humain. En conséquence, de l'Unité d'habitation de Marseille (1952) au couvent Sainte-Marie de La Tourette, à Éveux (1959), l'architecte systématise les dimensions et les portées en rapport avec cette échelle. Dans la lignée de ces premiers théoriciens, les architectes adaptent leur pratique à l'impératif de la matrice, ce qui revient à transférer une partie de la

Modularity could be defined as the starting point of systemized architectural design. The “modular grid” theorized in 1920 by Walter Gropius for the Bauhaus, carries the hope of technical simplicity and the promise of affordable architecture. Initially it arose as a topic of exploration for academics and practitioners. Gropius, along with Adolf Meyer, introduce the idea of “Baukasten”, a typical module with strict assembly rules. In the same period, Richard Buckminster Fuller provides a more systemic view of the module, which integrates pipelines, structures, etc. His Dymaxion house (1929-1946), which pushes modular housing to the extreme, sets a vibrant precedent, and the first convincing demonstration of the concept for the industry. This standardization is later elaborated with Le Corbusier's “Modulor” (1945), which applies the modular idea to the human scale, making possible, as early as 1946, the holistic implementation of this principle.

With the Modulor, the dimensions of the built environment align to key metrics and ratios derived from the scale of the human body. Consequently, from the “Unité d'habitation” in Marseille (1952) to the Sainte-Marie de La Tourette Priory in Éveux (1959), Le Corbusier systematizes the dimensions and spans in relation to this scale.

Following these early theorists, architects adapt their practice to prioritize the matrix, which amount to transferring part of the technical



Baukasten im Grossen, 1923
 Walter Gropius et Adolf Meyer, architectes © Bauhaus-Archiv



Dymaxion House (Wichita, États-Unis), 1929-1946
 Richard Buckminster-Fuller, architecte © The Estate of Buckminster-Fuller



Winslow Ames House (New London, États-Unis), 1933
Robert W. McLaughlin, architecte © John Reidy



Habitat 67 (Montréal, Canada), 1967
Moshe Safdie, architecte © Safdie architects, photo Jerry Spearman

technicité de la conception des bâtiments à la logique du module. Les arguments sont en effet convaincants : une forte amélioration de la prévisibilité de la construction réduit la complexité et le coût de la conception. La modularité s'étend ensuite rapidement à l'ensemble du secteur : la Winslow Ames House, construite par l'architecte Robert W. McLaughlin en 1933 aux États-Unis, est le premier grand projet modulaire au monde. Cette initiative est, à raison, perçue à l'époque comme une avancée majeure, de même que le sera Habitat 67 de Moshe Safdie en 1967 au Canada.

La modularité influe même la planification urbaine au tournant des années 1960, lorsque des projets tels que Plug-in City d'Archigram (projet théorique, 1964) ambitionnent de créer des villes entièrement modulaires. Grâce à l'assemblage et au démantèlement constant de modules, installés sur une matrice structurelle tridimensionnelle, les villes seraient censées trouver une nouvelle logique, qui prend en compte la possibilité de croissance et l'impératif de faisabilité. La théorie, dans sa pureté initiale, atteint vite ses limites et s'épuise prématurément. En effet, contraindre la conception architecturale à un simple dispositif d'assemblage de modules réglés mécaniquement sur une trame conduit, à terme, à son déperissement. L'architecture ne peut se résoudre à confiner son exercice à un rôle d'ensemblier, uniquement garant de règles et de processus, d'autant que les réalisations s'avèrent monotones et que les systèmes d'assemblage trahissent de réelles faiblesses constructives. Pour autant, si la modularité de «stricte observance» infléchit alors de manière significative les pratiques de la profession, elle l'irrigue également, grâce à son système de règles, et marque durablement les principes sous-jacents de la conception architecturale.

aspects of building design to the logic of the module. The arguments prove convincing: a significant improvement in the predictability of construction reduces the complexity and cost of the design. Modularity then swiftly extends to the field as a whole: the Winslow Ames House, built in the United States by Professor Robert W. McLaughlin in 1933, is one of the first large-scale modular project in the world. This initiative is rightfully perceived as a major breakthrough, much like the Habitat 67 by Moshe Safdie in 1967 in Canada.

Modularity even influences urban planning in the early 1960s when projects like the "Plugin City" by Archigram aspire to create entirely modular cities. Through the continual assemblage and dismantlement of modules, fitted on a three-dimensional structural matrix, cities are expected to find a new logic, addressing both the possibility of growth and the imperative of feasibility. The initial sleekness of the theory quickly reaches its limitations and is prematurely exhausted. Indeed, constraining architectural design to a simple device for assembling modules mechanically adjusted on a frame ultimately leads to its decline. Architecture cannot be resolved to confine its practice to a role of assembler, only a guarantor of rules and processes, especially since the results prove to be monotonous and the assembly systems betray real constructive weaknesses. Nevertheless, if modularity of «strict observance» significantly inflect the practices of the profession, it is also pervasive, thanks to its system of rules, and had a lasting mark on the underlying principles of architectural design.

CAO

1960 - 1990

L'importante montée en puissance des moyens informatiques (microprocesseurs, mémoires, PC, réseaux, etc.) autorise la réalisation de systèmes modulaires d'une complexité inédite. Au tournant des années 1980, on assiste alors à une véritable réhabilitation de la systématisation de la conception architecturale, fondée sur des règles strictes.

En réalité, dès le milieu des années 1950, une réflexion de fond sur le potentiel de la conception informatique s'est engagée au sein de certains bureaux d'ingénierie. En 1959, le professeur Patrick Hanratty déploie *Pronto*, le premier logiciel de DAO (dessin assisté par ordinateur), créé pour la conception de pièces d'ingénierie. Les possibilités qu'offre ce logiciel, associées à l'évolution rapide de la puissance de calcul, intéressent alors la communauté des architectes. Peu après, Christopher Alexander, architecte lui-même et professeur à la California University, à Berkeley, établit l'un des principes clés de la conception informatique : l'«Object-Oriented Programming». Dans ses *Notes on the Synthesis of Form* (1964), puis dans *A Pattern Language* (1977), Alexander explique pourquoi et comment les ordinateurs devraient être utilisés dans le cadre de la conception de formes architecturales. Sa vision avant-gardiste du potentiel des logiciels pour l'architecture s'inscrit en porte-à-faux des travaux de ses contemporains, focalisés principalement sur l'évolution des méthodes de construction.

The surge in computer technology (microprocessors, memory, PC, networks, etc.) allows for unprecedented complexity in modular design. The early 1980s, marking a rehabilitation of the systematization of rule-based architectural design.

In fact, as early as the mid-1950s, a fundamental analysis on the potential of computer design has begun in some engineering offices. In 1959, Professor Patrick Hanratty releases PRONTO, the first prototype of CAD (Computer Assisted Drawing) software, created for designing engineering components. The possibilities this software offers, coupled with the fast-paced evolution of computational power, jumps start the discussion within the architectural field. Soon after, Christopher Alexander, architect and then professor at University of California, Berkeley, lays out a key principle for Computational Design: the paradigm of "Object-Oriented Programming". In his "Notes on the Synthesis of Form" (1964) and later, in "A Pattern Language" (1968), Alexander theorizes why and how computers should be used as part of the design of architectural forms. His avant-garde vision of the potential of software for architecture is at odds with the work of his contemporaries, who are mainly focused on the evolution of construction methods. The founding principles he defines in his published works are, still today, the fundamentals of software programming: concepts like recursions, object-oriented programming, as well



PRONTO, 1959
Patrick Hanratty, ingénieur en informatique © DR



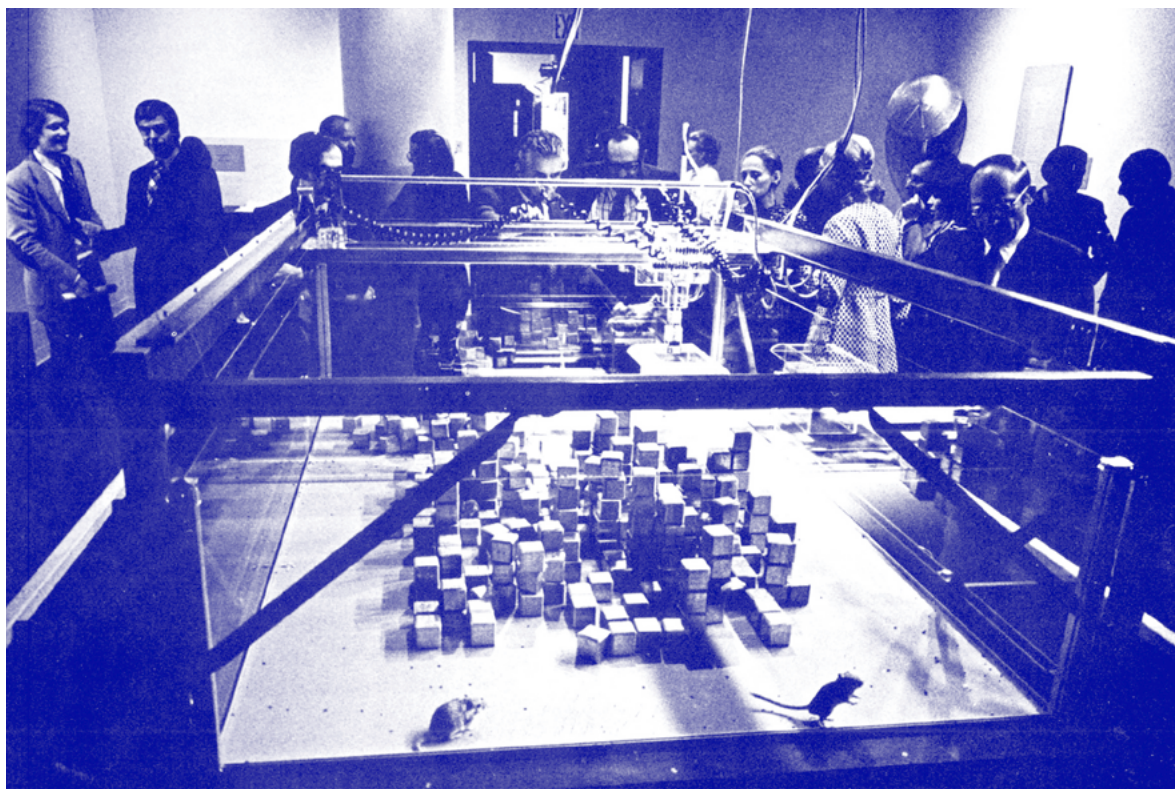
URBAN 2, 1968
Architecture Machine Group © Nicholas Negroponte/DR

Les principes qu'il définit dans ses publications constituent, aujourd'hui encore, les fondements essentiels de la programmation informatique : des concepts tels que les «réurrences», l'«Object-Oriented Programming», ainsi que leur application au design ont représenté un progrès radical. Dans les pas d'Alexander, une génération entière d'informaticiens et d'architectes crée un nouveau champ de recherche : la conception architecturale assistée par ordinateur (CAD). L'Architecture Machine Group (AMG) du Massachusetts Institute of Technology (créé en 1967), dirigé par le professeur Nicholas Negroponte, en est peut-être l'exemple le plus singulier. L'ouvrage de Negroponte *The Architecture Machine* (1970) résume l'essence de la mission de l'AMG : étudier la façon dont l'ordinateur pourrait améliorer la conception architecturale. La publication des projets Urban II et, plus tard, Urban V, avant même que l'industrie n'engage quelque effort que ce soit dans ce domaine, démontre le potentiel de la CAO appliquée à l'architecture. Quelques années plus tard, Cedric Price, alors titulaire de la chaire d'architecture de l'université de Cambridge, invente le Generator (1976). À la suite de Negroponte, Price utilise le travail d'AMG sur l'IA et l'étend en explorant l'idée d'un bâtiment autonome, en constante évolution, qui réagirait «intelligemment» pour s'adapter aux comportements des usagers. Selon Price, le terme «intelligence» incarne le comportement que le Generator parvient à émuler.

Forts de ce nouvel élan porté par le Massachusetts Institute of Technology (MIT), architectes et industriels transforment ces inventions en de nombreuses innovations. Certainement l'architecte le plus marquant en la matière, Frank Gehry voit dans l'application de la machine à la conception architecturale un moyen d'assouplir les limites des systèmes d'assemblage et d'offrir à ses bâtiments des formes inédites. Gehry Technologies, qu'il a fondée avec Jim Glymph dans

as their applications for design, represent radical progress. Following from Alexander's groundwork, an entire generation of computer scientists and architects go on to create a new field of research: computer-assisted architectural design (CAD). The Architecture Machine Group (AMG), created at Massachusetts Institute of Technology (MIT) in 1967, and led by Professor Nicholas Negroponte, is probably its most singular example. Negroponte's book "The Architecture Machine" (1970) encapsulates the essence of the AMG's mission: "investigating how machines can enhance the creative process, and more specifically, the architectural production as a whole". Culminating with the release of projects URBAN II, and later URBAN V, this group demonstrates, even before the industry makes any headway in this field, the potential of CAD applied to space design. A few years later, Cedric Price, then chair of the Department of Architecture at the University of Cambridge, invents the Generator (1976). Following Negroponte, Price uses AMG's work on AI and expands it by exploring the idea of a constantly evolving, autonomous building which reacts "intelligently" to adapt to user behavior. According to Price, the term "intelligence" embodies the behavior that the Generator manages to emulate.

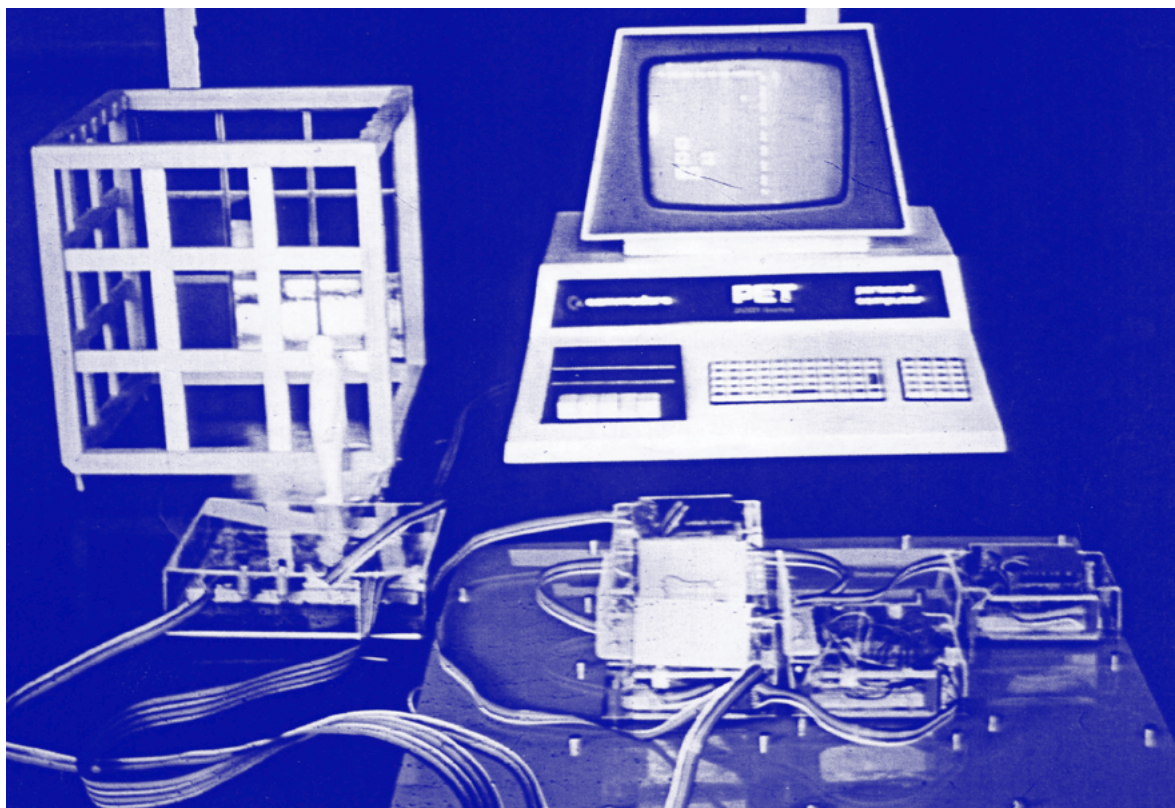
Building on this new momentum from MIT, architects and the industry at large actively transform these inventions into numerous innovations. Architect Frank Gehry, certainly the most vibrant advocate of the cause, perceives the application of computation as the means to drastically relax the boundaries of assembly systems and to give his buildings new shapes and geometries. Gehry Technologies, founded by Gehry and Jim Glymph in the 1980s, used early CAD-CAM software (CAM: computer-aided manufacturing), such as CATIA, from Dassault Systems, to tackle complex geometric problems. Setting the precedent for the next thirty years of Computational Design, Gehry Technology



URBAN 5, 1970

Architecture Machine Group, exposition *Software* au Jewish Museum (New York, États-Unis)

© The Jewish Museum / Art Resource / Scala, Florence



Generator Project, 1976-1980

Cedric Price, architecte © Fonds Cedric Price/Centre Canadien d'Architecture



CATIA, 1981
Dassault Systems, IBM © DR

les années 1980, utilise les premiers logiciels de CAO-FAO (FAO : fabrication assistée par ordinateur), tel *Catia*, de Dassault Systems pour résoudre des problèmes géométriques complexes. Établissant un précédent qui influencera les trente années suivantes, Gehry Technologies démontre la valeur de la CAO aux architectes. Pendant quinze ans, la croissance irrésistible des capacités de stockage de données et de calcul, associée à des capacités machine de moins en moins onéreuses, facilite l'adoption de logiciels de conception 3D. Les concepteurs s'emparent rapidement de ce nouveau système qui permet un contrôle rigoureux de la géométrie, augmentant ainsi la fiabilité, la faisabilité et limitant le coût de la conception; qui facilite la collaboration entre concepteurs et architectes; et qui, enfin, accroît les possibilités de reproduction par rapport à l'esquisse manuelle traditionnelle. Davantage de tests et d'options pour de meilleurs designs *in fine*, là est l'objectif. Cependant, des limites apparaissent. En particulier, la répétitivité de certaines tâches et le manque de contrôle sur des formes géométriques complexes deviennent des obstacles. À ce constat répond l'avènement d'un nouveau paradigme, au-delà de la CAO : le paramétrisme.

demonstrates the value of CAD to architects. Over the next fifteen years, the compelling growth of computational power and data storage capacities, combined with increasingly affordable and more user-friendly machines, massively facilitates the adoption of 3D-design software. Designers rapidly take possession of this new system which, by allowing a rigorous control of geometry, boosts design's reliability, feasibility and curbs the cost of design; facilitating collaboration among designers/architects and, moreover, enabling more design iterations than traditional hand-sketching ever could. More tests and more options for better design results, such is the goal. However, shortcomings eventually arise. In particular, the repetitiveness of certain tasks and the lack of control over complex geometric shapes become serious impediments. Faced with these limitations, a new paradigm emerges beyond CAD: Parametricism.

PARAMÉTRISME

1990 – 2000

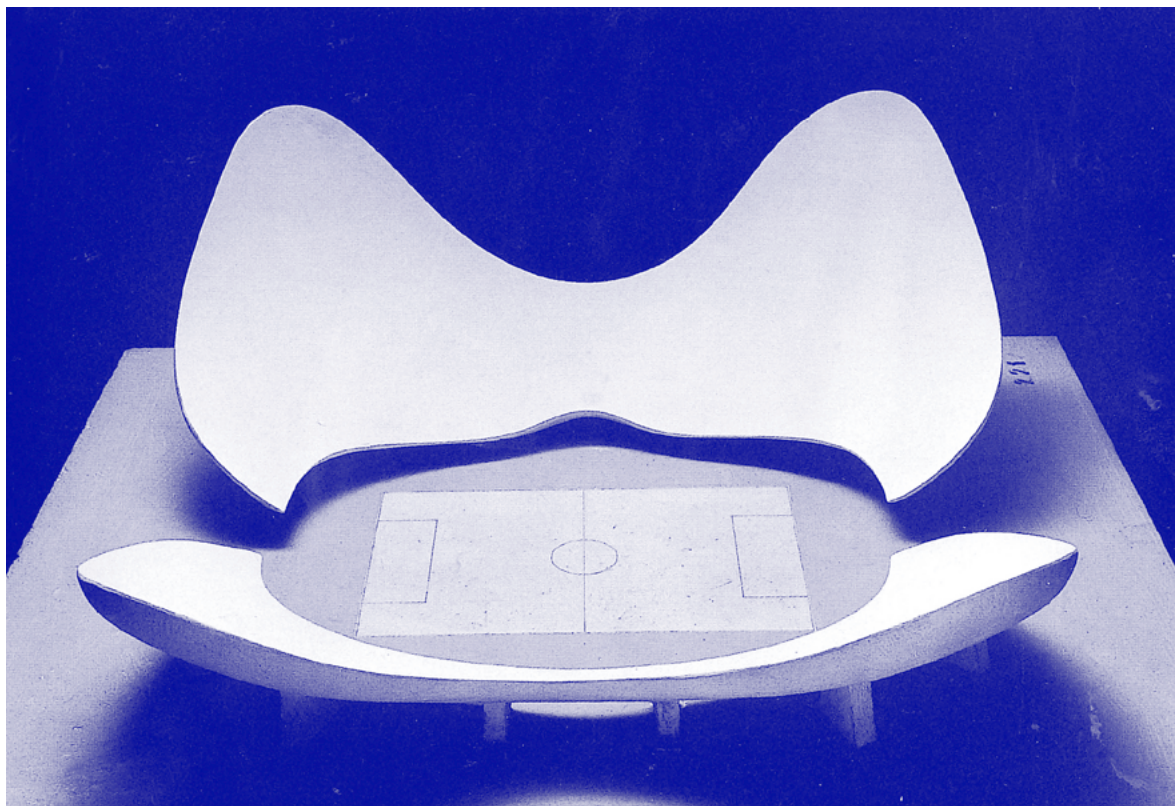
Tout en évitant les tâches répétitives, le paramétrisme permet à l'architecte de mieux maîtriser des formes complexes. Grâce à ce dispositif de conception, chaque tâche est rationalisée en un ensemble de règles simples, constituant une procédure. Cette procédure peut être encodée dans le programme par l'architecte de sorte à automatiser une exécution, auparavant manuelle et fastidieuse. Mais, tout en lui permettant d'encoder une procédure donnée, le système l'autorise à isoler d'emblée les paramètres clés ayant une incidence sur le résultat. L'architecte est alors en mesure de faire varier ses propres paramètres afin de produire différents scénarios : formes ou options générées instantanément par la simple modification des paramètres préalablement définis.

Au début des années 1960, l'architecte Luigi Moretti est à l'origine de l'émergence de l'architecture paramétrique. Son projet Stadium N présente la première expression claire du paramétrisme. En définissant dix-neuf paramètres – parmi lesquels le champ de vision des spectateurs et l'exposition au soleil des tribunes –, Moretti établit une procédure stricte, directement responsable de la forme du bâtiment. Chaque variation du jeu de paramètres induit une forme nouvelle pour le stade. La forme obtenue, pour surprenante qu'elle soit, offre le premier exemple de l'esthétique paramétrique : bien qu'issu d'un procédé quasi scientifique, le résultat n'est pas sans rappeler une certaine organicité.

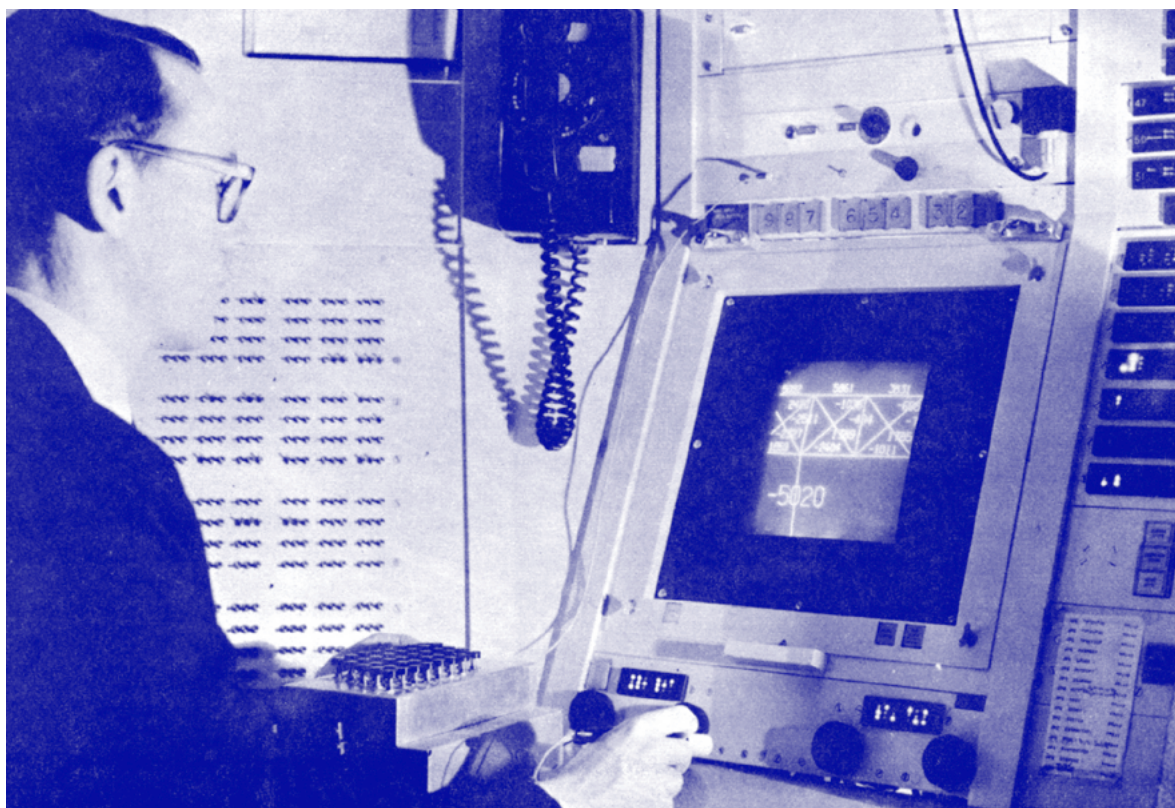
Parametricism allows the architect to better master complex shapes while avoiding repetitive tasks. Thanks to this new approach, each task is rationalized into a set of simple rules, constituting a procedure. This procedure can be encoded in the program by the architect so as to automate a previously manual and tedious execution. However, while allowing the encoding of a given procedure, a parametric program helps in isolating the key parameters affecting the result. The architect is then able to vary the parameters in order to generate different possible scenarios: different shapes or options, generated instantly, by simply varying the previously defined parameters.

In the early 1960s, architect Luigi Moretti initiates the emergence of parametric architecture. His project "Stadium N", is the first clear expression of Parametricism. By defining nineteen driving parameters – among them the spectators' field of view and sun exposure of the tribunes – Moretti establishes a strict procedure, directly responsible for the shape of the building. Each variation of the parameter set induces a new form for the stadium. The resulting shape, surprising as it might be, gives the first example of this new parametric aesthetic: although from a quasi-scientific process, the result is striking by its organicity.

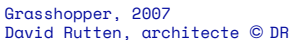
Three years later, Ivan Sutherland applies such principles to design software with his creation of SketchPad, one of the first truly user-friendly CAD software.



Stadium N, 1960
Luigi Moretti, architecte © DR



Sketchpad, 1963
Ivan Sutherland, ingénieur en informatique © Ivan Sutherland



Trois ans plus tard, Ivan Sutherland applique le même principe aux logiciels de conception en créant *Sketchpad*, l'un des premiers logiciels de CAO véritablement abordable. Au cœur du logiciel, la notion de «contrainte atomique» est la traduction par Sutherland de l'idée de «paramètre» de Moretti. Dans un dessin réalisé avec *Sketchpad*, chaque figure géométrique est traduite pour la machine en un ensemble de contraintes atomiques, autrement dit de paramètres. C'est la première formulation de la conception paramétrique en termes informatiques. Samuel Geisberg, fondateur de Parametric Technology Corporation (PTC), lance en 1988 *Pro/Engineer*, le premier logiciel offrant à ses utilisateurs un accès complet aux paramètres géométriques. Lors de la sortie du logiciel, Geisberg résume parfaitement l'idéal paramétrique : «L'objectif est de créer un système suffisamment flexible pour encourager l'ingénieur à envisager facilement une diversité de conceptions. Et le coût des modifications de conception doit être aussi proche de zéro que possible.»

Une fois établi le lien entre conception architecturale et paramètres informatiques, grâce à Sutherland et Geisberg, une génération d'architectes «paramétriques» émerge. En réalité, une poignée d'individus adoptent le paramétrisme pour traduire cette invention en innovations pratiques dans l'industrie. Zaha Hadid est à la pointe de cette démarche. Architecte et mathématicienne irakienne formée au Royaume-Uni, elle conjugue ces deux domaines par le biais de la conception paramétrique. Ses travaux résultent généralement de règles, encodées directement dans le programme, permettant un niveau de contrôle sans précédent sur la géométrie des bâtiments. Chaque décision architecturale se traduit par un réglage donné des paramètres, qui donne en retour une forme spécifique au bâtiment. Pour l'architecte et ingénieur Patrick Schumacher, directeur de l'agence

Embedded in the heart of the software, the notion of "atomic constraint" is Sutherland's translation of Moretti's idea of "parameter". In a drawing made with SketchPad, each geometric form is translated for the machine into a set of atomic constraints, in other words parameters. This very notion is the first formulation of parametric design in computer's terms. Samuel Geisberg, founder of the Parametric Technology Corporation (PTC), in 1988, rolls out Pro/ENGINEER, the first software program providing its users with a full access to geometric parameters. As the software is released, Geisberg sums up perfectly the parametric ideal: "The goal is to create a system that would be flexible enough to encourage the engineer to easily consider a variety of designs. And the cost of making design changes ought to be as close to zero as possible."

*The bridge between design and computation, established by Sutherland and Geisberg, enable a new generation of "parameter-conscious" architects to emerge. In fact, a handful of key individuals adopt Parametricism to translate this new method into practical innovations throughout the industry. Zaha Hadid Architects is the outstanding example of the parametrization of architecture. An Iraqi architect and mathematician trained in the UK, Hadid merges math and architecture using parametric design. Her work is often the result of rules, encoded in the program, allowing for unprecedented levels of control over the buildings' geometry. Each architectural decision is translated into a given set of parameters, resulting in a specific building shape. For architect and engineer Patrick Schumacher, company director of Zaha Hadid Architects, the discipline therefore «converges» towards Parametricism as a design technique, but also as an architectural style. In his book *Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design* (2008), he explains that Parametricism is linked to a growing awareness of the*

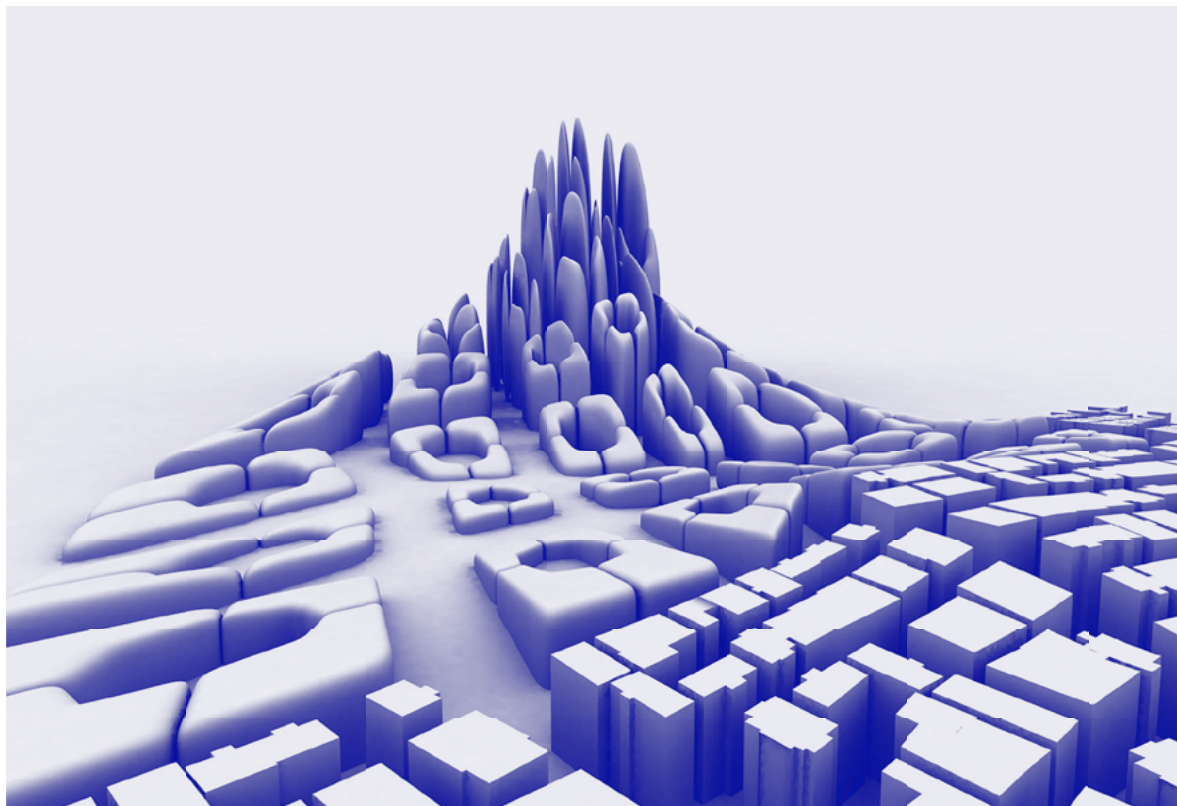
Zaha Hadid Architects, la discipline «converge» dès lors vers le paramétrisme comme technique de conception, mais aussi comme style architectural. Dans son livre *Parametricism – A New Global Style for Architecture and Urban Design* (2008), il explique que le paramétrisme est lié à une prise de conscience croissante de la notion de paramètre, à chaque étape de la conception du bâti.

Ce travail n'aurait pas été possible sans *Grasshopper*, le logiciel développé par David Rutten dans les années 2000. Interface de programmation visuelle, *Grasshopper* permet aux architectes d'isoler facilement les paramètres de conception, tout en leur permettant de les ajuster de manière itérative. Sa simplicité d'usage, associée à l'intelligence des fonctions intégrées, continue à servir pour concevoir la plupart des bâtiments à travers le monde et inspire toute une génération de concepteurs dits «paramétriques».

Toutefois, une révolution de plus grande ampleur encore, amorcée au début des années 2000, a mis le paramétrisme au centre de la pratique quotidienne de la majorité des architectes : le *BIM* (Building Information Modeling) en est l'expression la plus marquante. La naissance et le perfectionnement du *BIM*, sous l'impulsion de Philip Bernstein, alors vice-président d'*Autodesk*, conduisent la rationalité et la faisabilité à un niveau inédit dans le secteur de la construction. L'idée sous-jacente du *BIM* est que chaque élément du modèle 3D d'un bâtiment est fonction de paramètres («propriétés») qui contrôlent la forme d'un objet et le documentent. Du *Sketchpad* de Sutherland à *Revit* – l'un des principaux logiciels *BIM* actuels –, il n'y a qu'un fil conducteur : l'utilisation explicite de paramètres comme moteurs de la conception.

concept of parameter, at each stage of the built environment. This work would have not been possible without *Grasshopper*, software developed by David Rutten in the 2000s. Designed as a visual programming interface, *Grasshopper* allows architects to easily isolate the driving parameters of their design, while allowing them to tune them iteratively. The simplicity of its interface coupled with the intelligence of the built-in features continues to power most buildings' design across the world and has inspired an entire generation of "parametric" designers.

However, a more profound revolution, driven by parametrization since the early 2000s, makes *Parametricism* prevalent to the daily practice of most architects: *BIM* (Building Information Modeling) is its most striking expression. The creation and development of *BIM*, spearheaded by Philip Bernstein, then vice president of *Autodesk*, brings rationality and feasibility to a brand-new level within the construction industry. The underlying idea of *BIM* is that every element in a 3D building model is a function of parameters ("properties") that drives each object's shape and documents it. From Sutherland's *SketchPad* to *Revit* – the most widely used *BIM* software today –, there is a single common thread: the explicit use of parameters as the driving force of design.



Masterplan de Kartal Pendik (Istanbul, Turquie), 2009
Zaha Hadid et Patrick Schumacher, architectes © Zaha Hadid Architects

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE 1990 – 2010

L'intelligence artificielle (IA) est fondamentalement une approche statistique de l'architecture alliée à l'informatique. Celle-ci semble non seulement pouvoir apporter une réponse aux limitations de l'architecture paramétrique, mais aussi et surtout ouvrir une ère radicalement nouvelle de la conception architecturale.

En 1956, le mathématicien américain John McCarthy invente le concept d'IA, soit «l'utilisation du cerveau humain comme modèle pour la logique de la machine». Au lieu de concevoir un modèle déterministe, conçu pour un nombre défini de variables et de règles, l'IA permet à l'ordinateur de créer des paramètres intermédiaires à partir d'informations collectées au sein d'un jeu de données. Une fois la «phase d'apprentissage» réalisée, la machine peut générer des solutions qui ne répondent pas simplement à des paramètres prédéfinis, mais qui créent des résultats imitant la distribution statistique des informations reçues au cours de la phase d'apprentissage. Ce concept est au cœur du changement de paradigme apporté par l'IA. L'indépendance partielle de la machine pour élaborer sa propre compréhension du problème, conjuguée à sa capacité à émuler à partir d'un ensemble complexe d'exemples bouleversent les principes préétablis du paramétrisme. Les règles et paramètres n'étant pas déclarés explicitement à l'avance par l'utilisateur, la machine peut révéler de manière inattendue des phénomènes

Artificial Intelligence (AI) is fundamentally a statistical approach to architecture. AI seems to not only provide a response to the limitations of parametric architecture, but also and above all to open up a radically new era of architectural design.

In 1956, the American mathematician John McCarthy invents the concept of AI, namely "using the human brain as a model for machine logic". Instead of designing a deterministic model, built for a set number of variables and rules, AI lets the computer create intermediary parameters, from information either collected from the data or transmitted by the user. Once the "learning phase" is achieved, the machine can generate solutions that are not simply answering a set of predefined parameters, but which create results emulating the statistical distribution of the information received during the learning phase. This concept is at the core of the paradigm shift brought about by AI. The partial independence of the machine to build its own understanding of the problem, coupled with its ability to digest the complexity of a set of examples, disrupts the premise of Parametricism. Since not all rules and parameters are explicitly declared upfront by the user, the machine can unexpectedly reveal underlying phenomena and even try to emulate them. It is a quantum leap from the world of heuristics (rule-based decision making) to that of statistical modeling. At the beginning of the 1980s, the



John McCarthy, inventeur du concept d'IA en 1956
© Chuck Painter/Stanford News Service



Célébrités fictives créées à l'aide de la technologie GAN , 2018
Tero Kaaras,Timo Aila, Samuli Laine, Jaako Lehtinen, chercheurs © Nvidia

sous-jacents et même essayer de les imiter. C'est un saut quantique du monde de *l'heuristique* (prise de décision fondée sur des règles explicites) à celui de la *modélisation statistique*.

Au début des années 1980, l'augmentation soudaine de la puissance de calcul disponible et la forte hausse des financements dans ce domaine donnent un deuxième souffle à la recherche sur l'IA. Cette période est caractérisée par deux révolutions principales : le système expert et le moteur d'inférence. Le premier correspond aux machines capables de raisonner sur la base d'un ensemble de règles, en utilisant des instructions conditionnelles. Une percée réelle à l'époque, dont le projet Cyc, développé par Douglas Lenat, est la manifestation exemplaire. Il s'agit de machines conçues pour le raisonnement par inférence. À partir d'une base de connaissances initiale (un ensemble de propositions établies comme vraies), une machine d'inférence peut déduire la véracité d'une nouvelle déclaration.

Il faut attendre la mathématisation de l'IA au début des années 1990 pour que ce domaine fournisse des résultats prometteurs. L'avènement de l'IA s'illustre en outre dans un second domaine de recherche : les réseaux et l'apprentissage automatique. Grâce à l'utilisation de modèles informatiques «en couches», également appelés «réseaux de neurones» en ce qu'ils rappellent la structure neuronale du cerveau humain, une machine est maintenant capable de saisir des complexités plus élevées que celles des modèles précédemment développés. Ces modèles peuvent être «entraînés» ou, en d'autres termes, adaptés à des tâches spécifiques. Parmi les nombreuses innovations qui s'inspirent alors de cette évolution, les réseaux de neurones génératifs adverses (Generative Adversarial Neural Networks ou GANs) s'avèrent particulièrement pertinents pour l'architecture. Théorisé en 2014 par Ian Goodfellow, chercheur chez Google Brain, ce modèle

sudden increase in computational power and the sharp increase of funding gives AI research a second wind. Key to this period are two main revolutions: expert systems and inference engines. The first corresponds to machines able to reason based on a set of rules, using conditional statements. A real breakthrough at the time is Cyc, the project developed by Douglas Lenat, which involve machines geared towards inference reasoning. Using a knowledge base (a set of statements established as true), an inference machine is able to deduce the veracity of a new statement.

It is not until the early 1990s, and the advanced mathematization of AI, that the field provides promising results. The emergence of a new type of models reveals a second area for AI's potential: networks and machine learning. Thanks to the use of "layered" computer models, also called "neural networks" in that they recall the neural structure of the human brain, a machine can now grasp higher complexities than previously developed models. Such models can be "trained", or in other words, adjusted for specific tasks. Among the many innovations which were inspired by this development, the generative adversarial network (GAN) proves to be particularly relevant for architecture. Theorized in 2014 by Ian Goodfellow, researcher at Google Brain, this model could generate images from neural networks, while ensuring a level of accuracy through a self-correcting feedback loop.

Goodfellow's research took AI from an analytical tool to a generating agent, and in doing so brings it closer to architectural concerns: design and image production. In other words, AI now represents a new generation of affordable, powerful and relevant tools for the discipline. If Negroponte's or Price's work were initially almost devoid of true machine intelligence, current architectural software can now leverage such possibility and multiply its potential.

génère des images à partir de réseaux de neurones, tout en garantissant un certain niveau de précision grâce à une boucle autocorrective.

Les recherches de Goodfellow font passer l'IA d'outil d'analyse à agent générateur et, ce faisant, la rapprochent des préoccupations architecturales : le dessin et la production d'images. En clair, l'IA représente aujourd'hui une nouvelle génération d'outils abordables, puissants et pertinents pour la discipline. Si les travaux de Negroponte ou de Price étaient presque dépourvus à l'origine de véritable intelligence machine, les logiciels d'architecture actuels pourraient désormais exploiter cette possibilité et en démultiplier les potentialités.

Bien que l'application de l'intelligence artificielle à l'architecture soit *a priori* considérable, elle reste toutefois contingente à la capacité des concepteurs à communiquer leurs intentions à la machine. Pour devenir un assistant fiable, la machine doit être formée, impliquant que les architectes relèvent deux défis principaux : sélectionner, dans le vaste domaine de l'IA, les outils appropriés, et choisir un niveau d'abstraction pertinent et des qualificatifs mesurables, qui puissent être communiqués à la machine. La réalisation de ces deux conditions préalables déterminera le succès ou l'échec d'une forme d'intelligence artificielle compatible avec l'architecture.

Although the potential AI represents for Architecture is a priori significant, it remains nonetheless contingent upon the designers' ability to communicate their intention to the machine. To become a dependable aide, the machine must be trained, implying that architects face two main challenges: selecting, in the vast field of AI, the appropriate tools, and choosing a relevant level of abstraction and measurable qualifiers, which can be communicated to the machine. The fulfillment of these two prerequisites determine the success or failure of a form of artificial intelligence compatible with architecture.

IA

ARCHITECTURE

L'intelligence artificielle représente une nouvelle vague technologique, non une disruption. Elle complète la pratique de l'architecte en l'assistant du point de vue de l'expertise architecturale et enrichit son expression. Aujourd'hui, les résultats de la recherche, académique et privée, font apparaître les premiers résultats de cette évolution. Les techniques de l'IA dite «généralive» – c'est-à-dire à même de créer des formes, et non uniquement de les analyser – sont récentes. Depuis trois ans, elles ouvrent de nouveaux champs d'expérimentation.

Les «réseaux de neurones généralitifs adverses» (GAN) constituent l'un de ces champs, au potentiel prometteur. Leur capacité créatrice permet l'élaboration de modèles en mesure d'apprendre à répliquer des phénomènes statistiquement significatifs parmi les données qui leur sont présentées. Leur structure est une avancée conceptuellement décisive. Combinant deux modèles, le généralisateur et le discriminateur, les GAN procèdent d'une analogie similaire à la relation entre l'élève et l'enseignant. Le généralisateur (l'élève) cherche à généraliser des images ressemblant à celle d'une base de données définie par l'utilisateur. Le discriminateur (l'enseignant), lui, donne une «note» au généralisateur pour chaque nouvelle image généralisée par ce dernier. Cette note juge la vraisemblance de l'image créée. En fonction de ce résultat, le généralisateur s'adaptera pour améliorer sa performance, tout comme un élève travaillerait pour obtenir de meilleures notes. C'est ce jeu de va-et-vient entre le généralisateur et le discriminateur qui affine la généralisation d'images tout au long de la phase d'entraînement d'un modèle GAN. Un tel modèle développe ainsi progressivement sa capacité à créer des images synthétiques pertinentes, en tenant compte de phénomènes qu'il a opportunément détectés parmi les données observées.

Si les GAN représentent une formidable opportunité, il est essentiel de les entraîner judicieusement. En formatant la base de données d'images de plans, ou *training set*, il est possible de contrôler le type d'information que le modèle apprendra. Par exemple, proposer simplement la forme d'une parcelle et l'empreinte du bâtiment associé produira un modèle capable de créer des emprises au sol adaptées à ces deux contraintes. Pour autant, le mimétisme n'est pas exempt de faux pas ni d'errance s'il n'est pas guidé. Le «sens architectural» reste donc le garant de l'agencement des *training sets* et de la qualité des résultats du dispositif. En d'autres termes, un modèle ne sera pertinent qu'à la condition d'avoir été entraîné convenablement par un architecte.

Une séquence d'entraînement type réalisée en une journée et demie montre comment l'un de nos modèles GAN apprend progressivement à répartir des pièces et les ouvertures nécessaires (fenêtres et portes) dans un appartement. Bien que les tentatives initiales soient imprécises et confuses, au bout de deux cent cinquante itérations, la machine se construit une certaine forme d'intuition.

Grâce aux GAN, l'IA aborde enfin la création d'images, médium fondamental de la conception architecturale. Par le passé, toutes les échelles du bâti ont pu être rationalisées en représentations bidimensionnelles. L'image s'est ainsi imposée en architecture comme le moyen central de dessiner et concevoir les villes. C'est donc un pont évident entre intelligence artificielle et architecture : si l'IA est capable de créer des images, et d'apprécier leur complexité, l'appliquer à la production architecturale en est une prolongation naturelle. Sont présentés ici les récents résultats de la recherche, à quatre échelles distinctes du bâti : le plan, la façade, la structure et la perspective.

Pour chaque échelle, et donc chaque modèle d'intelligence artificielle, la part spécifiée (part d'information que l'architecte soumet à la machine) est clairement distinguée de la part générée (part d'information que la machine crée en retour). Cette démarche pourra ainsi démontrer l'apport de l'intelligence artificielle et la part d'expertise revenant à l'architecte.

Les résultats qui suivent correspondent évidemment à un instant T, puisque la recherche se poursuit et, bien sûr, progresse. Ils augurent cependant d'un avenir passionnant pour la conception architecturale.

AI ARCHITECTURE

Artificial Intelligence represents a new technological wave rather than a disruption. It complements our architectural practice by assisting architectural expertise and enhancing its expression. Today, the results of academic and private research show the first proof of this evolution. So-called “generative” AI techniques – that is, able to create shapes, not just analyze them – are recent. Over the last three years they have opened up new fields of experimentation.

Generative adversarial networks (GAN) represent one of these potentially promising fields. These models are able to learn to replicate statistically significant phenomena found among the data presented to them. Their structure is a conceptually decisive innovation. Combining two models, the “generator” and the “discriminator”, GAN follow a similar analogy to that of a student and a teacher. The “generator” (the student) seeks to generate images resembling that of a user-defined database. The “discriminator” (the teacher) gives the “generator” a “grade” for each new image generated by the latter. This grade will assess the resemblance of the image created. Based on this result, the “generator” will adapt to get better results. It is this back-and-forth process between the “generator” and the “discriminator” that hone the generated images throughout the training phase of a GAN model. Such a model will thus gradually develop its capacity to create relevant synthetic images, taking into account phenomena that it will have opportunely detected among the observed data.

If GAN represent a great opportunity, it is essential to train them wisely. Formatting the database of images, or “training set”, makes it possible to control the type of information that the model will learn. For example, simply defining the shape of a parcel and the footprint of the associated building will produce a model that can generically create building footprints from the shape of a preexisting parcel. However, mimesis is not immune from blunders nor rambling if not guided. Our own “architectural sense” will therefore remain the guarantor for securing both the quality of the training sets and the quality of the results. In other words, a model will only be relevant if suitably trained by an architect.

A typical training sequence produced over a day and a half, shows how, one of our GAN models gradually learns to layout rooms and allocate necessary openings (windows and doors). Although the initial attempts are imprecise and disorderly, after 250 iterations, the machine builds up a certain form of architectural intuition.

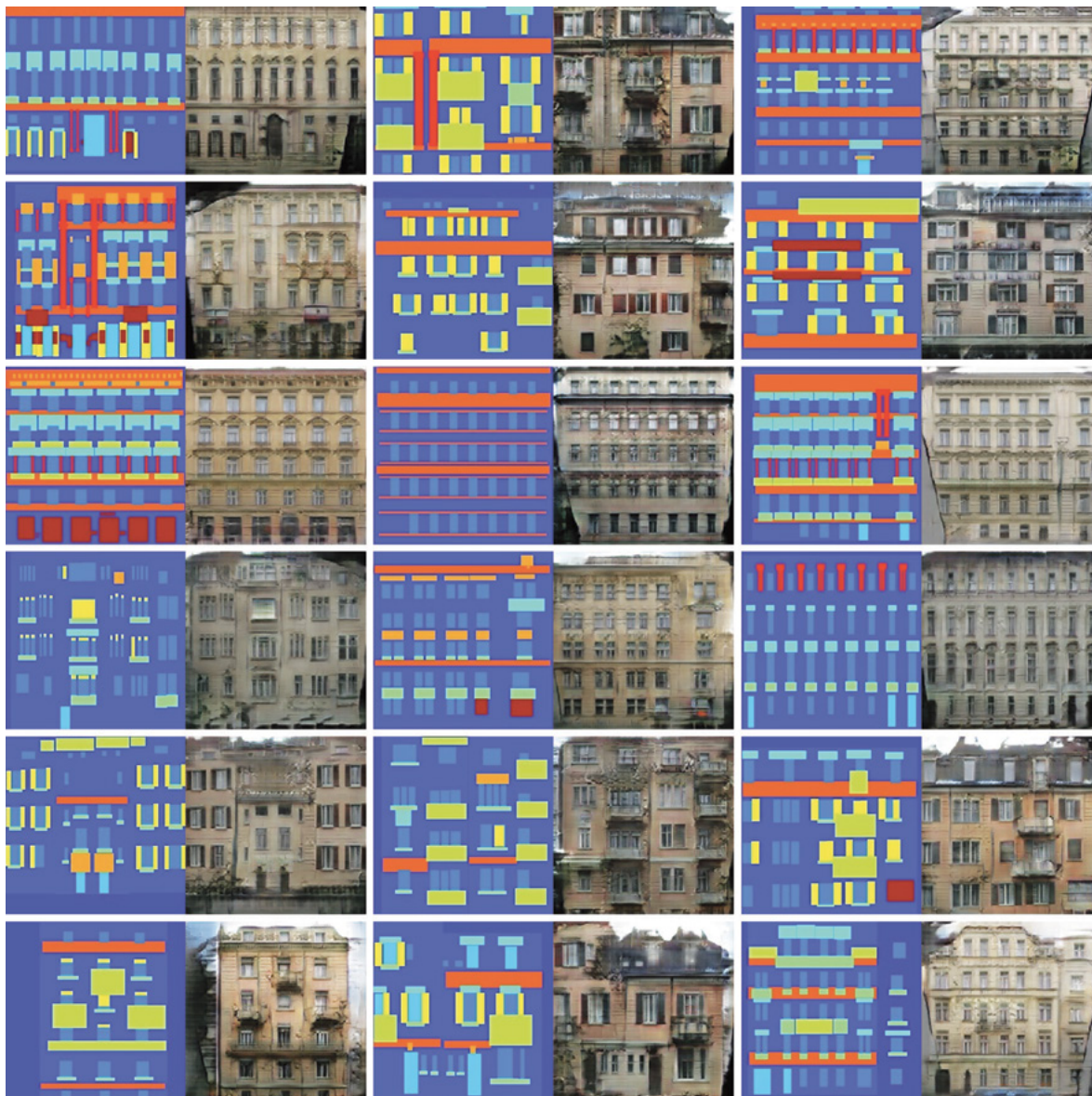
Thanks to the GAN, AI ultimately undertakes image creation, a fundamental medium in the practice of architectural design. Indeed, the image has emerged in architecture as the central means of drawing and designing cities. It is therefore an obvious bridge between artificial intelligence and architecture: if AI is capable of creating images, and gauge their complexity, applying it to architectural production is a natural extension. Showcased here are recent research results, on four distinct building scales: plan, facade, structure, and perspective.

For each scale, and therefore for each artificial intelligence model, the specified part (part of information that the architect submits to the machine) is clearly distinguished from the part generated (part of information that the machine creates in return). This approach will thus demonstrate the contribution of artificial intelligence and the architect's share of expertise.

Needless to say, these are a snapshot of the state of the current practice since research continues and, of course, progresses. They do however herald an exciting future for architectural design.

FAÇADE

PHILLIP ISOLA, JUAN-YAN ZHU,
TINGHUI ZHOU & ALEXEI A. EFROS
UC BERKELEY ARTIFICIAL INTELLIGENCE



Pix2Pix produit des façades texturées. À chaque nouvel agencement d'éléments (fenêtres, pilastres, portes, balcons etc.) spécifiés par l'architecte, le logiciel offrira un rendu quasi-réaliste d'une façade.

Pix2Pix produces textured facades. Each time the architect specifies a new arrangement of elements (such as windows, pilasters, doors or balconies), the software generates a quasi-realistic rendering of a facade.

Dessiner l'enveloppe d'un bâtiment exige de penser une composition de sa façade et de réfléchir à sa matérialité. L'IA peut offrir sa capacité de duplication et sa flexibilité lors de la conception de la façade. Philip Isola assisté d'autres chercheurs de l'Université de Californie à Berkeley proposent en 2018 un premier modèle GAN (projet Pix2Pix), capable de texturer une façade à partir d'une image décrivant la disposition de ses éléments structurants (fenêtres, corniches, pilastres, portes, balcons, etc.).

Cette approche s'apparente à un strict jeu de composition. L'utilisateur peut varier la taille et les proportions de chaque élément de la façade, avant de demander au modèle de texturer l'ensemble. Le processus est donc rapide et libre. Grâce à cet aperçu ponctuel de la matérialité et de l'aspect global, il est possible d'ajuster sa composition à loisir, afin de faire évoluer le rendu.

La machine traduit la composition donnée par l'architecte en une trame cohérente, qui met en harmonie le style et la matérialité. La machine donne également à chaque élément spécifié par l'architecte un niveau de détail bien supérieur. Par exemple, pour une fenêtre représentée à l'aide d'un carré bleu par l'utilisateur, la machine proposera un encadrement, un vitrage et une corniche, tout en traitant dans un même style les autres fenêtres de la composition.

L'illustration démontre la capacité de ce modèle à générer une multitude de façades.

Designing the envelope of a building requires addressing the composition of its facade and its materiality. AI can assist architects in this design task thanks to its flexibility. Philip Isola assisted by other researchers at the University of California, Berkeley, propose in 2018 a GAN model (Pix2Pix), able to texture a facade starting from an image describing the layout of its main structural elements (windows, cornices, pilasters, doors, balconies, etc.).

This approach refers the design of a facade to a strict composition set. The user is free to vary the size and proportions of each element, before instructing the model to texture the whole. The process is seamless and straightforward. Thanks to the punctual overview of the materiality and overall appearance, the architect can adjust its composition at leisure, to change the final rendering.

The machine translates this composition into a coherent image, harmonizing the style and the appearance of the materiality. It also adds a greater degree of detail to each item specified by the architect. For example, for a window represented by a blue square by the user, the machine will propose a frame, a glazing, and a cornice, while harmonizing it with the other windows, of similar style, in the composition.

The examples shown here demonstrate the ability of this model to generate a wide variety of facades.

PLAN

STANISLAS CHAILLOU
HARVARD GRADUATE SCHOOL OF DESIGN



ArchiGAN aménage l'espace intérieur d'appartements dont l'emprise au sol évolue. À chaque nouvelle forme, la machine trouvera un agencement de l'espace différent, pour satisfaire les contraintes en jeu.

ArchiGAN arranges the interior space of apartments whose footprint is changing. For each new shape the machine identifies a different layout fulfilling the given requirements.

La planification de l'espace est centrale dans la conception architecturale. À cet enjeu essentiel qu'est l'agencement des pièces, l'IA est en mesure d'apporter des solutions. Réaliser un plan d'étage donné tout en respectant les contiguïtés nécessaires, avec des pièces de dimension raisonnable et une répartition correcte des ouvertures, est une tâche à laquelle l'IA peut répondre, parvenant parfois à des résultats surprenants.

En 2019, dans le cadre d'une thèse à Harvard, Stanislas Chaillou a proposé d'entraîner des modèles GAN (Pix2Pix) à concevoir l'aménagement intérieur d'un appartement, afin d'assister l'architecte dans sa réflexion sur le programme. Celui-ci est invité à spécifier des données initiales, à savoir l'emprise au sol de l'appartement, la position des fenêtres en façade et celle de la porte d'entrée. En fonction de ce jeu de contraintes, le modèle ArchiGAN propose une répartition des pièces, des cloisons et des éléments structurels (colonnes, murs porteurs, etc.).

Voici les résultats de ce modèle : pour chaque paire d'images, celle de gauche représente les contraintes initiales spécifiées par l'architecte, et celle de droite le résultat obtenu grâce au modèle GAN. Si la qualité des typologies produites reste discutable, ces résultats doivent être abordés comme un premier test, à partir duquel l'utilisateur est invité à renouveler l'expérience.

Il s'agit d'illustrer une collaboration bientôt envisageable entre des modèles d'intelligence artificielle et l'architecte. Sur des questions techniques, demandant une réflexion à la fois quantitative et qualitative, l'intelligence artificielle fournit déjà des pistes d'exploration valides.

Space planning is central to architectural design. The arrangement of rooms within a footprint represents a major challenge, to which AI can provide solutions. Being able to divide a given floor plan while respecting the necessary adjacencies, reasonable room dimensions, and proper opening distribution, is a task for which AI can offer initial solutions and provide at times surprising results.

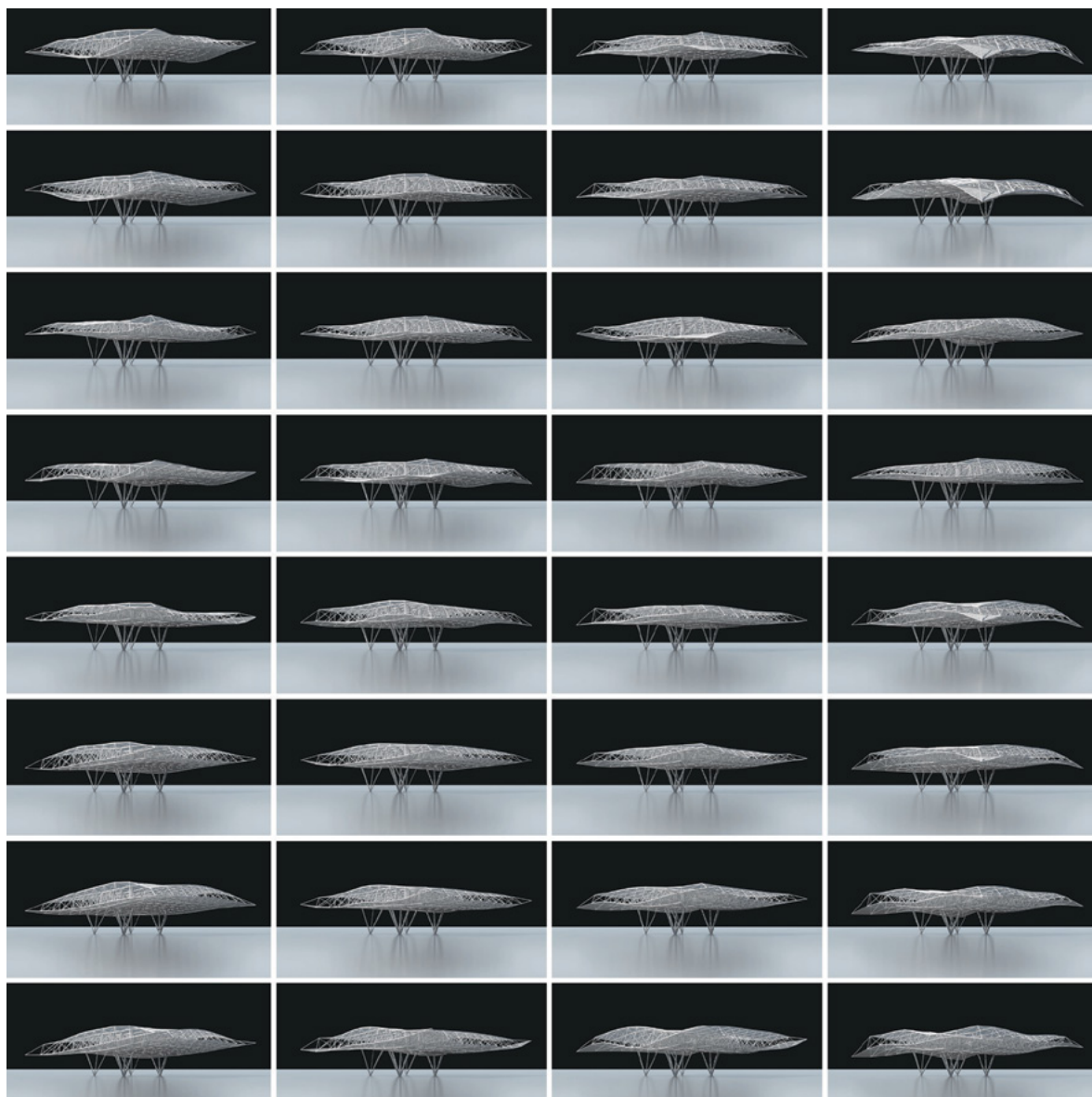
In 2019, as part of his thesis at the Harvard GSD, Stanislas Chaillou trained some GAN models (Pix2Pix) to estimate the interior layout of apartment plans. The architect is required to specify initial conditions, namely the shape of the footprint of the apartment, the position of its facade windows, and the position of the front door. According to this set of constraints, the model, called ArchiGAN, suggests a distribution of rooms, partitions and structural elements (columns, load-bearing walls, etc.).

In the provided examples, for each pair of images, the one on the left represents the initial constraints specified by the architect, and the image on the right the result obtained thanks to ArchiGAN. If the quality of the typologies produced is still questionable, these results should be approached as trial run from which the user is encouraged to iterate, and to gradually refine.

We see in these results a rather conclusive draft of the collaboration that will soon take place between artificial intelligence-based models and the architect. On technical issues, requiring both a quantitative and a qualitative consideration, artificial intelligence can already bring valid explorations and insights.

STRUCTURE

CAITLIN MUELLER & RENAUD DANHAIVE
MIT DIGITAL STRUCTURES LAB



Digital Structures Lab conçoit une grande variété de structures, tout en maintenant une certaine performance structurelle. Ces formes sont le résultat de modèles d'IA prédictifs, permettant le design de formes pertinentes, sans avoir recours à des temps de calcul longs et onéreux.

Digital Structures Lab designs a wide variety of structures while maintaining a certain structural performance. These shapes are the result of predictive AI models, allowing for the design of relevant shapes without having to resort to long and expensive computing times.

La question structurelle est un autre enjeu majeur de la conception architecturale. Tout bâtiment se doit d'être doté d'une structure apte à porter les charges qu'implique la forme de celui-ci. Si le recours à une trame structurelle régulière a été une révolution en son temps, l'intelligence artificielle permet aujourd'hui de s'en éloigner pour mettre en œuvre des structures irrégulières plus adaptées à la réalité des bâtiments.

Caitlin Mueller et Renaud Danhaive, dans leurs travaux réalisés au MIT Digital Structures Lab, à Cambridge, proposent une utilisation originale de l'intelligence artificielle, permettant d'explorer des structures uniques, tout en garantissant à l'utilisateur un certain niveau de contrôle sur les formes générées. Mueller et Danhaive s'intéressent en particulier à l'agencement en treillis des tirants de structure, afin de former une toiture «efficace». L'efficacité est ici comprise comme la minimisation de la quantité de métal employée pour réaliser la structure.

La variété des formes créées démontre la richesse de cette nouvelle approche. Toutes les structures présentées répondent à un jeu de contraintes similaires, mais chacune propose une solution singulière. La plupart de ces formes sont par essence «contre-intuitives», c'est un autre avantage de l'intelligence artificielle. En permettant une certaine liberté d'exploration, l'IA peut aboutir à des solutions éloignées des schémas traditionnels. Grâce à ces «bonds» dans le champ des possibles, l'IA devient une force de proposition. Parmi ces solutions inattendues, le concepteur est libre ensuite de choisir la plus adaptée.

Structural integrity is another major challenge for architectural design. Every building must have a structure capable of carrying the loads implied by its form. If the use of regular structural frames was a revolution in its time, artificial intelligence moves beyond this initial paradigm, facilitating the design of irregular structures, more suitable to the structural reality of buildings.

Caitlin Mueller and Renaud Danhaive, in their work at MIT, Cambridge, propose an inspired use of artificial intelligence which makes exploration of unique structures possible while ensuring that the user maintains a certain level of control over the generated forms. Mueller & Danhaive focus on the arrangement of tie rods of lattice structures, in order to form «efficient» roofs. Efficiency is understood here as the minimization of the amount of metal used to shape the structure in question.

The value of this new approach is demonstrated by the variety of forms created. All the structures presented respond to a set of similar constraints, but each offers a unique solution. Most of these forms are inherently «counterintuitive», which is another advantage of artificial intelligence. By allowing a certain freedom of exploration, AI can lead to solutions far removed from traditional patterns. Thanks to these «leaps» in the field of possibilities, AI becomes a creative force. The designer is then free to choose the most suitable option among these unexpected solutions.

PERSPECTIVE

KYLE STEINFELD

UC BERKELEY

COLLEGE OF ENVIRONMENTAL DESIGN



GANLocI génère des «scènes urbaines», image après image. L'atmosphère de quartier, le mobilier urbain, et les bâtiments sont restitués par la machine pour créer des animations de villes pourtant inexistantes.

GANLocI generates «urban scenes» frame by frame. The machine reproduces buildings and urban furniture, as well as a neighbourhood atmosphere in order to create animated-yet non-existent-cities.

La représentation architecturale passe inévitablement par la mise en perspective. À ce mode de représentation correspond la nécessité pour l'architecte de percevoir la qualité des volumes créés. En passant d'une volumétrie à une atmosphère, le rendu donne une idée de la matérialité, de l'éclairage, de la mise en situation, etc. C'est une «transcription» de l'expérience perçue.

Architecture is first and foremost represented using perspective views. This mode of representation corresponds to the importance to perceive the quality of the volumes created. By moving from a raw and abstract volume to an atmosphere, the rendering addresses questions such as materiality, lighting, etc. It is the "transcription" of the perceived experience.

Par rapport à la volumétrie initiale d'un projet, sa mise en perspective ajoute un nombre considérable d'informations. L'intelligence artificielle est à même d'en produire une simulation. Les modèles GAN peuvent «habiller» une volumétrie, pour lui donner un aspect réaliste. Kyle Steinfeld, professeur à la University of California, a développé en 2019 GAN Loci, un projet de recherche qui explore les transformations possibles d'une volumétrie simple en des rendus de perception urbaine quasi photoréalistes. Steinfeld a entraîné des modèles d'intelligence artificielle à texturer des vues perspectives de volumes blancs et neutres. À partir d'une prise de vue quelconque, GAN Loci habille les volumes de textures imitant des façades, ajoute une voirie, du mobilier urbain, des piétons et des voitures, afin de lui donner un aspect de scène urbaine. Steinfeld va plus loin encore, en proposant d'entraîner chaque GAN à travailler un milieu urbain précis : banlieue pavillonnaire, parc public, hypercentre, etc. À chaque modèle correspond un rendu spécifique, un type de milieu urbain généré qui lui est propre.

Relative to the initial massing of a project, its representation in rendered perspective adds a considerable amount of information. Artificial intelligence makes the simulation possible. GAN models offer the possibility to augment perspective views, to give them a realistic appearance. Kyle Steinfeld, professor at the University of California, Berkeley, developed GAN Loci in 2019, a research project which explores the possibility of transforming the view of a simple set of volumes into a photorealistic urban scene. Steinfeld trained some artificial intelligence models to texture perspective views of initially white and neutral volumes. For a given perspective view, GAN Loci enhances it with facade-like textures, adds a pathway, street furniture, pedestrians and cars, to eventually turn a snapshot of raw geometrical shapes into complete urban sceneries. Steinfeld goes even further, and proposes to train each GAN on a given style of urban environment: suburbs, public park, downtown, etc. Each model therefore correspond to a distinctive urban setting.

Au-delà du formalisme de l'exercice, GAN Loci offre à l'architecte la possibilité de penser le rendu de façon globale et unifiée. Grâce à GAN Loci, l'utilisateur peut percevoir la probable réalité de son projet. Ce passage direct d'une volumétrie simple à une vue réaliste permet à l'architecte d'appréhender dès la phase initiale l'ambiance ou l'atmosphère qu'il projette.

Beyond the formalism of this exercise, GAN Loci offers the architect the possibility of considering the rendering holistically. By applying GAN Loci, users can perceive the potential reality of their project. This direct translation, from a raw volume to a realistic view, allows the architect to grasp, from the first phases of the project, the ambiance or atmosphere of their design.

For architecture, artificial intelligence is ultimately neither a “sui generis” phenomenon nor an untimely disruption, let alone a new intimidating dogma. Signals have been announcing it for decades, and it is only the culminating point of seventy-five years of invention and innovation. To the extent that AI can allow us to reconcile efficiency and organicity while offering a wide variety of options to the designer, we see here tremendous potential. At the very least, AI will enrich our practice and shed light on any blind spots of our discipline.

This exhibition hopes to be at the forefront of this evolution and contribute to the creation of a discussion platform on the relationship between AI and architecture. We urge architects to take an interest in AI and the scientific community to consider architecture as a field of investigation in its own right. We believe that AI is an asset, favoring a statistical approach to architectural design. Its less deterministic and more holistic character is undoubtedly an opportunity for our profession. Rather than using machines to optimize a set of variables, AI could allow us to rely partly on the machine to extract important and relevant architectural qualities, and to reproduce them throughout the design process.

Artificial intelligence could never automate the intuition and the sensibility of the architect. However, the real risk for architecture has little to do with any dystopic consideration about the «man-machine» relationship, but, more prosaically, to competition and to the sovereignty of the profession. Indeed, either the profession will be able to drive the aggregation of disciplines around these intelligent platforms that foreshadow the architectural practice of tomorrow, or miss this opportunity and will be reduced to an ancillary discipline at the service of more powerful engineering practices that will emerge from the worlds of construction or technology. In the meantime, let's be practical: architects must realize that benefiting from an intelligent assistant is easier than many think and that this option, in its earliest phase, should be earnestly studied and experimented with.

In light of the examples offered in this exhibition, and the amount of research projects being developed in the industry and in academia, let us concede that artificial intelligence in architecture is underway and is gradually becoming an actual field of investigation. Plan, facade, structure, perspective: AI is currently in the experimental phase to bring solutions to all scales of the design of our built environment. Clearly the results are there and the applications of AI eminently tangible.

Far from considering AI as a new dogma for architecture, we see this area as a new challenge, full of potential and promise.

AVENIR & PERSPECTIVES

Pour l'architecture, l'intelligence artificielle n'est ni un phénomène *sui generis* ni une perturbation intempestive, encore moins un nouveau dogme intimidant. Les signaux l'annoncent depuis des décennies et elle n'est que le point culminant de soixante-quinze ans d'inventions et d'innovations. Dans la mesure où l'IA peut permettre de concilier efficacité et organicité tout en élargissant la variété d'options pour le concepteur, elle offre un potentiel formidable. À tout le moins, l'IA enrichira notre pratique et éclairera certains angles morts de notre discipline.

Cette exposition espère se placer à l'avant-poste de cette évolution et contribuer à la création d'une plateforme de discussion sur les rapports de l'IA avec l'architecture. Nous appelons de nos vœux les architectes à s'intéresser à l'IA et la communauté scientifique à considérer l'architecture comme un champ d'investigation à part entière. Nous estimons que l'IA est un atout, favorisant une approche statistique de la conception architecturale. Son caractère moins déterministe et plus holistique est sans aucun doute une chance pour le métier d'architecte. Plutôt que d'utiliser des machines pour optimiser un ensemble de variables, l'IA permettrait de déterminer grâce à la machine les qualités importantes du bâti et de les reproduire tout au long du processus de conception.

L'intelligence artificielle ne pourra jamais automatiser l'intuition ni la sensibilité de l'architecte. Et notre conviction est que l'homme se servira toujours des machines comme d'outils, et non l'inverse. Le vrai risque pour l'architecture n'est pas lié à une spéculation sur la relation «homme-machine», mais, de façon plus prosaïque, à la concurrence et à la souveraineté du métier. En effet, soit la profession est en mesure de piloter l'agrégation des disciplines autour de ces plateformes intelligentes qui préfigurent la conception architecturale de demain, soit elle passe à côté de cette opportunité et se verra asservie aux puissantes ingénieries qui émergeront des mondes de la construction ou de la technologie. En attendant, restons pragmatiques : les architectes doivent comprendre que bénéficier d'un assistant intelligent est plus simple que beaucoup ne l'imaginent et que cette option, certes embryonnaire, doit être sérieusement étudiée et expérimentée.

À la lumière des exemples présentés dans cette exposition, et de la quantité de projets de recherche en cours dans l'industrie et dans le monde académique, admettons que l'intelligence artificielle en architecture est en marche et devient peu à peu un véritable domaine d'investigation. Plan, façade, structure, perspective : l'IA est en phase d'expérimentation dès aujourd'hui afin d'apporter des solutions à toutes les échelles de la conception du bâti. Force est de constater que les résultats sont au rendez-vous et les applications de l'IA éminemment tangibles.

Loin de considérer l'IA comme un nouveau dogme pour l'architecture, nous la concevons comme un nouveau défi, riche de potentiels et de promesses.

Stanislas Chaillou, Architecte et chercheur en intelligence artificielle

PUBLICATION

SOUS LA DIRECTION DE

Stanislas Chaillou,
Harvard Graduate School of Design

*Stanislas Chaillou,
Harvard Graduate School of Design*

Né à Paris, Stanislas Chaillou a obtenu sa licence en architecture à l'École Polytechnique fédérale de Lausanne et son master à la *Harvard Graduate School of Design*. En concentrant sa pratique sur l'architecture et l'intelligence artificielle, il affirme le besoin d'une meilleure intégration entre ces deux disciplines pour changer l'environnement bâti.

A Paris native, Stanislas Chaillou received his undergraduate degree in Architecture at the Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne, and his Master in Architecture from the Harvard Graduate School of Design. Focusing his practice around Architecture and Artificial Intelligence, he believes in the necessary integration of both disciplines to change our built environment.

Stanislas Chaillou travaille désormais en tant qu'architecte et *Data Scientist* au sein du département R&D de Spacemaker. Il est chargé de développer des projets de recherche autour de l'intelligence artificielle pour assister la conception architecturale.

Stanislas Chaillou works today as an Architect & Data Scientist at Spacemaker's R&D department. He is in charge of developing AI research projects, to assist and enhance architectural conception.

Stanislas Chaillou a remporté deux *American Architecture Prizes* (2017) ainsi que l'*Architecture Masterprize* (2018). Il s'est également vu attribuer la bourse ZGF pour ses travaux architecturaux. Il est également un *Fulbright Scholar*, titulaire de la bourse Arthur Sachs, et bénéficiaire de la bourse Jean Gaillard accordée par l'Université d'Harvard.

Stanislas Chaillou was awarded two American Architecture Prizes (2017) and the Architecture Masterprize (2018). He received the 2018 ZGF scholarship for his past architectural work. He is also a Fulbright Scholar, an Arthur Sachs Fellow and Jean Gaillard Fellow at Harvard University.

CONTRIBUTIONS

Phillip Isola, Jun-Yan Zhu, Tinghui Zhou et Alexei A. Efros
Berkeley Artificial Intelligence Research Lab

Le *Berkeley Artificial Intelligence Research Lab* (BAIR) réunit des chercheurs de l'université de Berkeley dans des domaines aussi variés que la vision par ordinateur, l'apprentissage machine, le traitement automatique du langage naturel, la planification, le contrôle et la robotique. Le BAIR abrite plus de 30 enseignants-chercheurs et 200 étudiants de master et chercheurs post-doctorat qui effectuent des recherches sur les avancées fondamentales dans ces domaines, explorent des thèmes transversaux comme l'apprentissage multimodal profond ou la compatibilité IA-humain, et bâtissent des ponts entre l'IA et d'autres disciplines scientifiques ainsi que les humanités.

Caitlin Mueller et Renaud Danhaive
MIT Digital Structures Lab

Les travaux de la chercheuse Caitlin Mueller se situent à l'intersection entre l'architecture et l'ingénierie des structures. Elle est actuellement enseignante-chercheuse adjointe au sein des départements d'architecture, de génie civil et environnemental du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Dans le cadre du *Building Technology Program*, elle dirige le groupe de recherche *Digital Structures*. Ses travaux se concentrent sur les nouveautés de la conception informatique ainsi que les méthodes de fabrication numérique qui favorisent une architecture novatrice à haute performance dans l'environnement bâti. Elle a notamment contribué à l'organisation du *Design Modelling Symposium* de Paris en 2017, la conférence ACADIA au MIT en 2017, et le

Phillip Isola, Jun-Yan Zhu, Tinghui Zhou Alexei, A. Efros
Berkeley AI Research Lab (BAIR)

The Berkeley Artificial Intelligence Research (BAIR) Lab brings together UC Berkeley researchers across the areas of computer vision, machine learning, natural language processing, planning, control, and robotics. BAIR includes over 30 faculty and more than 200 graduate students and postdoctoral researchers pursuing research on fundamental advances in the above areas as well as cross-cutting themes including multi-modal deep learning, human-compatible AI, and connecting AI with other scientific disciplines and the humanities.

Caitlin Mueller & Renaud Danhaive
MIT Digital Structures Lab

Caitlin Mueller is an academic who works at the intersection of architecture and structural engineering. She is currently an Associate Professor at the Massachusetts Institute of Technology's Department of Architecture and Department of Civil and Environmental Engineering, in the Building Technology Program, where she leads the Digital Structures research group. Her research focuses on new computational design and digital fabrication methods for innovative, high-performance architecture in the built environment. Among other things, she has contributed to the organization of the 2017 Design Modelling Symposium in Paris, the 2017 ACADIA Conference at MIT, and 2018 Symposium of the International Association of Shell and Spatial Structures at MIT, which she chaired. With her team, she regularly publishes and presents her research in peer-reviewed journals, international conferences, and the popular press.

colloque de l'*International Association of Shell and Spatial Structures* du MIT, qu'elle a présidé. Avec le soutien de son équipe, elle publie et présente régulièrement ses travaux de recherche dans des revues *peer-reviewed*, des conférences internationales ainsi que dans la presse grand public.

Renaud Danhaive est designer et chercheur au MIT, où il parachève son Doctorat en technologie du bâtiment au sein du groupe de recherche *Digital Structures*. Ses recherches portent sur l'application de l'apprentissage machine à l'exploration du design orienté vers la performance. L'objectif : démontrer comment l'IA peut décupler la créativité humaine et contribuer à l'amélioration de la conception des bâtiments et des produits. Renaud Danhaive est titulaire d'un Bachelier Ingénieur civil architecte de l'Université Libre de Bruxelles et d'un Master en génie civil et environnemental du MIT. Il a travaillé chez Arup New York et Ney and Partners en tant qu'ingénieur expert en ponts, publié dans des revues internationales, et enseigné au MIT ainsi qu'à l'école *Politecnico di Milano*.

Kyle Steinfeld
University of California, Berkeley,
College of Environmental Design

Kyle Steinfeld, architecte et programmeur, vit à Oakland. En associant travail créatif, recherche universitaire et développement de logiciel, il aspire à révéler le potentiel souvent oublié de la conception informatique. Pour lui, il n'y a pas d'obstacle à une union entre raison et caprice, analyse et mystère, lucidité et bizarrerie. Son œuvre transcende les supports pour s'exprimer à travers une combinaison de matériaux visuels et spatiaux. Le fil rouge ? Contredire la voix qui dicte cérémonieusement les résultats des processus informatiques pour y opposer tout un éventail de voix alternatives.

Renaud Danhaive is a designer and researcher working at MIT, where he is completing a Ph.D. in Building Technology in the Digital Structures research group. His research focuses on applications of machine learning to performance-driven design exploration and how AI can augment human creativity and aid in the design of better products and buildings. He received degrees in architecture and structural engineering from the Université Libre de Bruxelles (B.Sc. in Architecture and Engineering) and MIT (M.Eng. in Civil and Environmental Engineering). He has worked as a bridge engineer at Arup New York, and Ney and Partners, has published internationally, and has taught at MIT and Politecnico di Milano.

Kyle Steinfeld
University of California, Berkeley,
College of Environmental Design

Kyle Steinfeld is an architect who works with code and lives in Oakland. Through a hybrid practice of creative work, scholarly research, and software development, he seeks to reveal overlooked capacities of computational design; he finds no disharmony between the rational and whimsical, the analytical and uncanny, the lucid and bizarre. His work cuts across media, and is expressed through a combination of visual and spatial material. Across these, we find a consistent theme of undermining the imperative voice so often bestowed upon the results of computational processes, and find in its place a range of alternative voices.

PARTENAIRES

Notre logement, c'est le lieu où nous devons nous sentir chez nous, à la maison. Aujourd'hui pourtant, alors que le logement est le premier poste de dépense des ménages, 72% des Français déclarent ne pas trouver celui qui réponde à leurs besoins. Dans l'immobilier neuf, la moitié des acquéreurs demandent des transformations du plan original, qui ne sont bien souvent pas prises en compte.

Comment alors permettre aux gens d'acheter le logement de leurs rêves sans passer leur vie à le chercher ?

Chez habx, nous pensons qu'une partie de la réponse consiste à construire des logements correspondant mieux aux besoins de leurs futurs habitants. Qu'il faut doter les opérateurs d'outils permettant de collecter et de prendre en compte facilement ces besoins. Qu'entrer dans un logement neuf qui nous ressemble ne doit plus être un luxe.

C'est pourquoi nous avons développé des solutions permettant d'aider à la création massive d'alternatives de plans d'appartements, pour permettre aux architectes et à leurs partenaires de donner le choix aux futurs habitants, dans le respect des intentions architecturales et des contraintes propres à chaque bâtiment. Chez nous, l'intelligence artificielle est mise au service des architectes et de l'architecture : nous partageons avec eux l'ambition de mettre l'habitant et ses usages au coeur de la ville et du bâtiment.

Nous sommes convaincus que, de la rencontre entre architecture, immobilier et numérique, peut naître une nouvelle façon de concevoir des logements : plus simple, plus riche, plus abordable, plus humaine.

Indeed, our lives revolve around our homes. Yet, today, although housing is our biggest source of spending, 72 percent of prospective home buyers declare not finding a home that matches their needs and wishes. In new residential developments, half of all acquirers ask for alteration to the original floorplan. These are rarely taken into account.

The question becomes; how can people acquire the home of their dreams without spending a lifetime looking for it?

At habx, we believe that part of the answer lies in creating homes closer to the needs and wishes of future inhabitants, in providing operators with tools to collect and easily take into account these desires. We believe that entering a home that resembles us shouldn't be a luxury.

That is why we have developed solutions allowing mass generation of floor plan alternatives, to empower architects and their partners in providing a choice to future inhabitants, while respecting architectural intentions and constraints specific to each project. At habx, Artificial Intelligence is at the service of architects and architecture: we share the ambition of recentering the city and its buildings on its inhabitants.

We are convinced that the meeting of architecture, real estate development and technology will give birth to a new way of conceiving housings: simpler, richer, more affordable and more human.

Au cours des trente prochaines années, nos villes seront confrontées à deux dilemmes : la population urbaine mondiale augmentera de plus de 2,5 milliards de personnes et la demande en énergie des bâtiments – qui représente actuellement 40% des émissions du globe – continuera de croître rapidement.

Il incombe aux architectes, urbanistes et promoteurs immobiliers de concevoir des villes à la fois plus denses et plus durables. Ajoutons à cela que les sites urbains, les exigences réglementaires et même la composition des équipes se sont complexifiés.

L'intelligence artificielle a un rôle fondamental à jouer dans la résolution de ces défis. Chez Spacemaker, nous avons développé une plateforme d'intelligence destinée aux premiers stades du développement, qui combine le *cloud computing* et l'IA afin d'aider les utilisateurs à maximiser tant la qualité de vie que la densité d'un site. Elle permet ainsi aux urbanistes et aux architectes de mettre au point une proposition optimale. Avec Spacemaker, ils peuvent concevoir, explorer et optimiser une multitude de paramètres en temps réel – en recevant des analyses détaillées portant sur des critères (jusqu'à 89 au total) considérés essentiels à la qualité d'un quartier, y compris la lumière du jour, le bruit, le vent ou la circulation.

Toutefois, ce sont les humains qui rendent un espace habitable, pas les données. Nous pensons donc que pour être la plus percutante possible, l'IA doit être associée à une intuition architecturale. Architectes, urbanistes et promoteurs sont les arbitres de l'espace urbain. Une plate-forme d'intelligence artificielle telle que Spacemaker est un outil certes puissant, mais qui a besoin de leurs compétences pour combiner des données matérielles et logicielles au sein de solutions qui rendent nos villes non seulement durables, mais également agréables à vivre.

Over the next thirty years, our cities are faced with two dilemmas: The global urban population will grow by more than 2.5 billion people, and the demand for energy from buildings, which currently makes up 40% of all global emissions, will keep on growing rapidly.

The task at hand for architects, urban planners and real estate developers is no small feat. They need to design denser, yet moresustainable cities, and to do so faster than ever before! All the while, urban sites, regulatory requirements and even the composition of planning teams have grown in complexity.

Artificial Intelligence has a fundamental role to play in solving these challenges. At Spacemaker, we developed a site intelligence platform for the early stages of real-estate development that combines cloud computing and AI to help users maximize the living qualities and density of a building site. Urban planners and architects are empowered to develop the optimal site proposal based on physical data, site constraints, regulations and local preferences. With Spacemaker, they can design, explore and optimize a multitude of concepts in real time – receiving detailed analytics on up to 89 criteria that are critical for the quality of a neighbourhood, including daylight, noise, wind, or traffic.

But, it's humans that make a space livable, not data. We believe that to be the most impactful, AI must be paired with architectural intuition. Platforms such as Spacemaker are powerful tools, but architects, urban planners, developers are the arbiter of urban space. They come equipped with a thorough understanding of local nuances, building codes and the web of complex relationships to be navigated. And they are the ones that combine hard and soft data into solutions that don't just make our cities sustainable, but also a pleasure to live in.

INTELLIGENCE
ARTIFICIELLE
& ARCHITECTURE

Exposition et ouvrage créés
par le Pavillon de l'Arsenal
02.2020 - 04.2020

Pavillon de l'Arsenal

Alexandre Labasse, architecte,
Directeur général

Marianne Carrega, architecte,
Adjointe au Directeur général

Julien Pansu, architecte,
Directeur de la communication,
du multimédia et du développement
des publics, avec Léa Mabillet et
Estelle Petit, chargées de
communication, assistés de Faustine
Monceau et Chloé Bonneau

Jean-Sébastien Lebreton, architecte,
Responsable des expositions,
avec Fernande Njonkou Njanjo,
Sophie Civita et Valentine Machet,
architectes, chargées de production

Léa Baudat, chargée de documentation,
avec Lucie Prohin

Réalisation et montage

Relecture et corrections
des textes français : Julie Houis
Relecture et corrections
des textes anglais : Monique Gross
Traductions de l'anglais
vers le français : Nicolas Knobil
Sérigraphies : Sacré bonus
Construction et accrochage : Corégie
Impressions : Projecta/Medicis
Transferts : Couleur et communication
Montages vidéo : Année Zéro
Éclairage : DCPA de la Ville
de Paris/STGCAI, Jean Grandisson,
Alain Pousson, Rudy Norbal,
Rodrigue Rosemond et Pierre Perriau

Commissaire scientifique invité

Stanislas Chaillou, architecte
et chercheur en intelligence
artificielle

Le Pavillon de l'Arsenal
et le commissaire scientifique
remercient les architectes et
laboratoires de recherche,
qui ont accepté d'apporter
leur contribution à cette exposition :

Renaud Danhaive, Alexei A. Efros,
Phillip Isola, Caitlin Muellet,
Kyle Steinfeld, Juan-Yan Zhu,
Tinghui Zhou,

Harvard Graduate School of Design,
UC Berkeley College
of Environmental Design,
UC Berkeley AI Research Lab,
MIT Digital Structures Lab

ainsi que

Axelle Baillet, Jeremy Bellanger,
Maria Dantz, Jacques-Franck Degioanni,
Benjamin Delaux, Emmanuel Di Giacomo,
Bastien Dolla, Anders Kvåle,
Fabien Renou

Exposition et publication réalisées avec le soutien de

habx



SPACEMAKER

LE MONITEUR

Achevé d'imprimer sur
les presses de l'imprimerie
STIPA à Montreuil, France
ISBN 978-2-35487-054-6
Dépôt légal : mars 2020
© Pavillon de l'Arsenal, 2020
www.pavillon-arsenal.com

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE & ARCHITECTURE

Exposition
Pavillon de l'Arsenal
02.2020 - 04.2020



978-2-35487-054-6

13 €