

CHAPITRE 1

Pensée algorithmique en conception architecturale. Bio-inspiration et algorithmes génétiques

Damien Claeys^{1,2,*} et Louis Roobaert^{1,2}

¹TSA-LAB, LAB, UCLouvain, rue Wafelaerts 47/51, 1060 Bruxelles, Belgique

²LOCI, UCLouvain, rue Wafelaerts 47-51, 1060 Bruxelles, Belgique

Abstract

From cabinets of curiosities to theories of evolution and theories of living systems, the knowledge derived from studying nature's autopoietic processes inspires bio-inspired analogies in architectural design. Following the implementation of several pedagogical experiments for training architects, a theoretical reflection is proposed by transposing principles from genetic optimization algorithms to the search for solutions in architectural design. The objective is to move beyond merely aesthetic or constructive analogies by developing a general algorithmic and bio-inspired mode of thinking.

Keywords

Architectural design, genetic algorithm, algorithmic thinking, generative design, biological analogies

* Contact auteur : damien.claeys@uclouvain.be

Résumé

Des cabinets de curiosités, en passant par les théories de l'évolution, jusqu'aux théories des systèmes vivants, les connaissances tirées de l'étude des processus autopoïétiques de la nature suscitent des analogies bio-inspirées en conception architecturale. Après la mise en place de plusieurs expériences pédagogiques pour la formation des architectes, un retour théorique est proposé en transposant des principes des algorithmes génétiques d'optimisation à la recherche de solutions en conception architecturale. L'objectif est de dépasser les analogies esthétisantes ou constructives en développant une pensée générale, algorithmique et bio-inspirée.

Mots-clés

Conception architecturale, algorithme génétique, pensée algorithmique, conception générative, analogies biologiques

1. Cabinets de curiosités et d'histoire naturelle

Au ^{xv}^e siècle, les salles privatives des *cabinets d'étude* apparaissent avant de devenir des *cabinets de curiosités* contenant des collections d'objets. Leur émergence est stimulée, entre autres, par l'étude d'objets archéologiques liés à l'Antiquité gréco-romaine, par la découverte de lieux et d'objets exotiques ramenés des premiers grands voyages d'exploration intercontinentaux, et par une envie d'appréhender le monde de manière plus scientifique, en valorisant l'observation de spécimens collectés *in situ*. Au départ, ces collections sont privées et non structurées (un espace protégé accessible à des initiés contenant un mélange d'objets hétéroclites), alors que les érudits et les puissants qui les constituent désirent développer des connaissances ou provoquer l'étonnement.

Les objets des collections ont été d'abord classés en deux catégories : (1) les *naturalia* des trois règnes (minéral, végétal, animal), dont certains sont considérés comme des *mirabilia* (objets étranges associés à d'hypothétiques propriétés magiques) ; (2) les *artificialia* créés par l'être humain (œuvres d'art, antiquités, machines, objets précieux...). Par la suite, deux autres catégories d'objets ont été distinguées : (3) les *scientifica* liés au développement de la science (instruments, automates, horloges, cartes géographiques, globes, sextants, etc.) ; (4) les *exotica* ramenés par les explorateurs des lointaines contrées (minéraux, végétaux et animaux exotiques, objets ethnographiques...).

L'observation des curiosités naturelles a des effets sur l'architecture et l'ingénierie. D'abord, l'interprétation de la structure harmonique de la nature oriente la conception des édifices. Dans la tradition antique de la recherche de commensurabilité entre le macrocosme (cosmos) et le microcosme (corps, artefacts, édifices, etc.), les architectes ayant redécouvert le *De architectura* [1] de Vitruve jouent avec la proportion lorsqu'ils cherchent l'*eurythmia*, en tant qu'expression visuelle de la *symmetria*. Ensuite, des analogies métaboliques sont établies entre le corps vivant et l'édifice à générer. Si bien que Filarète [2], à l'extrême, écrit que « le bâtiment est vraiment un homme vivant », qu'il « comporte des vides, des entrées et des lieux creux qui assurent son fonctionnement », qu'il « tombe malade et meurt » et qu'il peut être « guéri de sa maladie par un bon médecin ». À l'image de l'humain devant être conçu avant

de naître, il affirme encore que l'architecte doit « rêver de sa conception » de l'édifice « avant d'accoucher », et qu'il doit « la retourner en tous sens dans son esprit, pendant sept à neuf mois, exactement comme une femme porte son enfant dans son corps durant sept à neuf mois ». Enfin, des observations des processus vivants permettent la mise au point de machines. À travers ses recherches, ses dessins d'observations et ses autopsies, Léonard de Vinci décrit des organismes vivants et développe des machines par biomimétisme. De même, Michel-Ange considère l'architecture comme un organisme dynamique, plein de forces et de tensions, et il affirme qu'il faut avoir une bonne connaissance de l'anatomie pour comprendre comment équilibrer un édifice, en révélant la structure, les forces internes, les muscles et les tendons, avant de proposer un projet cohérent et expressif [3].

Dès le XVII^e siècle, les sciences modernes et le naturalisme se développent, la magie est critiquée par la méthode analytique, la nature statique et symbolique moyenâgeuse est remplacée par une nature vivante qu'il faut observer, classer et représenter. Des inventaires des collections des cabinets de curiosités sont édités sous la forme de catalogues illustrés (développement de classifications scientifiques, diffusion du savoir entre savants européens, spécialisation des collections) et elles sont progressivement ouvertes au public. Au cœur d'une pensée organiciste, la fascination de l'époque pour le mouvement et la complexité organique s'exprime par l'usage de l'architecture baroque comme théâtre du vivant, les formes courbes provoquent une expérience sensorielle dynamique pour l'usager, renforcée par l'ornementation organique et la lumière atmosphérique (par exemple, *la chiesa di San Carlo alle Quattro Fontane* (1634-1680) à Rome, de Francesco Borromini). Au XVIII^e siècle, les cabinets de curiosités deviennent des *cabinets d'histoire naturelle*, considérés comme les ancêtres des musées d'histoire naturelle. Les naturalistes rapportent des spécimens de leurs missions d'exploration. Les collections sont structurées et par une classification scientifique, principalement inspirées du comparatisme en botaniques [4].

2. Théories de l'évolution et objets à réaction poétique

Au XIX^e, les scientifiques se professionnalisent et ils se spécialisent, les cabinets de curiosités sont remplacés par les *musées*. Les sciences du vivant se développent parallèlement à la gestation des premières théories de l'évolution.

Inspiré du principe de la compétition malthusienne [5], du transformisme lamarckien [6], de la théorie du gradualisme géologique [7], de la sélection artificielle d'espèces végétales [8] et animales [9] en botanique et de ses observations lors de son voyage sur le *Beagle* (1831-1836), Charles Darwin [10] introduit l'idée que l'évolution des espèces s'explique par la sélection naturelle, rendue nécessaire par les variations existantes et par les changements de l'environnement. Seuls les individus les mieux adaptés d'une population survivent à la « *struggle for live* ».

Tiraillé entre ses passions pour l'art et la science, Ernst H.P.A. Haeckel [11] réalise de nombreux croquis et aquarelles de plantes et d'animaux, découverts lors de ses expéditions ou visibles uniquement au microscope. Présentant des êtres étranges et merveilleux, ces magnifiques dessins influencent les formes conçues par les architectes. À la charnière entre le XIX^e et le XX^e siècle, l'Art nouveau s'inspire des représentations des sciences du vivant, en tentant de redéfinir un rapport entre l'humain et la nature en pleine révolution industrielle. Ainsi,

inspiré par les planches de Haeckel, Hendrik Petrus Berlage conçoit un lustre décoratif inspiré par le genre *Discomedusae*, Constant Roux s'inspire de la méduse *Rhopilema frida* pour dessiner un lustre du Musée océanographique de Monaco (1908), tandis que René Binet s'inspire de radiolaires pour les grilles du projet de Porte monumentale à l'Exposition universelle de Paris (1900).

Connu pour être le premier biomathématicien, D'Arcy Thompson [12] montre que la sélection naturelle n'est pas l'unique responsable de la morphogenèse et que le rôle de l'évolution biologique a été surestimé au détriment de celui de la mécanique des formes. En effet, des forces mécaniques et des lois physiques sont également impliquées dans le processus déterminant le développement de la forme d'un organisme vivant. Il décrit comment passer d'une forme d'une espèce à celle d'une espèce proche avec des transformations géométriques. Il montre plusieurs exemples de corrélations entre des formes biologiques et des phénomènes mécaniques. Selon lui, la forme suit des lois naturelles.

Suggérant le terme de *génétique*, vers 1905, pour décrire l'étude de l'hérédité et la science de la variation, William Bateson [13] donne à la communauté scientifique, vers 1900, une visibilité aux travaux antérieurs de Gregor Mendel décrivant les mutations au niveau des gènes et la transmission de caractéristiques d'une génération à une autre. Tandis que Conrad H. Waddington [14] élabore le concept de « paysage épigénétique », une métaphore expliquant la trajectoire développementale employée par un organisme parmi d'autres trajectoires possibles. De là, Julian Huxley [15] décrit la théorie synthétique de l'évolution (TSE), en articulant les apports de la sélection darwinienne (sélection naturelle) et de la mutation mendélienne (génétique des populations).

Les analogies bio-inspirées impactent l'architecture lorsque l'édifice à concevoir est considéré comme un organisme vivant (par exemple, l'« *organic architecture* » de Frank Lloyd Wright [16]). Elles alimentent la phase d'idéation quand Le Corbusier utilise des « objets à réaction poétique » [17], tirés du quotidien, avec lesquels une « conversation constante » est entretenue [18], et dont l'observation, avec un crayon à la main, permet de comprendre « bien des choses » [19]. Ainsi, il utilise une coquille d'escargot pour le projet du musée à Croissance illimitée (1939) ou une carapace de crabe pour la toiture de la chapelle de Notre-Dame du Haut à Ronchamp (1953-1955). De même, Jean Cosse et ses étudiants [20], à partir d'objets hétéroclites conservés dans une mallette, tirent des leçons des architectures naturelles, à partir de la décomposition en éléments, de l'identification de la structure, de l'établissement de tracés régulateurs et de la recherche de règles de croissance géométrique.

3. Théories des systèmes vivants et paramétrisme

Au cours de la Seconde Guerre mondiale, les bases de l'informatique moderne sont cristallisées par la conceptualisation de la « machine universelle » d'Alan M. Turing [21], tandis que l'origine de la cybernétique est indissociable des recherches de Norbert Wiener et Julian Bigelow pour créer un dispositif servo-mécanique de tir anti-aérien, et de celles qu'ils mènent ensuite avec Arturo Rosenblueth pour généraliser l'application d'un concept d'ingénierie – le « *feedback* » – à la fois aux machines et aux êtres vivants [22, 23] : une analogie est établie entre le fonctionnement d'organismes vivants agissant en fonction d'une finalité et le comportement de machines rétroagissant vers un objectif.

En reprenant les recherches de D'Arcy Thompson [12] et de Waddington [14] avec les acquis de l'informatique, Turing [24] présente un modèle biomathématique de la morphogenèse, basée sur sa théorie des « structures de réaction-diffusion ». Il décrit des « *patterns* » périodiques de la nature (par exemple, les rayures et les spirales qui peuvent se combiner pour produire les tâches d'un guépard). Il suggère que des processus physicochimiques simples pourraient être à la base de la morphogenèse animale et végétale. Finalement, René Thom [25], en dialogue avec Waddington, développera encore la question de la morphogenèse à partir de la « théorie des catastrophes ».

Parallèlement aux mouvements contestataires de Mai 68 et au passage du modernisme au postmodernisme, simultanément, ont lieu, dans les années 1970, une mise à jour de la théorie synthétique de l'évolution (TSE) et, dans le sillage des travaux en biologie de Ludwig von Bertalanffy [26], l'apparition d'une seconde cybernétique menant à une théorie générale des systèmes (GST) [27,28].

D'un côté, Niles Eldredge et Stephen Jay Gould [29] remettent en cause le principe d'évolution graduelle de la TSE et ils développent la théorie des « équilibres ponctués », montrant que l'évolution des espèces n'est pas toujours graduelle et continue au cours des temps (des intenses et brèves « révolutions génétiques », séparées par de longues périodes de stabilité). De plus, la sélection naturelle reposant sur la lutte pour la survie est également remise en cause par Lynn Margulis [30] en mettant en avant l'importance des interactions symbiotiques dans l'évolution, du mutualisme interspécifique par rapport à la compétition.

De l'autre, les analogies entre modélisation de systèmes et processus évolutifs en biologie se renforcent à travers les capacités simulatrices de l'informatique. Des modélisations générales des systèmes vivants, allant de la cellule, en passant par la société humaine, jusqu'au système supranational, sont proposées par James G. Miller [31] qui identifie des structures et des fonctions communes à plusieurs niveaux d'organisation. Par ailleurs, Peter S. Stevens [32] démontre que les formes naturelles obéissent à des lois physiques et géométriques simples, mais qu'elles sont combinées de façon complexe, que des « motifs » peuvent être identifiés dans la nature et qu'ils sont donc transposables à des formes architecturales. La dynamique des systèmes initiée par Jay W. Forrester [33-36] pour étudier des industries ou des villes, sert de base à la création du rapport Meadows [37, 38] fournissant un premier modèle d'évaluation de l'évolution de l'espèce humaine avec celle des ressources planétaires. Prolongeant l'idée du « métabolisme urbain » d'Abel Wolman [39], Paul Duvigneaud [40-42] décrit l'écosystème de la ville de Bruxelles. Heinz von Foerster [43] fonde le Biological Computer Laboratory (BCL) (1958-1975), laboratoire interdisciplinaire et international, mêlant notamment biologie, sciences informatiques et cognitives, dans lequel il accueille différents chercheurs autour de la thématique de l'auto-organisation (Gordon Pask, Humberto R. Maturana, Francisco J. Varela...). Par ailleurs, la morphogenèse numérique se développe en générant de formes via des algorithmes inspirés de la nature. Ainsi, John H. Conway [44] crée le *Game of Life*, un automate cellulaire développé à partir d'un modèle mathématique, possédant des règles préétablies et produisant des phénomènes complexes.

Enfin, au sein des algorithmes évolutionnistes (EA), John H. Holland [45, 46] crée les algorithmes génétiques (GAs) utilisés dans des problèmes d'optimisation pour trouver une solution approchée, quand aucune méthode exacte n'existe ou que la solution est inconnue. Il applique une logique inspirée du processus de la sélection naturelle (à la mutation darwinienne, il ajoute l'opération de *crossover*) à une population de solutions, avec des opérateurs

généraux inspirés de la génétique (*crossover*, *mutation*, *inversion*). La solution est approchée itérativement par bonds successifs, à l'image des « équilibres ponctués » [29].

Imprégnés des recherches de proportions d'Albrecht Dürer [47], appliquées aux variations du corps humain, et des représentations des manuels de dessin du XIX^e siècle, utilisant des grilles de perspective pour représenter fidèlement des objets, les architectes développent des grilles déformables capables de transformer mathématiquement des formes bio-inspirées. Les architectes comprennent que l'activité de projétation architecturale se rapproche d'un processus de morphogenèse, de génération de formes par contraintes internes et externes, ce qui favorise le développement de structures adaptables (par exemple, les structures de Frei Otto), d'architectures biomimétiques et, à terme, la conception générative à l'aide d'outils paramétriques. Dans les années 1940, Rudolf Wittkower [48] a analysé les villas palladiennes d'un point de vue paramétrique, ce qui influence, dès 1942, le travail de l'architecte Luigi Moretti et le mathématicien Bruno de Finetti, qui introduisent une pensée paramétrique en architecture. Ils explorent l'usage de fonctions paramétriques pour la conception de formes construites, ils définissent l'architecture paramétrique en tant que l'étude d'un système architectural déterminé par les relations entre ses dimensions en fonction de paramètres. Selon eux, l'architecture est une instance particulière dans un espace de solutions définies par l'ensemble des paramètres mobilisés. Ils font un nouvel usage des techniques informatiques, mathématiques et statistiques en intégrant des logiques de variations, offrant la modélisation d'une forme de morphogenèse architecturale. Les outils paramétriques reprennent le vocabulaire de la génétique : des occurrences du projet *générées* forment une *population*.

4. Pensée algorithmique et tentatives pédagogiques

Ayant montré les relations répétées entre l'étude de l'évolution du vivant et celle de l'adaptativité d'artefacts, les analogies entre biologie et architecture constituent un objet pédagogique incontournable pour la formation des futurs architectes. Quelques tentatives pédagogiques sont présentées rapidement ici pour illustrer le type d'expérimentation permettant le développement d'une pensée algorithmique bio-inspirée.

Initialement, quelques expérimentations plus anciennes ont proposé aux étudiants de développer une pensée algorithmique, à l'aide d'outils de conception *volontairement* analogiques, alors même que des outils numériques auraient pu être utilisés. Les étudiants devaient se concentrer sur la logique du raisonnement en cours de projétation, plutôt que sur la prise en main fastidieuse de logiciels. Dans un cours d'*Étude des formes* (bac1, 2008-2012) [49], les étudiants ont généré des variations de formes. Ils ont établi un profil initial (coupe de profil déterminée par 6 points d'accrochage), puis ils ont réalisé 20 itérations du profil (en changeant aléatoirement la position de 6 points) (*cf.* fig. 1a). Dans un cours d'*Étude et conception de formes* (bac2, 2013-2016), les étudiants ont réalisé une forme sur base de figures simples (cercles, triangles, carrés, pentagones, hexagones, octogones, etc.) dont les articulations sont créées par différents types d'emboitements simples (des plis éventuels sont autorisés tandis que l'usage de la colle avec parcimonie est permis). À partir de ces consignes très simples, ils ont proposé de nombreuses variantes (*cf.* fig. 1b) [50].

Plus récemment, dans un cours de *Moyens d'expression et représentation* (bac2, 2023-2024) [51, 52], les étudiants ont expérimenté un processus complet de conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO), en passant par une initiation au dessin architectural en 3D

dans Rhinoceros, à la conception algorithmique, paramétrique et générative dans Grasshopper et, finalement, à la découpe au laser et à l'impression en 3D. Dans un premier temps, chaque étudiant a choisi un *objet à réaction poétique* personnel, ayant une géométrie identifiable (à l'œil nu ou à l'aide d'appareils d'observation) et documentée (des documents le représentant existent). À partir de cette géométrie, chaque étudiant a généré plusieurs variations d'une forme sculpturale abritant une fonction. Dans un second temps, réunis en sous-groupes, ils ont fabriqué les variantes prometteuses (modélisation, découpage et assemblage sous la forme d'une maquette physique). L'ensemble des sculptures des différents sous-groupes a formé un *cabinet de curiosités numériques* (cf. fig. 1c).

Enfin, dans un cours de *Conceptions numériques : processus génératifs* (master1/master2, 2024-2025), les étudiants ont été mis au défi, en groupes, d'établir, par un protocole complet de recherche, un projet futuriste et auto-adaptatif, en coévolution avec un contexte versatile, une structure générative, en couplage structurel avec un milieu dynamique. Les étudiants devaient créer des projets d'architecture dont la pérennité n'était plus la résistance à l'usure dans un environnement stabilisé, mais la résilience aux aléas d'un milieu instable (changements climatiques, réorganisations sociétales, crises sanitaires, catastrophes naturelles, conflits armés, etc.). Pour cela, ils devaient : (1) identifier une loi d'évolution modélisant la croissance/multiplication d'un organisme en interaction avec son milieu, ainsi que d'un aléa capable de modifier cette interaction ; (2) déterminer un parallélisme, par analogie, entre le processus d'évolution organique identifié et la conception générative d'un projet d'architecture (dans un contexte d'implantation similaire au milieu identifié pour l'organisme) ; (3) représenter plusieurs états importants de la génération du projet (de 1 à 100 unités spatiales). Le dispositif pédagogique met en parallèle l'étude de la morphogenèse d'un organisme vivant confronté aux effets de son milieu de vie avec la projétation d'un modèle architectural en interaction avec son contexte d'implantation. L'organisme choisi est un « générateur » [53], un « objet à réaction poétique » [17] à partir duquel concevoir, par analogie, un prototype d'unité spatiale de base, mais il est également un « objectile » [54] plongé dans un processus d'évolution. Au final, les étudiants ont modélisé de manière générative un processus dynamique de coévolution entre le projet d'architecture et son contexte d'implantation, en passant de l'unité spatiale de base à un conglomérat d'environ 100 unités spatiales, capable de s'adapter (reproduction, recombinaison et réorganisation des unités spatiales), parallèlement à l'évolution des conditions environnementales. Le processus est passé par la génération de plusieurs variantes tout en maintenant la fonction du projet, mais en adaptant la forme et la structure (cf. fig. 1d).

À l'issue de ces quelques expériences pédagogiques, un retour critique était nécessaire. Comment généraliser des concepts qui pourraient être enseignés pour aider les étudiants à acquérir une pensée algorithmique bio-inspirée ? Comment dépasser la simple analogie formelle pour amorcer une conception générative globale du projet ? Comment décrire les opérations génétiques à l'œuvre en cours de projétation ?

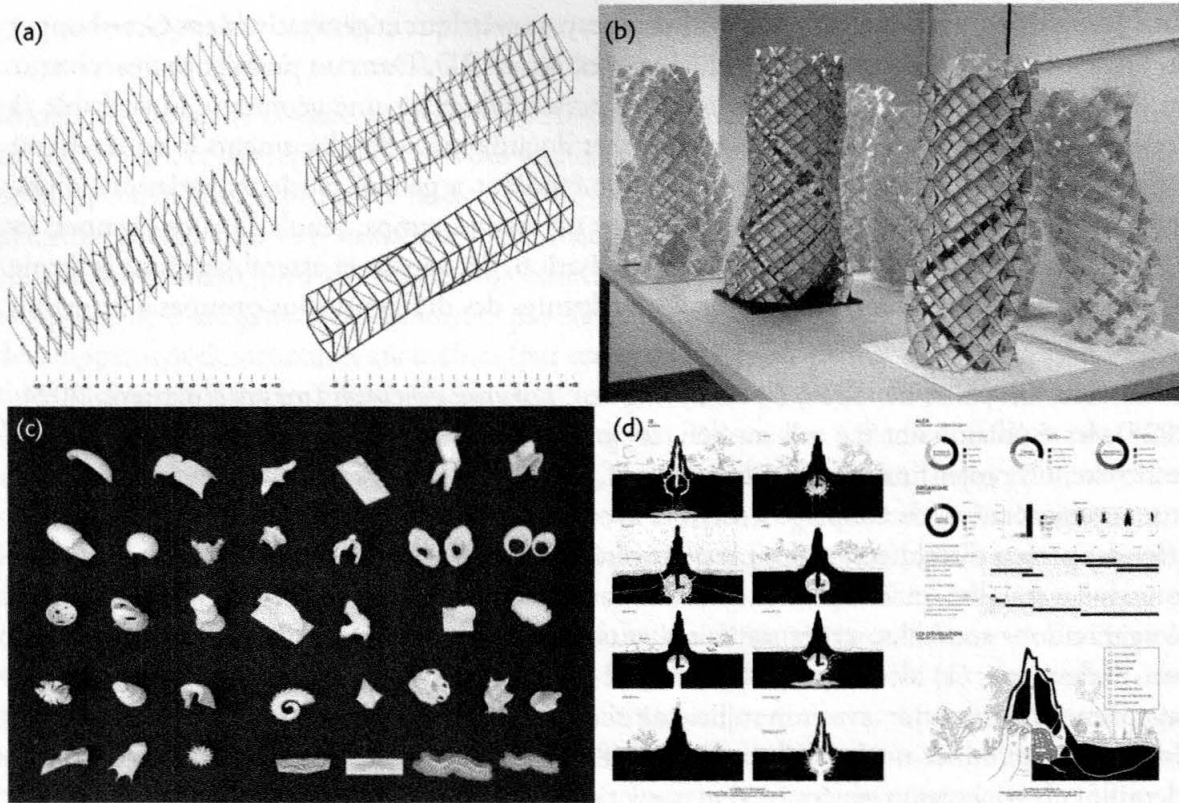


Figure 1. (a) Dessin analogique à 20 itérations en axonométrie, Étude des formes (bac1, 2008-2012). (b) Clément Faure, Variations analogiques en 3D, 2014, Étude et conception de formes (bac2, 2013- 2016). (c) Cabinet de curiosités numériques, Moyens d'expression et représentation (bac2, 2023- 2024). (d) Habonimana Dieubon & Lunelli Gianluca, La Termitière, Conceptions numériques : processus génératifs (master1/master2, 2024-2025).

5. Conception algorithmique bio-inspirée

L'activité de la projection architecturale est modélisable heuristiquement comme un processus de conception « circulaire », « itératif », « réflexif » et « conversationnel », passant alternativement par des phases de « latence », de « convergence » et de « divergence » avant d'aboutir à une « solution sous-optimale » [55-57]. Le concepteur engagé dans un processus de conception opère sur la succession d'états du *modèle mental* qu'il associe au projet en cours. La projection est donc « l'élaboration mentale d'un modèle au cours d'un processus dynamique de traitement de données, de croisement d'informations et de mobilisation de connaissances. Le processus est amorcé par un état initial (des connaissances *mal définies*), ponctué d'états intermédiaires (des variantes du modèle mental du projet) et conclu par un état final (sous la forme d'un projet producteur de *connaissance*) » [58]. Le processus est orienté en fonction d'une finalité *projective* attribuée de manière *opératoire* par le concepteur (non métaphysique et non théologique). Trois moments importants du processus sont identifiés : (1) le lancement à partir d'un « générateur » (G_0) [53] ; (2) le développement à l'aide d'*itérations* (de 0 à n) ; (3) la finalisation en atteignant un « attracteur » (A_n) [58].

D'abord, le démarrage du processus passe par la définition d'un problème associé à un espace-problème, ainsi que la définition d'un générateur intégrant une question motrice liée à un espace-problème dont le développement est susceptible d'être attiré par l'attracteur d'un espace-solution [53].

Ensuite, le problème étant mal défini, le concepteur ne *cherche* pas linéairement une solution, mais il *explore* itérativement de potentielles correspondances entre la résolution d'une question de l'espace-problème et la recherche d'alternatives plausibles dans l'espace-solution correspondant. De plus, à chaque tentative de résolution, les caractéristiques et les contraintes de la solution obtenue redéfinissent l'espace-problème [59], instaurant une véritable « *co-evolution* » entre espace-problème et espace-solution [60,61]. Établir une coévolution entre une succession de reformulation du problème étudié et une suite de propositions de solutions décrit la dynamique interne du processus.

Enfin, le projet final correspond à une solution choisie dans un domaine de solutions, dont le périmètre évolue en cours de projection, entre les tentatives de définitions des concepteurs, les médiations des outils de conception et les effets des aléas du processus. La dynamique orientant le choix de la solution sous-optimale est la minimisation de la distance entre l'« attracteur fixe sous-optimal », accessible à la cognition, et l'« attracteur flou optimal », non accessible à la cognition [58]. L'attracteur représentant, à la fois, l'aspiration du problème et de la solution.

À partir du moment où tout processus de conception correspond à l'adaptation dynamique d'une succession de variantes du modèle mental du projet en cours, une analogie émerge. Se pourrait-il que les connaissances développées pour établir des algorithmes génétiques puissent éclairer la modélisation de la conception architecturale ?

Développés dans différentes disciplines pour résoudre des problèmes d'optimisation, les algorithmes génétiques (GAs) intègrent habituellement trois parties : (1) une première génération d'individus pour lancer le processus ; (2) une boucle pour itérer différentes générations optimisées ; (3) une évaluation répétée des différentes générations pour arrêter le processus [45,62-64]. Plus particulièrement, les éléments suivants apparaissent dans tous les GAs (cf. fig. 2) : (1) l'*initialization* : définition des critères d'optimisation et d'une population initiale d'individus générée aléatoirement (génération 0) ; (2) la *fitness evaluation* : calcul de la *fitness value* des membres de la population par rapport aux critères à atteindre ; (3) la *selection* : sélection des individus de la population courante les plus adaptés (génération k , pour $i = k$) ; (4) la *generation* : génération d'une nouvelle population, ayant une meilleure *fitness value*, à l'aide de différentes opérations génétiques (génération i , pour i de 0 à n) ; (5) le *feedback* : retour vers l'évaluation de la *fitness value* pour estimer si la génération courante satisfait les critères ou s'il faut en générer une autre.

À chaque itération, les trois types d'opérations génératives utilisées pour produire une nouvelle génération sont [45] : (1) le *crossover* est la combinaison de deux parents pour produire de nouveaux individus (reproduction, croisement génétique entre deux parents) ; (2) la *mutation* est la modification aléatoire d'un ou plusieurs gènes pour introduire de la diversité génétique (recombinaison, modification génétique ponctuelle) ; (3) l'*inversion* est la réorganisation des séquences ou d'une partie du chromosome pour tester d'autres structures (réorganisation, réarrangement des gènes). Une boucle est établie entre évaluation, sélection, génération, elle forme des cycles génératifs. Le bouclage s'arrête lorsque la dernière génération produite satisfait aux critères préétablis.

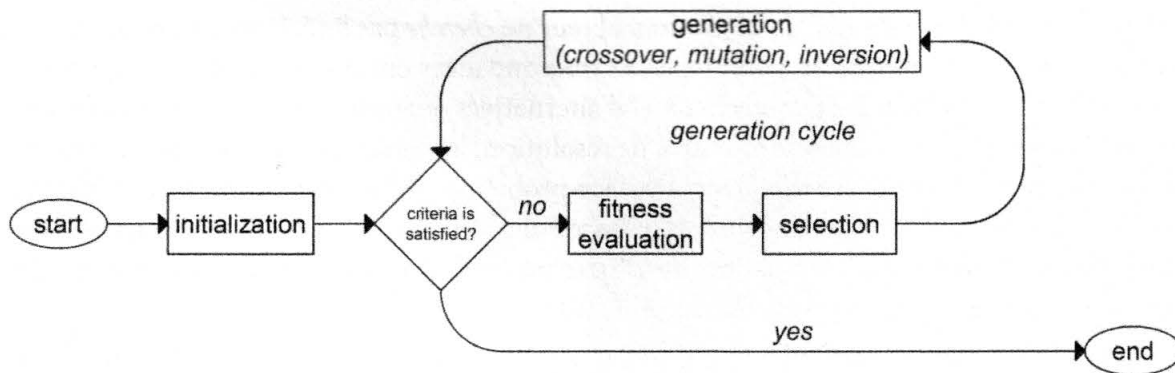


Figure 2. Schéma de principe d'un algorithme génétique (GA)

En architecture, par l'intégration d'outils numériques, des GAs sont utilisés couramment pour rechercher des solutions optimisées. Mais les optimisations concernent des parties ciblées des modèles tels que la résistance mécanique d'un élément structural, la distribution des surfaces dans un plan, la géométrie d'une façade pour maximiser un ensoleillement, etc. Ces types d'algorithmes sont rarement envisagés pour étudier l'évolution globale du modèle mental d'un projet d'architecture. L'objectif est de dépasser l'application locale des GAs, pour proposer une méthode générale de conception intégrant une pensée algorithmique inspirée des concepts et du fonctionnement des GAs.

De là, par transposition, les différents éléments apparaissant dans les GAs peuvent être associés à des moments du processus de conception du modèle mental d'un projet d'architecture : (1) l'*initialisation* du modèle au t_0 : identification d'un générateur et d'un attracteur, définition d'un espace-problème et d'un espace-solution ; (2) l'*évaluation* des variantes du modèle en cours pour déterminer si l'une d'elles est suffisamment satisfaisante pour arrêter le processus et, si non, le degré de satisfaction de chacune d'elles ; (3) la *sélection* manuelle/artificielle des variantes les plus satisfaisantes ou de celles qui ont le potentiel de produire, lors de l'itération suivante, d'autres variantes plus satisfaisantes ; (4) la *génération* de nouvelles variantes du modèle en cours pour établir de nouvelles solutions optimisées ; (5) le *feedback* : permettant de revenir à l'évaluation après chaque itération.

Transposées à la conception architecturale, les trois types de modalités d'adaptation du modèle sont : (1) le *croisement* : générer de nouvelles solutions innovantes à partir des caractéristiques héritées des solutions existantes (reproduction), de manière globale ; explorer de nouvelles variations du modèle, en combinant des caractéristiques ou des parties localement satisfaisantes de plusieurs variations courantes, pour créer de potentielles variations optimisées (améliore l'exploration de l'espace-solution, favorise fortement la diversité des solutions proposées, crée des solutions impossibles si les parties combinées sont incompatibles) ; (2) la *mutation* : générer des adaptations de solutions courantes, avec un degré de variation important, mais localisé, de manière aléatoire ; explorer de nouvelles variations aléatoires à partir d'un modèle existant (recombinaison) en réalisant des adaptations de parties locales, par essais et erreurs, capables de remettre en cause l'ensemble du modèle ; (3) l'*inversion* : exploiter une solution existante, en réorganisant sa structure interne, de manière précise, pour l'optimiser (réorganisation), tout en minimisant le degré de variation et en maintenant le concept global du modèle existant : améliorer une solution, sans en changer le contenu, les éléments du projet ne sont pas modifiés, mais réorganisés pour qu'il fonctionne mieux.

Une boucle est établie entre évaluation, sélection, génération, elle forme des cycles génératifs. Au cours des itérations, l'optimisation est plus rapide au début (exploration globale par le croisement) et plus lente vers la fin (exploration locale par mutation, puis réorganisation locale par inversion).

6. Conclusions : pour une conception algorithmique bio-inspirée

À une époque où les enjeux écologiques doivent inévitablement être pris en compte, l'objectif est de développer l'acquisition par les étudiants d'une pensée algorithmique, intégrant une modélisation bio-inspirée de la conception des modèles architecturaux. L'ambition est de proposer une modélisation heuristique de la conception architecturale et des dispositifs pédagogiques associés, capables de faire acquérir des compétences pour aboutir à l'édification d'objets coopératifs avec leur environnement. Autrement dit, contrairement à la recherche de la pérennité de l'édifice dans la résistance apparente de sa matérialité esthétisante contre un environnement extérieur, d'envisager la soutenabilité de l'édifice dans la résilience sous-jacente de la structure dynamique de sa fonctionnalité en symbiose avec le milieu. La pensée algorithmique amène le concepteur à considérer le modèle du projet en tant que système dynamique, tandis que l'inspiration biologique introduit les règles du vivant pour l'adaptation formelle et structurelle des éléments constituant le modèle, au service de la préservation de la fonction autopoïétique.

Références

- [1] Vitruve. (2015). *De l'architecture [De architectura]*. Belles Lettres, Paris.
- [2] Filarète. (1465). *Trattato Dell Architettura*. Florence.
- [3] Ackerman, J. S. (1991). *L'architecture de Michel-Ange*. Macula, Paris.
- [4] Von Linné, C. (1758). *Systema Naturae* (10^e éd.). Johann Laurentius Salvius, Leyde.
- [5] Malthus, T. R. (1798). *An Essay on the Principle of Population. A View of Its Past and Present Effects on Human Happiness*. J. Johnson, London.
- [6] Lamarck, J.-B. de M. de. (1802). *Recherches sur l'organisation des corps vivants*. Maillard, Paris.
- [7] Lyell, C. (1830). *Principles of Geology*. John Murray, London.
- [8] De Vilmorin, L. (1856). Note sur la création d'une nouvelle race de betteraves à sucre. Considérations sur l'hérédité dans les végétaux. *Comptes Rendus des séances hebdomadaires de l'Académie des Sciences*, **43**, 871–874.
- [9] Low, D. (1842). *The Breeds of the Domestic Animals of the British Islands*. Longman, Orme, Brown, Green, and Longmans, London.
- [10] Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. John Murray, London.
- [11] Haeckel, E. H. P. A. (1904). *Kunstformen Der Natur*. Olaf Breidbach, Leipzig & Wien.

- [12] Thompson, D. W. (1917). *On Growth and Form*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [13] Bateson, W. (1902). *Mendel's Principles of Heredity. A Defence. With a Translation of Mendel's Original Papers on Hybridisation*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [14] Waddington, C. H. (1940). *Organisers And Genes*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [15] Huxley, J. (1942). *Evolution. The Modern Synthesis*. George Allen & Unwin, London.
- [16] Wright, F. L. (1954). *The Natural House*. Horizon Press, New York.
- [17] Le Corbusier. (1943). *Entretien avec les étudiants des écoles d'architecture*. Denoël, Paris.
- [18] Le Corbusier. (1948). *New World of Space*. Reynal & Hitchcock, New York.
- [19] Le Corbusier. (1960/2015). *L'atelier de la recherche patiente*. Fage, Lyon.
- [20] Bernard, M.-F., & Matthu, R. (Dirs.). (1987). *Architectures Naturelles*. Institut Supérieur d'Architecture Saint-Luc de Bruxelles, Bruxelles.
- [21] Turing, A. M. (1936/1937). On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, **2**(42), 230–265.
- [22] Rosenblueth, A., Wiener, N., & Bigelow, J. (1943). Behavior, purpose and teleology. *Philosophy of Science*, **10**(1), 18–24.
- [23] Wiener, N. (1948). *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press, Cambridge.
- [24] Turing, A. M. (1952). The chemical basis of morphogenesis. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, **237**(641), 37–72.
- [25] Thom, R. (1978/1990). Le statut épistémologique de la théorie des catastrophes. In *Apologie du logos* (pp. 395–410). Hachette, Paris.
- [26] von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory*. Georges Braziller, New York.
- [27] Le Moigne, J.-L. (1977). *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*. Presses universitaires de France, Paris.
- [28] Skyttner, L. (1996). *General Systems Theory. An Introduction*. Macmillan, London.
- [29] Eldredge, N., & Gould, S. J. (1972). Punctuated equilibria: An alternative to phyletic gradualism. In T. J. M. Schopf (Ed.), *Models in Paleobiology* (pp. 82–115). Freeman, Cooper & Co., San Francisco.
- [30] Margulis, L., & Fester, R. (Eds.). (1991). *Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation. Speciation and Morphogenesis*. MIT Press, Cambridge.
- [31] Miller, J. G. (1978). *Living Systems*. McGraw-Hill, New York.
- [32] Stevens, P. S. (1974). *Patterns in Nature*. Little, Brown & Co, Boston.
- [33] Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge.
- [34] Forrester, J. W. (1968). *Principles of Systems*. Wright-Allen Press, Cambridge.
- [35] Forrester, J. W. (1969). *Urban Dynamics*. MIT Press, Cambridge.
- [36] Forrester, J. W. (1971). *World Dynamics*. Wright-Allen Press, Cambridge.
- [37] Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens III, W. W. (1972). *The Limits to Growth: A Report for The Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books, New York.
- [38] Meadows, D. H. (2023). *Pour une pensée systémique*. Rue de l'échiquier, Paris.

- [39] Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, **213**(3), 179–190.
- [40] Duvigneaud, P. (1974). *La synthèse écologique. Populations, communautés, écosystèmes, biosphère, noosphère*. Doin, Paris.
- [41] Duvigneaud, P., & Denaeyer-De Smet, S. (Dirs.). (1975). *L'écosystème urbain. Application à l'agglomération bruxelloise*. Agglomération de Bruxelles, Bruxelles.
- [42] Duvigneaud, P., & Denaeyer-De Smet, S. (1977). L'écosystème urbs. L'écosystème urbain bruxellois. In P. Duvigneaud & P. Kestemont (Eds.), *Productivité Biologique En Belgique* (pp. 608–613). Duculot, Paris/Gembloux.
- [43] von Foerster, H. (1959). On self-organizing systems and their environments. In S. Cameron & M. C. Yovit (Eds.), *Self-Organizing Systems* (pp. 31–50). Pergamon Press, London.
- [44] Gardner, M. (1970). Mathematical games. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game life. *Scientific American*, **223**(4), 120–123.
- [45] Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems. An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- [46] Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. *Scientific American*, **267**(1), 66–73.
- [47] Dürer, A. (1528). *Vier Bücher von Menschlicher Proportion*. Hieronymus Andreae, Nürnberg.
- [48] Wittkower, R. (1962). *Architectural Principles in the Age of Humanism*. Alec Tiranti, London.
- [49] Claeys, D., & Raucourt, M.-C. (2010). Étude de la forme. L'analogie formelle entre art et raison. In *Architecture UCLouvain - St-Luc Architecture - Site de Bruxelles*. Bruxelles.
- [50] Claeys, D. (2017). La conception de structures en tensegrité. *Analogies systémiques. Lieuxdits*, **12**, 22–27.
- [51] Roobaert, L., Claeys, D., Cleven, S., & Perez Perez, J. M. (2023). Grille d'évaluation en conception et fabrication assistées par ordinateur. Retour sur une double expérience pédagogique pour former des futurs architectes. *DNArchi*, **3**.
- [52] Claeys, D., Cleven, S., Perez Perez, J. M., & Roobaert, L. (2024). Parasol City. Apprentissage par projet en conception et fabrication assistées par ordinateur. *Lieuxdits*, **25**, 26–33.
- [53] Claeys, D. (2025). Processus d'idéation en conception architecturale instrumentée. Retour critique sur l'usage de l'intelligence artificielle générative. *DNArchi*, **4**.
- [54] Deleuze, G. (1988). *Le pli : Leibniz et le baroque*. Minuit, Paris.
- [55] Pask, G. (1976). *Conversation Theory: Applications in Education and Epistemology*. Elsevier, Amsterdam/New York.
- [56] Claeys, D. (2013). *Architecture et complexité : un modèle systémique du processus de (co) conception qui vise l'architecture*. Presses universitaires de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- [57] Claeys, D., & Roobaert, L. (2022). Cybernétique, interactivité et conversation : retour sur les effets des expériences de Gordon S. Pask en architecture. *SHS Web of Conferences*, **147**, 06002.
- [58] Claeys, D., Roobaert, L., & Cleven, S. (2024). Modélisation des espaces de solutions en conception architecturale. La dynamique des paysages. *SHS Web of Conferences*, **203**, 01003.

- [59] Maher, M. L., Poon, J., & Boulanger, S. (1996). Formalising design exploration as co-evolution. In J. S. Gero & F. Sudweeks (Eds.), *Advances in Formal Design Methods for CAD: Proceedings of the IFIP WG5.2 Workshop on Formal Design Methods for Computer-Aided Design* (pp. 3–30). Springer, Boston.
- [60] Dorst, K., & Cross, N. (2001). Creativity in the design process. Co-evolution of problem–solution. *Design Studies*, **22**(5), 425–437.
- [61] Yang, D., Di Stefano, D., Turrin, M., Saryildiz, S., & Sun, Y. (2020). Dynamic and interactive re-formulation of multi-objective optimization problems for conceptual architectural design exploration. *Automation in Construction*, **118**, 103251.
- [62] Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading.
- [63] Mitchell, M. (1996). *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press, Cambridge.
- [64] Kramer, O. (2017). *Genetic Algorithm Essentials*. Springer, Cham.