

Modélisation des espaces de solutions en conception architecturale. La dynamique des paysages

Modeling of solution spaces in architectural design. The dynamic of landscapes

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

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

²LOCI, UCLouvain, Rue Wafelaerts 47/51, 1060 Bruxelles, Belgique

Résumé. L'article explore la dynamique d'adaptabilité des domaines des solutions satisfaisantes au cours des processus de conception architecturale. Les spatialisations graphiques issues de trois modèles théoriques sont remises à jour (L. Bruce Archer, N. John Habraken et Ömer Akin), tandis que l'approche computationnelle est analysée en tant que méthode d'optimisation de performances et d'instanciation de solutions. Le présent essai spéculatif questionne la modélisation de la dynamique des domaines de solutions et les effets de l'usage des outils computationnels sur celle-ci. En s'appuyant sur la dynamique des systèmes, une tentative de réponse est proposée à l'aide d'une modélisation, construite à partir d'une succession de paysages analytiques.

Mots-clés. conception architecturale, espace problème, paysage analytique, dynamique des systèmes, conception paramétrique

Abstract. The paper investigates the dynamics of adaptability in the domains of satisfactory solutions during architectural design processes. The graphical spatializations derived from three theoretical models are updated (L. Bruce Archer, N. John Habraken, and Ömer Akin), while computational design is analyzed based on performance optimization and solution instantiation. This speculative essay questions the modeling of the dynamics of solutions domains and the effects of using computational tools on it. Drawing on system dynamics, an attempt at an answer is proposed using a model constructed from a succession of analytical landscapes.

Keywords. architectural design, problem space, analytic landscape, system dynamics, parametric design

* Corresponding author: damien.claeys@uclouvain.be

1 Conception architecturale et domaine de solutions

À défaut d'être linéaire, tout processus de conception architecturale est plutôt « circulaire », « itératif » et « réflexif », passant alternativement par des phases de « latence », de « convergence » et de « divergence » avant d'aboutir à une « solution sous-optimale » [1]. Le mot *processus* indique le fait d'*avancer, pas à pas, pour aboutir à quelque chose*, tandis que la *conception* dénote l'effort cognitif de *prendre ensemble par la pensée* [2]. Si bien que tout *concepteur* engagé dans un processus de conception tient compte des entrelacs de la complexité inhérente au projet d'architecture, en opérant sur la succession d'états du modèle mental qu'il lui associe. La proiettation 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 orienté en fonction d'une finalité *projective* attribuée de manière *opératoire* (non métaphysique et non théologique). Il 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*). Le projet final correspond à une solution choisie dans un domaine de solutions, dont le périmètre évolue en cours de proiettation, entre les tentatives de définitions des concepteurs, les médiations des outils de conception et les effets des aléas du processus.

Mais comment modéliser la dynamique de ce type de domaine et comment intégrer les effets sur celle-ci de l'usage d'outils computationnels ?

Dans un premier temps, pour comprendre les caractéristiques de cette dynamique, une exploration de modèles théoriques développés par plusieurs générations de chercheurs du *Design Methods Movement* (DMM) permet : (1) la remise au jour de trois représentations remarquables de domaines de solutions en conception architecturale (L. Bruce Archer, N. John Habraken, Ömer Akin) ; (2) l'analyse de l'évolution de la relation entre problème et solution dans le contexte du développement des méthodes d'optimisation des choix des concepteurs et de la généralisation de l'usage des outils computationnels.

Dans un second temps, en opérant un parallélisme succinct avec les développements de la géométrie différentielle et de la théorie des systèmes, un modèle spéculatif de la dynamique des domaines de solutions est proposé à partir de l'analogie visuelle du paysage.

2 Spatialisations de domaines de solutions

Avec l'espoir que le monde devienne *meilleur* avec plus de science, les méthodes d'aide à la décision de la recherche opérationnelle et les concepts de la cybernétique et de la théorie de l'information, créés pendant la Seconde Guerre mondiale, sont transposés, avec optimisme, à la recherche de l'optimisation des choix dans la gestion de problèmes civils. Dès les années 1950, plutôt behavioristes, les membres de la première génération du DMM utilisent ces méthodes pour étudier les processus de conception en architecture, à partir des mêmes principes que ceux de la conception en ingénierie ou en design industriel [3,4].

Dans son modèle systématique, Bruce L. Archer [5] (*cf.* fig. 1.1) affirme que les objectifs du concepteur désignent des « propriétés ». En éludant le fait qu'elles puissent changer au cours du processus de proiettation, Archer montre qu'il faut indiquer, pour chaque propriété, dans quelles directions les changements peuvent être fait pour le *mieux* et identifier un seuil entre les états inacceptables et acceptables. Ensuite, il définit graphiquement l'« aire de solution » du problème à concevoir. À l'intérieur de cette ère, une solution doit être choisie, à l'intersection du « domaine de faisabilité » (respect des contraintes du réel) et du « domaine d'acceptabilité » (respect de la logique systématique du modèle). Dans son modèle, la définition de l'espace de solutions est préalable au processus itératif de conception.

Autour de Mai 1968, le mythe du progrès scientifique s'essouffle, alors qu'une « seconde génération » de méthodologistes [6], plutôt cognitiviste et fortement inspirée par les travaux

d'Herbert A. Simon, enrichit les modèles théoriques en tenant compte : (1) de l'influence de l'expérience et de l'acquisition de connaissances dans les processus de prises de décision [7] ; (2) des effets psychologiques soulevés par les techniques de créativité [8] ; (3) des limites de la rationalité dans les prises de décision [9,10] ; (4) de l'existence de solutions « *satisficing* » [11] pour les « problèmes mal structurés » [12] et conditionnées par un *niveau de satisfaction* évolutif [9] ; (5) des « processus d'argumentation » [13] animant les dynamiques socioculturelles des acteurs pour résoudre des problèmes « malicieux » [14] ; (6) la définition d'« espace-problème » [15] en tant qu'espace de recherche construit avant de résoudre un problème, comprenant tous les états et les transitions possibles, au sein duquel le concepteur peut rechercher une solution, c'est-à-dire le chemin le plus court pour aller d'un état initial à un état final. De plus, une « troisième génération » [16], fortement influencée par les travaux de Karl R. Popper [17], attribuent au concepteur – expert possédant inévitablement des *préconceptions* – le rôle d'*induire* des « conjectures », autant de propositions que les usagers peuvent « analyser » avant, si nécessaire, de formuler des « réfutations ». Avec cette posture, le concepteur ne recherche plus une solution au sein d'un « espace-problème » [15] totalement construit au départ, mais il construit itérativement son propre espace de conception à l'aide de logiciels générateurs d'alternatives.

Dans son essai, N. John Habraken [18] donne d'abord l'exemple d'un « problème de conception simple » défini par des « contraintes explicites » : dans un espace « chambre » rectangulaire, possédant une porte et une fenêtre, un concepteur doit disposer trois objets (lit, chaise, table). À première vue, toutes les configurations spatiales possibles entre ces objets peuvent être facilement déterminées et le concepteur n'a plus qu'à choisir la *meilleure* solution. Mais il apparaît rapidement qu'« il n'est pas très utile de générer toutes les formes possibles » (par exemple, le lit ne peut pas être placé contre la porte en bloquant l'entrée de la pièce, le bureau doit être situé à côté de la fenêtre...). En bref, « l'espace des solutions est si vaste qu'il permet un grand nombre de possibilités 'stupides' et les générer toutes [...] produirait un grand nombre de formes inutiles ». En introduisant de « nouvelles contraintes », le concepteur ne génère que celles qu'il imagine être des « alternatives raisonnables » pour découvrir ce qu'il pense être « réellement possible ». À la fin, il découvre *la* solution à partir d'un « processus itératif entre les contraintes et les formes ».

Habraken déduit de cet exemple plusieurs aspects « pertinents » pour tous les processus de conception architecturale en distinguant trois parties dans un espace de solutions (cf. fig. 1.2) : (1) un espace de solutions acceptables par rapport aux règles explicites (S_a) ; (2) un espace « virtuel » de solutions acceptables par rapport aux règles explicites *et* implicites (S_v) ; (3) un espace des « formes alternatives acceptables » (S_f).

À partir de la définition de ces trois sous-ensembles du domaine de solutions, Habraken montre différentes situations théoriques dynamisant leurs relations : (1) S_v est « beaucoup plus petit » que S_a parce qu'un grand nombre de contraintes implicites, construites par conventions sociales, sont tellement évidentes qu'elles ne sont pas formulées (par exemple, personne ne placera un lit devant une porte) ; (2) les formes à l'extérieur de S_v sont implicitement écartées, mais un concepteur peut faire l'effort cognitif d'en proposer une pour rendre explicites des contraintes implicites, dans ce cas la frontière de S_a traverse l'espace S_v (par exemple, une table dépliable devient un lit) ; (3) de nouvelles contraintes sont explicitées en cours de conception (par exemple, en voyant la table au fond de la pièce, le concepteur pense qu'elle sera mieux près de la fenêtre) ; (4) l'exercice répété de la production de formes alternatives – souhaitables ou indésirables – permet au concepteur de connaître ses valeurs et ses préférences, mais également d'illuminer « la partie de l'espace de solutions partagée par tous les acteurs », pour atteindre une forme considérée comme étant provisoirement la *bonne*.

Par une « analogie visuelle », Ömer Akin [19] (cf. fig. 1.3) décrit un *domaine de solution* comme « un plateau plat avec plusieurs collines ». Le plateau représente un espace problème et chaque sommet représente « l'état final de chaque solution alternative au

problème ». Dans les « problèmes bien définis », le concepteur dispose souvent d'outils d'objectivation pour « mesurer l'altitude de chaque sommet » et « sélectionner celui qui est le plus approprié » ou la « solution optimale », mais ce n'est pas le cas pour la résolution de « problèmes mal définis » en conception architecturale.

Akin poursuit l'analogie en imaginant qu'« en raison de ressources limitées, il n'est pas possible de gravir toutes les collines et qu'il y a du brouillard sur le plateau, ce qui empêche de voir les sommets ». Alors, le concepteur est contraint d'examiner « localement » les bases de chaque colline (circonférence de la base), avant de déterminer à partir d'une recherche heuristique un « degré d'intérêt » et de décider d'« escalader l'une de ces collines ». En fonction de ses attentes (conventions, théories, styles, convictions personnelles) et des exigences du programme, il définit un « point de référence » (l'altitude souhaitée) et, « une fois son sommet atteint » (l'altitude atteinte), il l'utilise comme « critère » pour « mesurer le succès d'une colline donnée ». Si l'altitude atteinte est supérieure à l'altitude souhaitée, le sommet constitue une « solution satisfaisante ». De nombreuses solutions existent, mais toutes ne sont pas forcément les « meilleures » : le « sommet culminant » du paysage est difficile à atteindre. La « qualité » de toute solution est donc, dans une large mesure, fonction du point de référence à partir duquel le concepteur limite l'espace de solution.

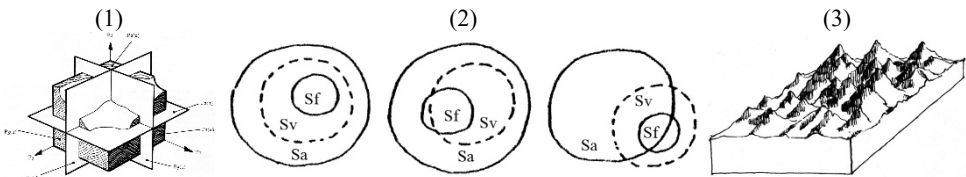


Fig. 1. (1) L. Bruce Archer, *Espace de solution*, 1969, p.83 ; (2) N. John Habraken, *L'espace solution*, 1985, p.105 ; (3) Ömer Akin, *Analogie visuelle du domaine de solutions*, 1986, p.96.

3 Modèles d'optimisation et d'instanciation de solutions

Une « quatrième génération » [20] de chercheurs adopte une conception « générative », « empathique » et « transdisciplinaire » influencée par la pensée complexe et le développement de l'intelligence artificielle. En articulant approche générative, pensée algorithmique et paramétrisation mathématique des projets, ils développent une approche « computationnelle » [21] centrée sur l'optimisation des processus de pro jet tation et modifiant la relation traditionnelle entre problème et solution.

En partant de l'hypothèse que les problèmes à résoudre sont « ill-structured » [22,12], « ill-defined » [23], ou « wicked » [14], le concepteur ne *cherche* pas linéairement une solution à des problèmes bien définis, 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 [24], instaurant une véritable « co-évolution » entre espace-problème et espace-solution [25,26] (cf. fig. 2).

Pour aider le concepteur à orienter la pro jet tation à travers la coévolution entre espace-problème et espace-solution, des méthodes et des outils numériques de modélisation sont implémentés pour optimiser les projets conçus. Ils s'inspirent du vocabulaire et de mécanismes *naturels* de la biologie, de la génétique et de la morphogenèse [27]. En effet, fondés sur des algorithmes traditionnels proposant une *recherche* analytique de solutions, les premiers logiciels d'aide à la conception (DAO, CASE) sont inefficaces, lorsque les hypothèses ou les objectifs changent en cours de processus. Alors ils sont complétés par des algorithmes évolutionnaires offrant une *exploration* stochastiques de solutions et permettant

une visualisation de leurs résultats sous la forme de paysages [28] (par exemple, des algorithmes génétiques (GAs) [29] ou des algorithmes évolutionnaires développés pour Grasshopper [30], tels que Galapagos ou Octopus).

Les algorithmes évolutionnaires introduits dans les processus de conception architecturaux fournissent aux concepteur des outils d'*optimisation de performances* (*optimization tools*) et d'*instanciation de solutions* (*generative tools*)[31].

D'un côté, des outils d'optimisation aident à concevoir des édifices *performants*, alors que le concepteur doit régulièrement *choisir* entre des alternatives contradictoires, tout en essayant d'atteindre des *objectifs conflictuels*. Issues du champ de la recherche opérationnelle (OR), les méthodes de prise de décision multicritère (MCDM) aidant les concepteurs dans trois domaines liés [32,33] : (1) la « génération de solutions par la recherche » pour identifier les solutions non dominées qui composent l'ensemble de Pareto (par exemple, des méthodes d'optimisation multicritère (MOO)) [34] ; (2) la « sélection de solutions via l'agrégation des préférences et les compromis » en intégrant les « préférences » du concepteur pour sélectionner une (ou plusieurs) solution(s) à partir de l'ensemble de Pareto (par exemple, des techniques de décision bayésiennes et floues) ; (3) la « visualisation interactive » pour intégrer le décideur dans la « boucle de raffinement et de sélection des solutions » et simuler « les impacts que les compromis intermédiaires dans un sous-espace pourraient avoir dans les autres » (par exemple, le *visual scripting* dans Grasshopper associé au modèle tridimensionnel dans Rhinoceros3D).

De l'autre, des outils d'instanciation aident à générer des variantes paramétrisées de projets en remettant en question le rapport traditionnel « forme-matière ». Lorsque les concepteurs expérimentent le concept d'« objetile » [35], ils définissent un type d'objets inscrits dans une forme de continuum, évoluant continuellement au grés des variations continues de la valeur des paramètres qui les définissent : « une modulation temporelle qui implique une mise en variation continue de la matière autant qu'un développement continu de la forme ». Dans ce cas, la pensée algorithmique génère un polymorphisme paramétrique, élargissant considérablement le répertoire classique des formes architecturales et le nombre de variantes proposées. Néanmoins, les solutions générées ne sont pas illimitées, puisque le nombre et le type d'alternatives favorisées dépendent des limites des logiciels utilisés : « Tous les logiciels de conception ont tendance à favoriser certaines solutions au détriment d'autres et, par conséquent, la plupart des objets conçus ou fabriqués numériquement peuvent facilement révéler leur lignée logicielle à des observateurs avertis. » [36]

La conception paramétrique comprend habituellement deux phases principales : (1) le processus de conception produit un *modèle* en transformation continue, associé à un domaine de solutions occupé par une *population* d'occurrences. Chaque *occurrence* est le résultat de valeurs différentes attribuées à des paramètres identiques. En bordure du domaine, la validité du modèle est testée en donnant aux paramètres des valeurs admissibles extrêmes (seuils). Ensuite, déterminé dans les *sliders*, un pas conditionne la densité de peuplement du domaine. La création de solutions inattendues par le concepteur aura inévitablement lieu *à l'intérieur* du domaine ; (2) le concepteur explore les occurrences du domaine de solutions, il développe une méthode rationnelle de choix, ce qui lui permet de sélectionner une *variété d'instances*. Chaque *instance* est un cas particulier retenu à partir du modèle paramétrique et elle est considérée comme une solution temporairement fixée. Pour choisir la solution la plus optimale dans une population de solutions sous-optimales, le concepteur *instancie* – il crée un objet à partir d'un modèle – en tant qu'*exemplaire* d'une *classe*.

De plus, le concepteur teste différentes structurations du problème, en temps réel, en modifiant le choix, le type et les valeurs des paramètres du modèle, tout en visualisant directement les solutions correspondantes. La tâche principale du concepteur n'est plus la conception directe de solutions, mais la conception d'algorithmes permettant le passage entre un espace-problème et un espace-solution.

Enfin, en associant le principe du continuum conception-fabrication mis en avant par l'« architecture associative » [37], ainsi que par les « architectures non standard » et l'idée de « l'instauration d'un champ informationnel continu et homogène » [38], les architectes articulent conception paramétrique et fabrication numérique en opérant une rencontre entre « *mass customization* » et « *design democratization* » [39]. Là où traditionnellement l'histoire avait séparé conception et édification, la conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO) décale la recherche de solutions : du projet vers le chantier.

Les modèles paramétriques ont l'avantage de définir un espace de solution précis, dans lequel l'utilisateur peut naviguer, comprenant virtuellement la totalité de toutes les variations de projet possibles. Mais la définition d'un tel espace est complexe et constitue une activité de conception à part entière dédiée à un concepteur expérimenté (*computational designer*). Dans une certaine mesure, le concepteur impose un espace-solution, tout en laissant émerger des formes inattendues, il oscille constamment entre contrôle et accompagnement du projet.

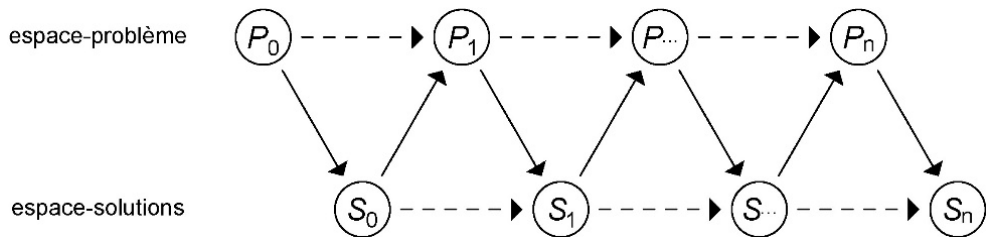


Fig. 2. Co-évolution simplifiée de l'espace-problème et de l'espace-solution, adapté d'après Maher *et al.* (1996), Dorst & Cross (2001), Yang *et al.* (2020).

4 Paysages analytiques

Depuis l'Antiquité, les mathématiciens construisent des modèles physiques pour illustrer des concepts abstraits ou pour décrire des géométries complexes. Dès la fin du XVIII^e siècle, la *géométrie descriptive* a pu « clarifier et unifier une multitude de méthodes empiriques utilisées jusqu'alors par les architectes, les charpentiers, les tailleurs de pierre et même les artistes » [40]. Ensuite, à la fin du XIX^e siècle, la *géométrie algébrique* – combinant *topologie* et *algèbre* – associe des figures géométriques avec des équations algébriques : chaque point de la géométrie figurée possède des coordonnées correspondant aux solutions de l'équation associée. Enfin, au début du XX^e siècle, la *géométrie différentielle* modélise des formes complexes en enrichissant la géométrie algébrique avec des outils issus de l'*analyse* (intégrales et dérivées de fonctions). À cette époque, Eugène Jahnke & Fritz Emde [41] publient un ouvrage reprenant des tableaux de fonctions avec formules et courbes, initialement destiné aux mathématiciens et aux ingénieurs, mais également populaire auprès des designers et des artistes. Ils illustrent chaque fonction à l'aide d'un « relief » en noir et blanc, appelé *paysage analytique*, dont la surface est dessinée manuellement, à l'aide de lignes à argument constant. Leur représentation complexe de la fonction Gamma est devenue iconique (cf. fig. 3.5), tandis que l'usage des paysages analytiques est progressivement appliqué à d'autres domaines. En effet, les principes mathématiques de la géométrie différentielle sont transposés dans d'autres disciplines, tandis que les modèles physiques de géométries complexes sont détournés par les artistes et les architectes.

Ainsi, dans les années 1930, les artistes surréalistes américain et allemand, Max Ernst et Man Ray visitent plusieurs fois la collection parisienne des six cents modèles de l'Institut Henri Poincaré et ils en font des objets d'art. D'un côté, Man Ray photographie ces maquettes abstraites et, lorsqu'il s'installe à Hollywood, il peint, à partir de ses clichés parisiens, la série suggestives des *Équations shakespeariennes* : il détourne la rationalité de modèles

mathématiques pour exprimer des figures oniriques (cf. fig. 3.1). De l'autre, Max Ernst a intégré, de manière inédite, plusieurs illustrations de Jahnke & Emde dans des collages (cf. fig. 3.2), tandis que Le Corbusier aurait possédé un exemplaire de cet ouvrage lorsqu'il a conçu le pavillon Phillips (1958) à Bruxelles.

De même, en biologie du développement, Conrad H. Waddington [42] *symbolise*, à l'aide d'un dessin poétique de John Piper (cf. fig. 3.3), la dynamique du réseau de régulation génique d'un organisme par son concept de « paysage épigénétique » [43] (cf. fig. 3.4), illustrant les différentes trajectoires possibles de différenciation d'une cellule lors de son développement : « Vue de la vallée principale en direction de la mer. En s'enfonçant dans les montagnes, la rivière traverse une vallée suspendue, puis deux vallées secondaires, sur sa rive gauche. Au loin, les flancs des vallées sont plus abrupts et ressemblent davantage à des canyons. » [42]

En dialogue avec Waddington autour de questions morphogénétiques, René Thom crée, en mathématiques, la théorie des catastrophes (TC) pour décrire topologiquement les discontinuités pouvant apparaître dans l'évolution de systèmes observables, en affirmant que « toute forme résulte d'un conflit d'attracteurs » [44]. À l'aide de géométries différentielles formant des paysages, la TC modélise une succession d'évolutions continues : des phases distinguables qualitativement et séparées par des sauts brusques. Chaque phase est modélisable par un type différentiel classique et, à chaque saut, « on passe d'un système différentiel à un autre » [45]. La TC est un « langage » qui « sert à décrire la réalité », mais « comme pour le langage usuel, rien ne va assurer la véracité ni la pertinence de sa description » [46]. Elle est fondée sur l'*analogie*, parce qu'elle spatialise les phénomènes en les décrivant géométriquement pour les objectiver [47], et elle est *qualitative*, parce qu'elle possède des vertus explicatives, mais pas prédictives [48].

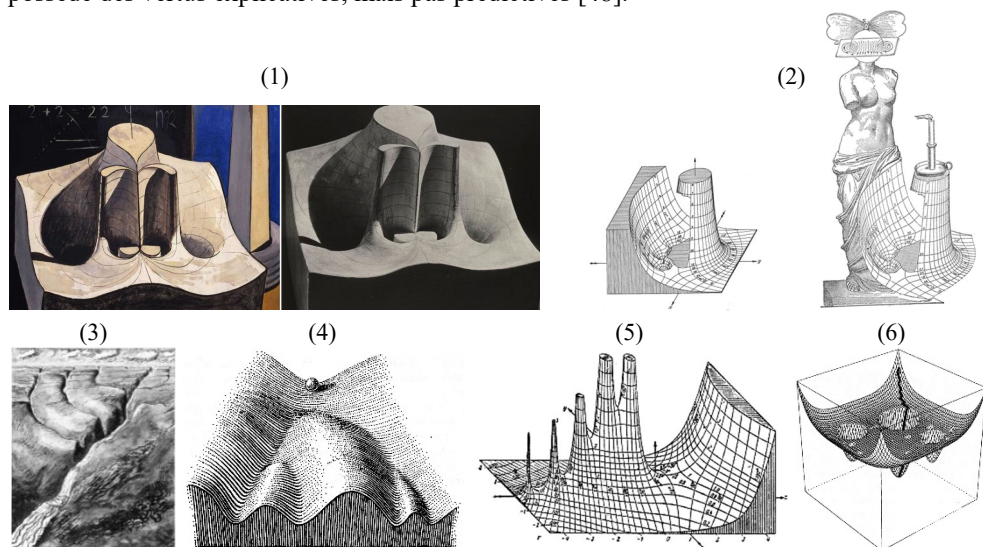


Fig. 3. (1) Man Ray, Jules César, *Équations shakespeariennes*, 1948 + Photo d'objet mathématique, 1934-1935 ; (2) Eugène Jahnke & Fritz Emde, *Fonction de Hankel*, 1909, p.133 + Max Ernst, *La Fable de la souris de Milo*, Paramythes, 1967 ; (3) Conrad H. Waddington, Paysage épigénétique (dessin de John Piper), 1947 ; (4) Conrad H. Waddington, Une balle lancée dans un paysage épigénétique, 1957, p.29 ; (5) Eugène Jahnke & Fritz Emde, *Fonction Gamma*, 1909, p.18 ; (6) Bruno Falissard, Paysage d'attracteurs – RNA, 2008, p.11.

Par ailleurs, en neurosciences, Bruno Falissard [49] modélise un « cerveau imaginaire » montrant les « configurations sans cesse différentes » d'un réseau de neurones artificiels (RNA) représenté sous la forme d'un paysage d'attracteur (cf. fig. 3.6). Il détermine un

« relief maillé » dont chaque « nœud » représente « un état possible du réseau de neurones » et où « la modification de l'état d'un neurone du réseau se traduit par un saut vers un nœud adjacent plus bas situé ». Dans ce type de paysage, la formation de vallées traduit des processus de mémorisation. Les souvenirs ne sont pas des « objets stockés dans des boîtes », mais « des états mentaux vers lesquels le sujet a spontanément tendance à dériver ». La modélisation dynamique du paysage montre que la conscience ne se contente pas de stocker les informations, mais qu'elle procède à l'élaboration de connaissances par contiguïté et association.

À l'instar du traditionnel jeu en bois de la grenouille, chacun des paysages analytiques précédents permet au modélisateur de lancer une balle virtuelle pour observer quel chemin elle empruntera et dans quel attracteur elle finira par se stabiliser. Dans tous ces exemples, le paysage analytique est utilisé, par analogie ou par métaphore, comme outils de modélisation de systèmes complexes. Pourquoi ne pas appliquer ce type de méthode pour comprendre la dynamique des domaines de solutions en conception architecturale ?

5 Dynamique du domaine de solutions

En tirant parti des acquis du DMM (Archer, Habraken, Akin) et des principes de la dynamique des systèmes, initiée par Jay W. Forrester [50] pour modéliser le comportement évolutif de phénomènes complexes, un modèle spéculatif de la dynamique de domaines de solutions est proposé, sous la forme d'une succession de paysages analytiques.

Un *système dynamique* est déterminé par : (1) un *espace des états* correspondant à l'ensemble de tous les états possibles du système considéré et modélisable par un relief maillé ; (2) des *variables d'état* exprimant l'ensemble des grandeurs suffisantes pour qualifier le système ; (3) une *loi d'évolution* liant ces variables sous la forme d'une règle (déterministe ou probabiliste), donnant un état futur du système (t_{k+1}) à partir d'un état présent (t_k) ; (4) un paramètre *temps* décrivant l'adaptation prévisible du système (discrète ou continue), d'un état à l'autre, ou d'un mode de fonctionnement à l'autre.

En tant que représentation d'un espace des états, la topologie d'un paysage de stabilité à trois dimensions est descriptible par différents éléments : (1) une *vallée* (ou *bassin d'attraction*) est une région attractive de l'espace des états dans laquelle le système tend à atteindre un état stabilisé (un état d'équilibre temporaire) ; (2) une *colline* (ou *massif de répulsion*) est une région répulsive de l'espace des états dans laquelle le système tend à quitter un état stabilisé (un état de déséquilibre temporaire) ; (3) un *attracteur* est un minimum local au fond d'une vallée ; (4) un *répulseur* est un maximum local au sommet d'une colline rendant possible un basculement d'un bassin à un autre ; (5) une *latitude* (ou *largeur de vallée/colline*) indique le rayon d'attraction/répulsion d'une vallée/colline ; (6) une *résistance* (ou *profondeur de vallée*) indique la quantité d'énergie nécessaire pour échapper à un attracteur ; (7) une *bifurcation* est un changement de comportement qualitatif du système lorsque une valeur critique est atteinte. Dans un paysage de stabilité, toute adaptation consomme de l'*énergie*. Si bien qu'en l'absence de perturbations, un système dynamique converge naturellement vers une configuration stable, en fonction du nombre, de la position, de la largeur et de la profondeur des bassins et des collines. Les attracteurs et les répulseurs peuvent être fixes, périodiques ou étranges, selon que leur apparition dans le paysage soit constante, cyclique ou très sensible aux conditions initiales.

Par analogie, un domaine de solutions peut être décrit *comme* un espace des états modélisé par un paysage de stabilité (cf. fig. 4). À chaque état d'un processus de conception architecturale et pour chaque concepteur, un état du domaine mental de solutions est représentable par un relief maillé. Ce paysage est constitué à partir d'une surface gauche recouverte d'un *maillage*, dont chaque *nœud* représente une solution potentielle du projet en cours. Chaque concepteur actualise réflexivement le modèle mental qu'il associe au projet

en fonction des états précédents et espérés [51], parallèlement à l'évolution du paysage dans lequel le modèle est comme une balle bousculée à plusieurs reprises jusqu'à rejoindre la stabilité d'une des vallées.

Le paysage dynamique possède plusieurs propriétés : (a) l'énergie cognitive du concepteur transforme constamment la topologie du paysage (redéfinition du périmètre/pas du maillage, formation de collines/vallées, ajout/suppression de nœuds...) ; (b) le périmètre et le pas du maillage varient en fonction du nombre de solutions potentielles prises en compte (données et temps disponibles, complexité du projet, motivation et fatigue...) ; (c) en passant d'un état à l'autre du processus, la hauteur des nœuds varie corollairement à leur degré d'attractivité ; (d) l'altitude 0 forme un *plan d'acceptabilité* dont la hauteur varie relativement au niveau de satisfaction ; (e) les solutions *satisficing* des vallées sont *sous* le plan d'acceptabilité ; (f) les vallées-solutions fonctionnent comme des attracteurs tentant de capter le modèle du projet, alors que les collines-solutions agissent comme des répulseurs.

Parmi les différents types de vallées constitutives du paysage, deux types d'attracteurs particuliers sont définis pour leur persistance temporaire ou constante au cours du processus : (1) l'*attracteur fixe sous-optimal* est une vallée accessible à la cognition et ayant une profondeur en moyenne plus grande que les autres vallées ; (2) l'*attracteur flou optimal* est une vallée *non* accessible à la cognition, en mouvement dans le paysage, et occupée par une hypothétique solution optimale, motrice pour le processus.

La recherche de réduction de la distance entre attracteur(s) fixe(s) et attracteur(s) flou(s) dynamise le processus de conception. En effet, la coprésence de plusieurs attracteurs imaginaires crée des zones de turbulences attirant, de plusieurs côtés à la fois, le modèle mental du projet à la recherche de stabilité. Les modifications de la topologie du paysage produisent trois types de changement de trajectoire : (1) le *rappel* : un modèle sort avant de revenir au fond d'une vallée ; (2) le *passage* : un modèle sort d'une vallée pour en rejoindre une autre ; (3) la *bifurcation* : un modèle sort d'une vallée pour en rejoindre une seconde, mais elle finit par en rejoindre une troisième en raison d'une modification inattendue de la topologie du paysage.

6 Conclusions : un paysage de solutions architecturales ?

Pour comprendre comment un concepteur adapte l'image mentale du projet sur lequel il travaille, une analogie prometteuse est proposée avec un paysage dont la topographie évolue au gré des efforts cognitifs déployés. Tout en produisant des solutions inévitablement *sous-optimales*, chaque concepteur autoévalue la pertinence de celles-ci par rapport à plusieurs attracteurs en visant une solution optimale imaginaire correspondant à sa finalité projective [52]. La modélisation d'un domaine mental de solutions sous la forme d'un paysage possède une valeur *heuristique* dont les principes sont énoncés ici.

Néanmoins, les propriétés, les types d'attracteurs et les modifications de topologies doivent encore être étudiées et testées plus finement. De plus, de nombreuses questions restent ouvertes : (1) est-il envisageable de déterminer une loi d'évolution *locale* permettant de prédire partiellement la trajectoire d'un modèle dans un paysage analytique ? (2) existe-t-il une analogie entre la structure des données dessinées par les concepteurs et la structure d'un domaine de solutions, si bien que la méthode de représentation du paysage de solutions pourrait devenir une méthode de conception ? (3) est-il possible de représenter un domaine de solutions associé à plus de deux critères et donc à plus de trois dimensions ?

À cette dernière question, une piste à développer dans de futurs travaux pourrait être d'articuler des *coupes* en 2D dans le paysage (1 critère), des paysages analytiques en 3D (2 critères) et des intersections entre n paysages (n critères), positionnés relativement à un plan d'acceptabilité commun.

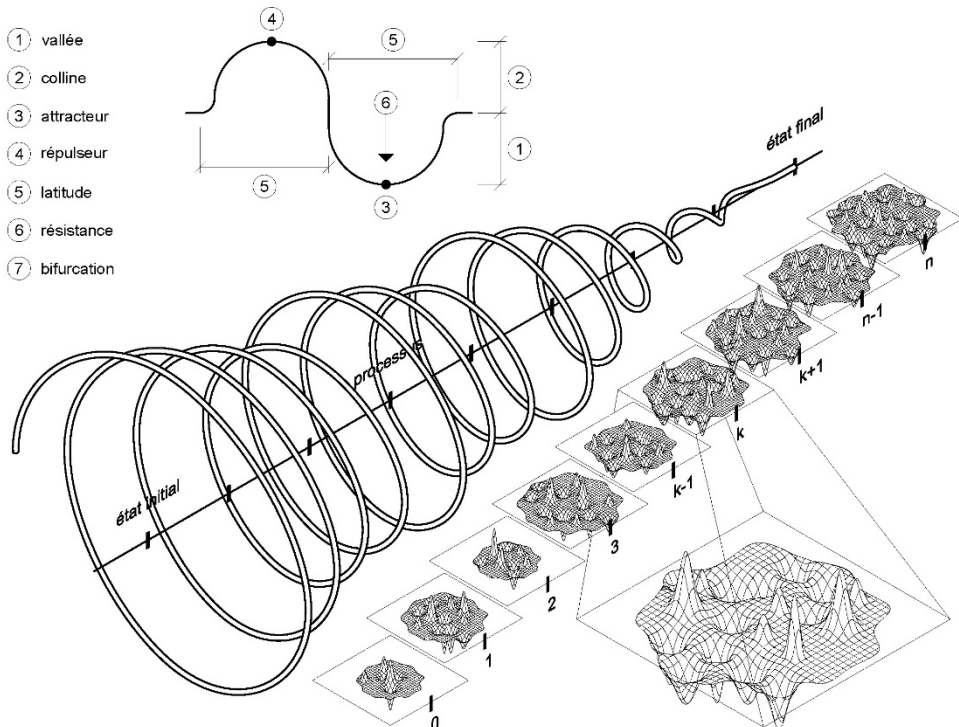


Fig. 4. Dynamique du domaine de solutions d'un processus de projection, à l'aide d'une succession de paysages analytiques avec deux attracteurs fixes de modèles mentaux.

Références

1. D. Claeys, *Architecture et complexité: un modèle systémique du processus de (co)conception qui vise l'architecture* (Presses universitaires de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2013)
2. D. Claeys, *Physiological and cognitive discontinuities. From mythical mediation to implicit discretization of architectural design tools*, *Frontiers of Architectural Research* **12**, 1 (2023)
3. N. Bayazit, *Investigating design: a review of forty years of design research*, *Design Issues* **20**, 16 (2004)
4. U. Johansson-Sköldberg, J. Woodilla, and M. Çetinkaya, *Design thinking: past, present and possible futures*, *Creativity and Innovation Management* **22**, 121 (2013)
5. L. B. Archer, *The structure of the design process* in *Design Methods in Architecture*, edited by G. H. Broadbent and A. Ward (AA papers, London, 1969), pp. 76–102
6. H. W. J. Rittel, *Second-generation design method* in *Developments in Design Methodology*, edited by N. Cross (John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1984), pp. 317–328
7. H. A. Simon, *The New Science of Management Decision* (Harper & Row, New York, NY, 1960)
8. A. F. Osborn, *Applied Imagination. Principles and Procedures of Creative Thinking* (Charles Scribner's Sons, New York, NY, 1953)
9. H. A. Simon, *Models of Man: Social and Rational; Mathematical Essays on Rational Human Behavior in Society Setting*. (Wiley, New York, NY, 1957)

10. H. A. Simon, *From substantive to procedural rationality in Method and Appraisal in Economics*, edited by S. J. Latsis (Cambridge University Press, Cambridge, 1976), pp. 129–148
11. H. A. Simon, *Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Processes in Administrative Organization* (Macmillan, New York, NY, 1947)
12. H. A. Simon, *The Structure of Ill-structured Problems in Developments in Design Methodology*, edited by N. Cross (John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1973), pp. 145–166
13. W. Kunz and H. W. J. Rittel, *Issues as Elements of Information Systems* (Institute for Urban & Regional Development, University of California, Berkeley, CA, 1970)
14. H. W. J. Rittel and M. M. Webber, *Planning Problems are Wicked Problems in Developments in Design Methodology*, edited by N. Cross (John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1973), pp. 135–144
15. A. Newell and H. A. Simon, *Human Problem Solving* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1972)
16. G. H. Broadbent, *The developments of design methods*, *Design Methods and Theories* **13**, 41 (1979)
17. K. R. Popper, *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge* (Routledge & K. Paul, London ; New York, 1963)
18. N. J. Habraken, *The Appearance of the Form: Four Essays on the Position Designing Takes between People and Things* (Awater Press, Cambridge, MA, 1985)
19. Ö. Akin, *Psychology of Architectural Design* (Pion, London, UK, 1986)
20. P. H. Jones, *Systemic design principles for complex social systems in Social Systems and Design*, edited by G. S. Metcalf (Springer Japan, Tokyo, 2014), pp. 91–128
21. I. Caetano, L. Santos, and A. Leitão, *Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design*, *Frontiers of Architectural Research* **9**, 287 (2020)
22. H. A. Simon and A. Newell, *Heuristic Problem Solving: The Next Advance in Operations Research*, *Operations Research* **6**, 1 (1958)
23. W. R. Reitman, *Heuristic Decision Procedures: Open Constraints and the Structure of Ill-defined Problems in Human Judgments and Optimality*, edited by M. W. Shelley and G. L. Bryan (John Wiley & Sons, New York, NY, 1964), pp. 282–315
24. M. L. Maher, J. Poon, and S. Boulanger, *Formalising Design Exploration as Co-Evolution in Advances in Formal Design Methods for CAD: Proceedings of the IFIP WG5.2 Workshop on Formal Design Methods for Computer-Aided Design, June 1995*, edited by J. S. Gero and F. Sudweeks (Springer US, Boston, MA, 1996), pp. 3–30
25. K. Dorst and N. Cross, *Creativity in the design process: co-evolution of problem–solution*, *Design Studies* **22**, 425 (2001)
26. D. Yang, D. Di Stefano, M. Turrin, S. Sariyildiz, and Y. Sun, *Dynamic and interactive re-formulation of multi-objective optimization problems for conceptual architectural design exploration*, *Automation in Construction* **118**, 103251 (2020)
27. J. H. Frazer, *An Evolutionary Architecture* (Architectural Association, London, 1995)
28. D. Rutten, *Navigating multi-dimensional landscapes in foggy weather as an analogy for generic problem solving in* (Innsbruck, Austria, 2014)
29. J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence* (University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975), pp. viii, 183

30. S. Z. Mirjalili, S. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, and I. Aljarah, *Grasshopper optimization algorithm for multi-objective optimization problems*, Applied Intelligence **48**, 805 (2018)
31. E. Fasoulaki, *Genetic algorithms in architecture: a necessity or a trend?* in (2007)
32. J. Horn, *Multicriterion decision making in Handbook of Evolutionary Computation*, edited by T. Baeck, D. B. Fogel, and Z. Michalewicz (CRC Press, Boca Raton, FL, 1997)
33. P. P. Bonissone, R. Subbu, and J. Lizzi, *Multicriteria decision making (mcdm): a framework for research and applications*, IEEE Computational Intelligence Magazine **4**, 48 (2009)
34. D. F. Jones and H. O. Florentino, *Multi-Objective Optimization: Methods and Applications in The Palgrave Handbook of Operations Research*, edited by S. Salhi and J. Boylan (Springer International Publishing, Cham, 2022), pp. 181–207
35. G. Deleuze, *Le Pli : Leibniz et Le Baroque* (Minuit, Paris, 1988)
36. M. Carpo, *The Alphabet and the Algorithm* (MIT Press, Cambridge, MA, 2011)
37. B. Cache and P. Beaucé, *Vers une architecture associative in Architectures Non Standard*, edited by F. Migayrou (Centre Pompidou, Paris, 2003), pp. 138–139
38. F. Migayrou, editor, *Architectures Non Standard* (Centre Pompidou, Paris, 2003)
39. B. Kolarevic and J. P. Duarte, editors, *Mass Customization and Design Democratization* (Routledge, London, 2018)
40. Collectif, *Objets Mathématiques* (CNRS Éditions, Paris, 2017)
41. E. Jahnke and F. Emde, *Funktionentafeln Mit Formeln Und Kurven* (B. G. Teubner, Leipzig, 1909)
42. C. H. Waddington, *Organisers And Genes* (Cambridge University Press, Cambridge, MA, 1947)
43. C. H. Waddington, *The Strategy Of The Genes. A Discussion of Some Aspects of Theoretical Biology* (George Allen & Unwin, London, 1957)
44. I. Ekeland, *La théorie des catastrophes*, La Recherche **81**, 745 (1977)
45. R. Thom, G. Giorello, and S. Morini, *La théorie des catastrophes in Paraboles et catastrophes: entretiens sur les mathématiques, la science et la philosophie* (Flammarion, Paris, 1983), pp. 59–114
46. R. Thom, *Le statut épistémologique de la théorie des catastrophes (1978) in Apologie du logos* (Hachette, Paris, 1990), pp. 395–410
47. R. Thom, *La boîte de Pandore des concepts flous (1984) in Apologie du logos* (Hachette, Paris, 1990), pp. 585–598
48. R. Thom and É. Noël, *Prédire n'est pas expliquer: entretiens avec Émile Noël* (Flammarion, Paris, 1993)
49. B. Falissard, *Cerveau et psychanalyse: tentative de réconciliation* (l'Harmattan, Paris, 2008)
50. J. W. Forrester, *Principles of Systems* (Wright-Allen Press, Cambridge, MA, 1968)
51. D. Claeys, *De l'interprétation créative du réel au processus bayésien de conception architecturale*, Acta Europeana Systemica **7**, 65 (2017)
52. D. Claeys, *Excellence-assessment limits in architectural design: a gap between two fixed solutions attractors in Systemic Technologies for Business Excellence*, edited by N. S. Assimakopoulos, R. Rodriguez-Ulloa and A. Kriemadis (Inderscience, Genève, 2024)