

L'Eco-Conception Générative : Une illustration de la pensée complexe.

**Marin Philippe¹, Marsault Xavier¹, Saleri Renato¹,
Gilles Duchanois², Bignon Jean-Claude²**

¹Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon

²Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

RÉSUMÉ. Nous présentons ici deux outils d'assistance à la conception architecturale créative. Ils s'appuient sur des logiques évolutionnaires et intègrent des algorithmes génétiques guidés par les qualités environnementales des analogues. Les dispositifs convoquent les notions de complexité à travers la mise en œuvre de processus computationnels tout en cherchant à stimuler une approche créative de la conception. Si notre première hypothèse autorise au concepteur une liberté de définition de son modèle paramétrique, la seconde hypothèse quant à elle autorise une interaction avec le moteur évolutionnaire.

MOTS-CLÉS : algorithme génétique interactif, éco-conception, conception créative, interprétation inventrice, éco-patron évolutionnaire.

Introduction

La thématique générale de nos travaux porte sur les capacités des dispositifs numériques génératifs à stimuler une conception architecturale créative dans le contexte du développement durable. Ces travaux s'inscrivent dans un projet soutenu par le programme ANR « La création : acteurs, objets, contextes ». Nous questionnons particulièrement les phases de recherche conceptuelle en architecture. Nous cherchons à caractériser les mécanismes de la créativité dans une situation d'assistance générative, à travers laquelle l'outil numérique révèle une part d'autonomie et intègre des contraintes environnementales.

Nous précisons, dans un premier temps, en quoi les approches évolutionnaires relèvent de la complexité. Nous nous attacherons ensuite au

processus de conception architectural et nous retiendrons particulièrement la notion d'interprétation inventrice comme mécanique susceptible de stimuler une approche créative et innovante. Dans une dernière partie, nous présenterons en détail le fonctionnement de l'outil Ec-Co-Gen en tant que dispositif illustrant la convocation de la pensée complexe.

Processus évolutifs et approches computationnelles.

Le projet Ec-Co-Gen cherche à caractériser les mécanismes de la créativité convoqués lors d'une instrumentation générative de la conception. Plus particulièrement, nous mettons en œuvre un algorithme génétique guidé par les performances environnementales des analogons. Les premiers travaux en matière de conception évolutive datent des années 70 et ont été conduits par John Holland (Bentley, 1999). Des mécanismes de croisement et de mutation permettent à une population d'individus d'évoluer en s'adaptant aux contraintes de leur environnement. Ces contraintes se traduisent dans l'algorithme par des fonctions d'évaluation, donnant une mesure de la performance de chaque individu.

La pression de l'environnement sur les individus peut s'inscrire dans une approche multi-objectifs où les contraintes imposent des modalités d'adaptation contradictoires. Le système, représenté par l'interaction des individus dans la population et au fil des générations, trouve naturellement un état d'équilibre et conduit à une optimisation. Une part d'aléatoire, un « hasard organisateur » ou une « complexité par le bruit », (Atlan, 1986) vient assurer une diversité et une exploration élargie de l'espace des solutions. Le phénomène d'auto-organisation et d'émergence s'appuie sur un processus itératif nourri par l'interaction et l'évaluation successives d'un grand nombre d'individus. Il n'en reste pas moins que de nombreuses difficultés restent présentes, notamment sur les questions de codages des connaissances subjectives.

La conception architecturale créative.

Le caractère réflexif de l'apprentissage et le dialogue permanent entre le concepteur et lui-même instaurent un principe de visualisation-génération et permettent ainsi au concepteur de formaliser des représentations externes en même temps que de raisonner. Les séquences d'activités

qui composent le cycle de la conception sont la perception, la représentation mentale et l'expression de l'idée. Gänshirt (Ganshirt, 2007) propose une représentation du cycle de la conception en mettant en avant les interactions continues entre la pensée, la perception et l'expression, médiatisées par des outils. Cette instrumentation sert l'expression de la pensée et permet en retour la perception des choses et ainsi la prolongation de la pensée. Cette résolution ne se limite pas à la simple maîtrise d'une connaissance et d'une technique, mais passe par l'exploration, l'assemblage d'idées et l'utilisation de connaissances alternatives (extérieures aux domaines du problème). Nous considérerons donc la conception comme un mécanisme qui dépasse la résolution d'un problème, la formulation d'objectifs, de règles et de hiérarchies pour intégrer les notions d'imagination, de créativité et de hasard. Le processus de conception est alors caractéristique d'un parcours indéterminé et incertain dans un espace de solutions en continuelle formulation, un espace infini et construit en même temps que sa permanente exploration.

Les activités cognitives associées à la créativité.

L'intuition prend une place importante dans un processus créatif. Selon Candy et Edmonds (2002) les activités créatives font appel à une combinaison de rationalité, d'intuition et de créativité. Trois activités primordiales composent un processus créatif (Nagai, Candy, & Edmonds, 2003) : l'exploration, la génération et l'évaluation. L'approche multivariée de la créativité (Lubart, Mouchiroud, Tordjam, & Zenasni, 2003) précise ce dernier modèle et propose quatre familles de composantes dont résulterait la créativité : les facteurs cognitifs (intelligence et connaissance), conatifs (style, personnalité, motivation), émotionnels et environnementaux. En psychologie ergonomique, Bonnardel (2009) définit les grandes étapes cognitives liées à la créativité, qui sont (i) la (re)formulation du problème, (ii) la recherche de solutions dites créatives, par exemple en procédant par analogie, métaphore ou comparaison sélective, voire en regroupant des informations (combinaison sélective) ou en générant plusieurs possibilités (pensée divergente), et (iii) l'évaluation de ces solutions.

Les caractéristiques d'une interprétation inventrice.

Ce parcours fait de micro *sauts* entre différents niveaux de réalité caractérise le mécanisme de l'invention et de l'interprétation. L'importance du regard interprétatif est soulignée par Estevez et Tiné (Estevez & Tiné, 2008) qui insistent sur une interprétation active, une « perception interprétative » capable de déboucher sur l'identification de valeurs opératoires en matière de conception. L'objet perçu est alors transfiguré par l'identification d'un surplus de signification. Pour les auteurs, c'est une double activité de dénomination et de déplacement de l'objet de son contexte habituel, qui permet d'orienter la perception. De plus l'acte de répétition participerait à une mise en relief de la différence, la nouveauté étant considérée comme une singularité remarquable. Dans ce sens, le phénomène nouveau résulte principalement « d'une attention toute particulière portée aux événements que la répétition permet de multiplier » (Estevez, 2008).

Citton (Citton, 2010) marque la distinction entre l'information et la connaissance, la première entendue comme un flux de message, la seconde impliquant une activité cognitive basée sur un savoir. Deux types de connaissance peuvent alors se détacher, une *connaissance codifiée*, objectivable et convertie en message qui peut devenir information, et des connaissances tacites. L'interprétation implique « un degré de distance » critique par rapport au contenu, elle relèverait d'un certain réagencement des choses dans un effort de compréhension globale visant à rendre significatifs des éléments disparates. Une interprétation inventrice se fonde ainsi sur une posture, une intuition, une subjectivité, sur l'individualité du concepteur.

Etude de cas : Ec-Co-Gen.

Nous avons vu que la thématique générale de nos travaux porte sur les capacités des dispositifs numériques génératifs à stimuler une conception architecturale créative dans le contexte du développement durable. L'outil doit assister l'architecte dans sa démarche de conception, lui permettre l'identification de solutions éco-performantes dans un contexte spécifié, en termes climatique, urbain et programmatique, sans brider sa créativité et en autorisant l'émergence de solutions originales et inatten-

dues. Ainsi l'outil doit faciliter l'accès à un niveau de compréhension rationnel, la connaissance objectivable en termes d'évaluation des performances, tout en autorisant une interprétation subjective et des choix individuels fondés sur les connaissances tacites de chacun.

Nous avons développé deux outils distincts. Chacun d'eux relève d'une logique de conception différente mais s'appuie sur des mécanismes évolutionnaires et des évaluations environnementales.

Ec-Co-Gen-N

Ec-Co-Gen-N rassemble un ensemble de fonctions intégrées à l'outil Grasshopper® de Rhinoceros®. Ces fonctions prennent la forme d'une bibliothèque d'objets et de fonctions paramétriques, appelés *clusters*. Quatre familles de *clusters* sont disponibles :

- Les *clusters* génériques, permettant l'initialisation du modèle, sa visualisation, la génération d'un volume capable, la création des patios et des masques.
- Les *clusters* de transformation, permettant des opérations de déformation par déplacement, rotation, homothétie du bâtiment ou des étages de manière linéaire ou quadratique.
- Des *éco-clusters*, permettant la construction d'éco-patrons paramétriques.
- Les *clusters* d'évaluation, assurant la saisie des données matérielles et météorologiques, la mise au format des données et la communication avec le moteur d'évaluation, le stockage des données dans une base de données Mysql.

Le concepteur évolue dans un environnement de modélisation paramétrique, il peut utiliser l'ensemble des fonctions logicielles disponibles et bénéficie d'un accès aux *clusters* spécifiques. Le concepteur construit le modèle paramétrique de son hypothèse de conception, modèle qui pourra être soumis à évolution et optimisation génétiques.

La stratégie environnementale mise en œuvre s'appuie sur la notion d'*éco-patron*. Ces *éco-patrons* correspondent à la description d'un modèle concret en réponse à un problème récurrent, il représente une *forme-solution concrète*, dont le concepteur a la capacité d'analyse, d'identification et d'interprétation. Les patrons entretiennent des relations les uns avec et les autres pour former un langage de conception. Cinq *éco-patrons* caractéristiques ont été identifiés : la compacité, l'orientation des façades au soleil, le patio, l'encorbellement, les balcons. Si les deux

premiers sont convoqués à travers l'évaluation de l'analogon, les trois suivants ont fait l'objet d'une paramétrisation qui se traduit par trois *éclusters* spécifiques.

Les paramètres d'entrée de chacun des *clusters* peuvent être associés à des intervalles de valeurs. Le concepteur est libre de spécifier les limites et incrément de ces intervalles. La modification de la valeur des paramètres entraîne la transformation du modèle géométrique. Ces intervalles peuvent représenter les gènes descriptives de l'analogon. Le concepteur est ainsi libre de construire le génome associé à son modèle paramétrique.

L'algorithme génétique Galapagos utilisé ici est intégré à l'environnement logiciel Grasshopper®. Les intervalles de valeurs deviennent les paramètres descriptifs du génome, le mécanisme évolutionnaire opère alors une exploration de l'espace des solutions à travers la modification des valeurs d'entrée. Les mécanismes reproductifs opèrent par croisement des valeurs de deux individus, les mécanismes de mutation par assignation aléatoire d'une valeur.

Le *cluster* d'évaluation assure la mise au format des données descriptive de l'analogon, la véracité des données géométriques, la communication des données au moteur d'évaluation énergétique EnergyPlus et le stockage des informations dans une base de données. Les paramètres d'entrée pris en compte par le moteur d'évaluation énergétique sont la surface de l'enveloppe opaque ou semi-transparente, la qualification des matériaux de ces surfaces, le nombre d'étages et la surface de plancher. Les fichiers météo décrivant les apports solaires sont fournis. Un bilan thermique est calculé avec un pas paramétrable sur une durée allant d'une journée à une année. Les valeurs du génome et l'évaluation énergétique de chaque individu sont stockées dans une base Mysql.

À l'issue du processus, le concepteur peut prendre connaissance des solutions les plus performantes visualisées sur un écran de sortie spécifique. Il peut alors modifier la constitution du génome ou la construction du modèle paramétrique pour relancer le processus évolutionnaire ou exporter la géométrie de l'analogon sélectionné et poursuivre son travail de conception.

Ec-Co-Gen-L

Si, dans notre première hypothèse, le concepteur a la liberté de construire le modèle paramétrique de son choix, dans cette seconde hypothèse sa marge de manœuvre est plus limitée. Ici le modèle paramétrique des

analogons est déterminé, le concepteur concentre son activité sur son interaction avec la boucle évolutionnaire. La spécificité de cette solution repose sur l'intégration d'un algorithme génétique interactif.

Le modèle morphologique retenu est fondé sur un principe d'agglomération d'unités élémentaires, appelé « voxel » (VOlumatic piXEL), dont la géométrie est pour le moment ramenée à un parallélépipède de taille fixe. Ces « voxels » prennent place dans un espace matriciel à trois dimensions et représentent des unités spatiales. Les faces du voxel peuvent avoir une matérialité, une opacité, recevoir l'énergie solaire et contribuer aux échanges thermiques. Les données d'entrée sont constituées de la description géométrique de la parcelle, de l'environnement urbain et de leur géolocalisation. Un objectif de surface construite est également défini.

Le moteur d'évaluation combine trois fonctions d'évaluation : la compacité du bâtiment, l'évaluation des ombres portées sur l'environnement bâti et l'évaluation des performances thermiques de l'analogon. L'évaluation des ombres portées sur l'environnement bâti est calculée par un lancer de rayons sur une matrice de points disposés sur les façades du contexte urbain, 6 positions solaires caractéristiques sont déterminées. L'ombrage du contexte doit être minimisé. Le calcul du bilan thermique est basé sur le modèle simplifié des Degrés-Jour Unifiés. Celui-ci permet une approximation du bilan thermique de l'enveloppe du bâtiment avec la prise en compte des apports solaires sur les surfaces vitrées en fonction de la géolocalisation du projet et des déperditions par transmission en fonction de la résistance thermique de l'enveloppe dont le coefficient est fixé. L'écart de la surface habitable disponible, par rapport à la surface objectif, précisée à l'initialisation du processus, doit être minimisé.

L'algorithme Génétique Interactif

Une des spécificités du projet repose sur l'intégration d'un algorithme génétique interactif. Celui-ci permet au concepteur d'interagir avec la boucle évolutionnaire, d'orienter et guider l'évolution en fonction de sa propre interprétation. Si une des limites des algorithmes génétiques repose sur l'absence d'évaluation des qualités esthétiques des individus, l'intégration d'une évaluation humaine dans la boucle permet de ré-introduire une connaissance tacite dans les contraintes de sélection. Cette interaction rencontre cependant un certain nombre de limites : lenteur du processus associé au temps de prise de connaissance, limite de la taille de

la population, nécessaire simplification de l'évaluation pour conserver une interaction en temps réel, lassitude du concepteur face à un grand nombre de générations. Notre proposition intègre une double modalité d'évolution génétique. Un processus de génération et de sélection automatique, qui peut rester autonome ou être interrompu par une interaction humaine. Le concepteur a alors à tous moments la possibilité de privilégier certains individus et d'orienter l'évolution dans une direction choisie.

La description génotypique de l'individu est réalisée à l'aide d'une « classe gène » qui stocke l'index et l'état de chaque voxel de l'espace matriciel. L'état du voxel peut être actif, interdit ou associé à une fonction particulière du programme architectural. L'individu est alors décrit par une « classe chromosome », qui rassemble le « tableau des gènes » et le « tableau des fitness ». À partir de cette description, le moteur d'évaluation construit un modèle géométrique 3D et réalise les évaluations. Trois populations évolutives distinctes sont conservées pendant la durée du processus : la population courante, la population totale et la population du Front de Pareto. Le front de Pareto est estimé en utilisant une fitness unique combinant aléatoirement n objectifs indépendants. (Jaszkiewicz, 2002).

L'interface homme-machine

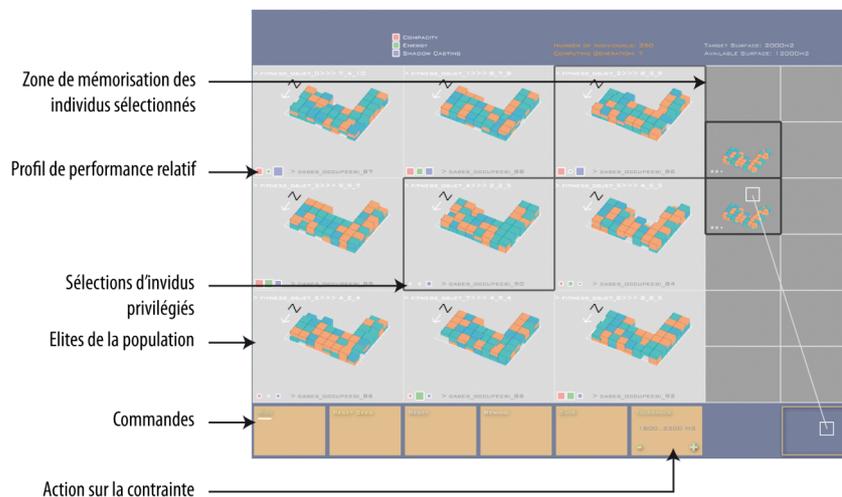


Figure 1. Interface Homme Machine.

L'interface homme-machine est constituée de deux écrans distincts, l'un permettant la visualisation d'une population d'élites, l'autre opérant un zoom sur l'analogon sélectionné. La fenêtre principale est divisée en trois zones principales (Figure 1) : présentation des élites de la population en cours, zone de mémorisation des individus sélectionnés, zone d'interaction avec les paramètres de l'algorithme et les critères de performance. La fenêtre de zoom offre une vue manipulable en trois dimensions avec rappel du profil de performance (Figure 2).

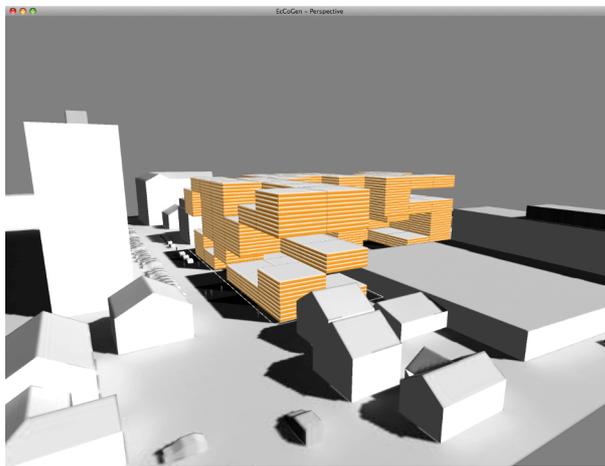


Figure 2. Fenêtre de zoom sur l'analogon

Pour chaque individu, deux niveaux d'information sont proposés. L'un constitué de la représentation géométrique 3D de l'analogon, représentation qui peut être manipulée par rotation et qui est support à une interprétation subjective. L'autre constitué par le double profil de performance de l'individu (relatif et absolu), qui représente une connaissance objectivée et comparative de chacun des individus de la population. Le concepteur a la possibilité, à tout moment, de sélectionner un ou plusieurs analogons dans la population des élites ou dans la zone de mémorisation pour orienter l'évolution dans des directions induites à la fois par leurs caractéristiques génétiques et par la persistance temporelle de choix similaires. Il peut également mémoriser plusieurs individus qu'il souhaite conserver et qui pourront le cas échéant être sélectionnés à nouveau pour ré-orienter l'optimisation.

Originalités de la solution

Cette hypothèse révèle une double originalité. D'une part au niveau de l'interface homme machine, celle-ci propose l'affichage d'une population d'élites privilégiées, mais un capital génétique est conservé et mémorisé dans des populations d'individus plus larges. Un fonctionnement multi générationnels entre chaque itération et chaque interaction humaine est intégré, celui-ci permet d'accélérer le processus de convergence et de diminuer la lassitude de l'utilisateur. D'autre part, au niveau de l'algorithme génétique, un mécanisme de rémanence du choix de l'utilisateur est intégré et permet de prendre en compte à la fois une évaluation objective et subjective. Le réglage de l'algorithme pour fournir des solutions diversifiées tout en prenant en compte les choix et sélections du concepteur est solutionné par l'utilisation de la technique de réglage adaptatif des taux de croisement et mutation (Mc Ginley, Maher, O'Riordan, & Morgan, 2011).

Conclusion

L'activité du concepteur est radicalement différente dans chacune des hypothèses présentées. Si dans la première solution, le concepteur est libre de construire le modèle paramétrique évolutionnaire de son choix puis de le soumettre à une optimisation évolutionnaire, dans la seconde solution, le modèle morphologique est fixé et l'activité du concepteur est focalisée sur l'interaction avec la boucle évolutionnaire. Dans cette dernière hypothèse l'activité d'interprétation inventrice, la fonction spéculative du regard prend une place centrale.

La prochaine étape du projet portera sur une phase d'expérimentation utilisateurs. Nous chercherons à valider le fonctionnement des outils et à mesurer leurs capacités à soutenir une démarche créative. C'est moins une approche comparative des deux solutions qui nous semble importante que la mesure de l'activité créative dans chacune des hypothèses.

Contributions

Les personnes impliquées dans le programme sont nombreuses, nous rappelons notamment Florent Torres pour le développement du moteur d'évaluation Ec-

Co-Gen-L, Mathieu Lamour pour Ec-Co-Gen-N, Nicolas Gregori et Lara Schmitt pour les phases d'expérimentation utilisateurs.

Bibliographie

- Atlan, H. (1986). *Entre le cristal et la fumée*. Seuil.
- Bentley, P. J. (1999). *Evolutionary Design by Computers [With Cd Rom]*. Morgan Kaufmann.
- Citton, Y. (2010). *L'avenir des humanités : Economie de la connaissance ou cultures de l'interprétation ?* Editions La Découverte.
- (Eds.). (2002). *Creativity, art practice and knowledge*. (Vol. Creativity and interface). New York, NY, USA: ACM.
- Estevez, D. (2008). *Dialogue entre maquettes et modèles en architecture*. Proceedings from 11ème rencontre organisée par la Société Française de Physique et la BNF, Paris.
- Estevez, D., & Tiné, G. (2008). Le lièvre et la tortue, une autre course de la conception en architecture. In *Cahiers thématiques, N° 7 : Contemporanéité et temporalités*. Jean-Michel Place.
- Ganshirt, C. (2007). *Tools for Ideas: Introduction to Architectural Design*. Birkhauser Verlag AG.
- Jaszkiewicz, A. (2002). Genetic local search for multiple objective combinatorial optimization. *European Journal of Operational Research*.
- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjam, S., & Zenasni, F. (2003). *Psychologie de la créativité*. Armand Colin.
- Mc Ginley, B., Maher, J., O'Riordan, C., & Morgan, F. (2011). Maintaining Healthy Population Diversity using Adaptive Crossover, Mutation and Selection (ACROMUSE). *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Volume: 15 Issue:5*, 692 - 714.
- Nagai, Y., Candy, L., & Edmonds, E. (2003). *Representations of Design Thinking - A review of Recent Studies*. Proceedings from Journal of the Asian Design International Conference.