

Maquette virtuelle cognitive. Entre espace de représentation et espace de conception

Cognitive virtual model. Between representation space and design space

Nour Elhouda Ghribi^{1,3,*}, Beya Dhouib^{1,3}, Mounir Dhouib^{1,3}, et Damien Claeys^{1,2}

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

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

³GADEV, ENAU, UCAR, Rue El Qods Sidi Bou Said, 2026 Tunis, Tunisie

Résumé. L'expansion du numérique a provoqué la mutation du mode de représentation traditionnel de l'architecture vers la maquette virtuelle. D'un côté, l'aptitude du modèle architecturologique de Boudon à intégrer les nouvelles technologies est questionnée. Si la maquette virtuelle sert d'interface entre le matériel et l'immatériel, reste-elle un simple outil de représentation ? De l'autre, l'architecturologie systémique de Dhouib propose le concept de maquette virtuelle cognitive qui intègre les processus génératifs de la forme. L'intelligence naturelle associée à l'intelligence artificielle, dans son sens le plus large relatif aux artefacts, élève-t-elle la maquette virtuelle vers un niveau cognitif d'abstraction ? Cet article propose une étude épistémologique visant à situer la maquette virtuelle par rapport à ces deux postures architecturologiques.

Mots clés. architecturologie, systémique, espace de représentation, espace de conception, maquette, virtuel, cognition

Abstract. The expansion of digital technology is shifting the traditional representation of architecture towards the virtual model. On the one hand, the ability of Boudon's architecturological model to integrate new technologies is being questioned. If the virtual model serves as an interface between the material and the immaterial, does it remain a simple tool of representation? On the other hand, the concept of the cognitive virtual model, which integrates the generative processes of form, stems from Dhouib's systemic architecturology. Does natural intelligence combined with artificial intelligence, in its most general sense relating to artefacts, elevate the virtual model to a cognitive level of abstraction? This article proposes an epistemological study to situate the virtual model in relation to these two architecturological postures.

Keywords. architecturology, systemics, representation space, design space, model, virtual, cognition

* Corresponding author: nour.ghribi@student.uclouvain.be

1 Introduction

Le numérique est désormais perçu comme un support pour l'activité intellectuelle humaine. Il affirme sa place comme outil d'extension de notre capacité à produire. La révolution digitale entraîne de profonds bouleversements dans diverses disciplines et domaines de la connaissance, y compris l'architecture. L'introduction de la technologie numérique a engendré la mutation du système de représentation architecturale vers un modèle réduit virtuel qui prend la forme d'une maquette tridimensionnelle. Cette expansion a modifié le processus de conception et elle a élargi le champ des possibilités de création. Les maquettes virtuelles interfacent le virtuel et le réel, la conception et la réalisation, impactant ainsi le processus de développement architectural. Étudier l'impact du numérique, en particulier de la maquette virtuelle, sur l'architecture est une question renouant avec l'actualité, en raison de la généralisation de l'usage des maquettes BIM et des *digital twins*. Au-delà de son impact pratique, l'introduction progressive de la maquette virtuelle dans la conception incite à aborder la question d'un point de vue épistémologique. L'architecturologie est un champ de recherche produisant des connaissances scientifiques, centrées sur les opérations cognitives de la conception architecturale, organisées selon un modèle architecturologique, proposant une réflexion épistémologique. Nous nous intéressons à la prédisposition du modèle architecturologique à intégrer les nouvelles technologies et à s'adapter à cette mutation numérique. Cet article propose de retracer l'évolution de la maquette virtuelle par rapport à deux postures architecturologiques : (1) l'architecturologie développée dans les années 1970 par Boudon et (2) l'architecturologie systémique introduite par Dhoub dans les années 2000. Nous essayerons de montrer à travers cette étude épistémologique si la maquette virtuelle a connu une élévation d'un niveau matériel de représentation vers un niveau conceptuel abstrait. Nous entendons par niveau de représentation le premier niveau d'un échafaudage de niveaux cognitifs du matériel vers l'abstrait.

Pour vérifier notre hypothèse, nous étudions, dans un premier temps, les débuts de la maquette virtuelle, confrontée à la posture architecturologique de Boudon. Pour ce faire, nous nous basons sur son étude expérimentale effectuée en 1989 qui s'articule autour du degré d'intervention de l'informatique en phase de conception. En considérant l'évolution perpétuelle des technologies, et plus particulièrement celle de la maquette virtuelle qui accompagne désormais la conception, nous nous orientons, dans un deuxième temps, l'architecturologie systémique de Dhoub et son concept de « maquette virtuelle cognitive » [12], qui semble s'adapter à la représentation du modèle architecturologique. Pour ce faire, nous allons étudier la maquette virtuelle cognitive en nous référant à quelques travaux développés depuis 2008. Cette étude épistémologique, nous a menés à considérer la maquette virtuelle cognitive comme interface intermédiaire entre le réel et le virtuel, le matériel et l'immatériel, marquant ainsi son élévation vers un niveau d'abstraction cognitif.

2 Maquette virtuelle et représentation architecturologique

2.1 Mutation du mode de représentation architecturale

La technologie a connu une évolution significative ces dernières décennies. Elle est devenue partie intégrante de plusieurs disciplines notamment l'architecture. Depuis la Renaissance, la vision du monde classique sous l'influence de l'humanisme, a placé l'être humain au centre de l'univers. Ce qui s'est traduit par la consolidation d'un système de représentation architectural universel apparenté au paradigme géométrique euclidien, qui repose sur l'usage de la projection orthogonale, la perspective, l'échelle et la maquette et se caractérise par la linéarité du processus de conception et la prédominance de la

bidimensionnalité des représentations. Pendant des siècles, les architectes dessinaient à la main pour représenter leurs idées et utilisaient les maquettes physiques pour modéliser des bâtiments en trois dimensions à des échelles réduites. Le mode de représentation géométrique euclidien a régné depuis le XV^e siècle jusqu'au déclenchement de la révolution informationnelle vers la deuxième moitié du XX^e siècle. Cette révolution a favorisé l'émergence d'un nouveau système de représentation : la maquette virtuelle. Elle s'apparente à un espace topologique tridimensionnel, généré par la computation d'une machine et visible par l'interface d'un écran bidimensionnel (moniteur d'ordinateur ou lunettes de casque virtuel).

2.2 Posture architecturologique à l'encontre de la maquette virtuelle

À l'époque où les membres du *Design Methods Movement* tentent de montrer que les processus de conception en architecture peuvent être étudiés à partir des mêmes principes que ceux de la conception en ingénierie ou en design industriel, Philippe Boudon développe l'« architecturologie » [1] avec un point de départ différent. Alors que d'autres commencent à utiliser des systèmes experts parallèlement à l'introduction des premiers outils numériques dans les bureaux d'architecture, Boudon questionne la discipline d'un point de vue épistémologique, en recommandant la fondation d'une « science de l'architecture » [1] – l'architecturologie – en tant que connaissance de l'architecture pour en constituer un objet scientifique architectural. Il propose un appareillage de concepts qui décrivent les opérations cognitives du concepteur, ainsi que les mécanismes mis en jeu lors de la conception architecturale. Plusieurs concepts sont définis en architecturologie, parmi lesquels : l'« échelle architecturologique », l'« espace de conception », l'« espace architectural », l'« espace de référence », l'« espace de perception » et les « opérations » de conception et d'attribution de « mesure ».

Bien que questionnées de manière sous-jacente dès les débuts de l'architecturologie, des écrits de Boudon s'intéressent aux articulations possibles entre l'architecturologie et l'informatique dès le début des années 1990. D'après lui, ces articulations peuvent s'effectuer à plusieurs niveaux : (1) au niveau de l'« espace architecturologique », défini comme espace de la conception modélisé par l'architecturologie ; (2) au niveau de l'« espace de la conception », présenté dans le cadre de l'architecturologie appliquée comme un objet singulier d'analyse de l'architecturologie, ou comme une construction intellectuelle d'une production à élaborer ; (3) au niveau de la représentation de l'« espace architectural », défini comme le résultat des opérations de conception effectuées dans l'espace de conception et qui constitue pour Boudon une construction scientifique à partir d'une double expérimentation de la conception et de la perception [1].

À cette époque, l'informatique représente pour Boudon une quantification poussée d'un objet architectural donné à travers les divers logiciels qui permettent de construire une « maquette spatiale ou numérique ». De là, il questionne le degré de correspondance entre l'architecturologie et l'informatique, « entre ce qui se passe dans l'esprit du concepteur et ce qui se passe dans la machine » [2].

Dans son approche d'expérimentation à travers des exercices, la problématique était de comprendre le degré d'intervention de l'informatique dans une conception donnée et le niveau de cette intervention par rapport au processus de conception. En 1989, il étudia un exercice proposé aux étudiants en 1^{re} année à l'École Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Lille (ENSAPL). Il s'agit d'une problématique à la fois conceptuelle et informatique, visant à trouver des similitudes aptes à assurer une instrumentation informatique adaptée à l'architecturologie. Les étudiants ont rencontré des difficultés dues au fait que la situation de départ porte sur l'« espace de conception », alors que les manipulations de la maquette virtuelle se font dans l'« espace de représentation ». En effet,

« l'étudiant raisonne dans l'ordre de la perception et non pas dans l'ordre de la conception » [2]. Boudon a montré à travers son expérimentation que l'architecte a acquis la possibilité de raisonner dans l'« espace de représentation » grâce au numérique. L'« espace de représentation » est considéré comme un espace matériel dans lequel se déploie la conception complémentairement à l'espace d'opération qui intègre les expressions intellectuelles du projet en cours d'élaboration [1], se transformant ainsi en espace de raisonnement. Par ailleurs, il s'est intéressé à la relation entre l'échelle architecturologique et l'écran en tant qu'espace de conception informatique.

Dans ses travaux les plus récents, Boudon considère le numérique comme « espace de référence » pour la conception. Selon lui, les références sont susceptibles d'intervenir activement dans le travail de conception et dans les opérations de référencement. Il lui semble que le numérique peut être dans certains cas un « espace de référence pour l'architecte ». Avec un « espace de référence », nous disposons donc « d'un concept qui pourrait être opératoire pour l'intelligibilité du numérique comme espace de conception » [3]. Par leur généralité, les espaces de référence ne peuvent pas s'inscrire dans la machine, mais ils demeurent à la disposition du concepteur pour l'aider lors du processus de conception. Arrivés à ce stade, nous avons constaté que la maquette virtuelle représente pour Boudon un outil qui opère au niveau de l'espace de représentation ou de l'espace de référence, tous deux rattachés au niveau matériel. Inversement, la conception architecturale peut jouer le rôle d'un espace de référence pour la conception numérique. D'après Boudon, il faut séparer la réflexion théorique de la manipulation informatique, afin de remédier à la confusion entre l'espace de représentation et l'espace de conception. Nous constatons que la réflexion de Boudon, menée à une époque où le numérique marquait encore ses débuts dans la pratique architecturale, reflète une séparation entre le niveau matériel de représentation et le niveau abstrait de conception.

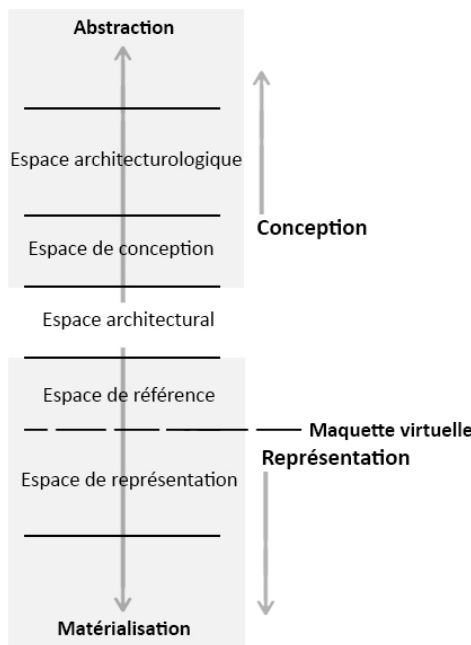


Fig. 1. Positionnement de la maquette virtuelle par rapport aux espaces architecturologiques (source : auteurs)

3 Maquette virtuelle cognitive et processus conceptuel systémique

3.1 Intégration de la maquette virtuelle dans le processus de conception

Le nouveau système de représentation – la maquette virtuelle – a élargi le champ des possibilités de création et il a bouleversé notre rapport avec le processus de conception. À travers la co-conception par divers intervenants en temps réel, elle permet d'assurer la cohérence lors de la superposition des différents lots sur un même modèle et donc de détecter les erreurs et d'assurer la cohérence des données. En plus de montrer la forme apparente du projet, elle en dévoile la structure cachée, ainsi que les réseaux qu'il contient. Elle agit comme une base de données riche en informations, facilitant la gestion et l'organisation des données liées au projet. Les maquettes virtuelles permettent d'effectuer des analyses et des simulations pour optimiser les performances du bâtiment. Il est désormais possible de tracer le cycle de vie du bâtiment depuis sa genèse et de faciliter son exploitation et son entretien. Associée à la réalité virtuelle et à la réalité augmentée, la maquette virtuelle offre une représentation immersive du projet et une perception presque réelle de l'objet architectural en question en superposant des modèles virtuels sur un espace réel.

Avec toutes les possibilités qu'offre aujourd'hui la maquette virtuelle qu'il s'agisse de co-conception, d'immersion virtuelle, ou encore de modélisation interactive s'adaptant à la complexité architecturale et au dynamisme de la conception, elle accompagne désormais le processus conceptuel. Ceci nous amène à nous interroger si le postulat limitant la maquette virtuelle à un simple outil de représentation ou de référence est encore d'actualité ? Si la conception architecturale se fait à un niveau cognitif abstrait et la maquette virtuelle lui sert d'interface intermédiaire entre le réel et le virtuel, le matériel et l'immatériel, la maquette virtuelle reste-t-elle attachée à un niveau matériel de représentation ? Ou a-t-elle connu une forme d'élévation vers un niveau d'abstraction cognitif ?

3.2 Architecturologie systémique et représentation des processus génératifs de la forme

En parallèle avec l'évolution des capacités qu'offre aujourd'hui la maquette virtuelle, les recherches en architecturologie se sont développées, notamment avec l'« architecturologie systémique » initiée dans les années 2000 par Mounir Dhoub [5], se référant à diverses théories et concepts tels que l'« épistémologie génétique » de Jean Piaget [8] et le concept de « système hiérarchique ouvert » avancé par Arthur Koestler [9].

L'architecturologie systémique propose un « modèle architecturologique » (cf. fig. 2) organisant la conception et décrivant les processus génératifs de la forme. D'après ce modèle, le fondement de la connaissance découlerait d'un double mouvement d'échafaudage et de construction résultant du croisement entre trois perspectives : (1) la perspective structurale ; (2) la perspective imaginaire ; (3) la perspective génétique dans le sens historique génératif [12]. Chacune de ces perspectives est tendue entre deux pôles, deux infinis, comme illustré par la figure 2. Plus concrètement, le savoir se construit en suivant un échafaudage du domaine matériel vers le domaine épistémologique dérivé [8]. « Chaque évolution est en même temps une reconstruction à un niveau d'organisation cognitive plus complexe [...] Ce mouvement dialectique constructif en spirale constitue le moteur même de la connaissance, qui en fait un processus général en devenir continu malgré les ruptures et les discontinuités. » [5] Les trois perspectives s'activent et

interagissent ensemble, à travers un mouvement en spirale reliant les infinis, jusqu'à atteindre une forme d'équilibre.

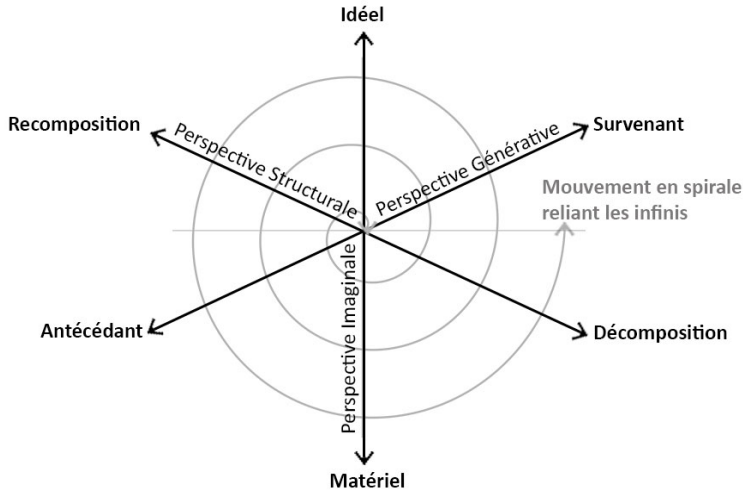


Fig. 2. Modèle architecturologique et construction de la connaissance selon Mounir Dhoubi (source : auteurs)

« la représentation qui consiste à produire un modèle réduit de l'édifice s'avère insuffisante, incapable de rendre compte des réalités spatiales. Ce qu'il faut c'est une véritable spatialisation qui consiste à simuler les diverses composantes spatiales. » [6] Suivant cette perspective, l'architecturologie systémique fait appel au concept de « spatialité » au lieu de celui d'« espace ». Cette spatialité serait une *forme* à trois dimensions [12] : une dimension structurale systémique, une dimension historique génétique et une dimension imaginale poétique, décrites comme des perspectives spatio-cognitives du processus de connaissance-crédation génératif de la forme.

La spatialité serait un événement spatio-temporel, qui tend vers la complexité depuis sa genèse, conjuguant deux unidualités :

(1) espace/temps : espace et temps sont toujours interreliés dans une relation ternaire dynamique, un événement évolutif, un phénomène générant une forme spatio-temporelle évolutive.

(2) sujet/ objet : la spatialité relie le sujet créateur à l'objet de sa création. La notion de spatialité résout la dualité entre le matériel et l'idéal, le réel et l'imaginaire. La perception et l'imagination sont alors considérées comme des constatations cognitives découlant de l'interaction évolutive entre le sujet et l'objet.

Face à la complexité des perspectives étroitement liées du modèle architecturologique, l'architecturologie systémique propose le concept de « maquette virtuelle cognitive » [12], ou de « modèle du double virtuel cognitif » [12] qui semble s'adapter à la représentation du modèle et des processus génératifs de la forme.

4 Vers une élévation cognitive de la maquette virtuelle, interface entre la représentation et la conception

La maquette virtuelle cognitive désigne une représentation numérique d'un système cognitif ou une simulation interactive cognitive qui combine maquette virtuelle et cognition.

La maquette virtuelle désigne la représentation numérique détaillée d'un objet architectural donné, déjà construit ou à construire. Elle englobe la géométrie de l'objet et

l'ensemble des informations relatives à son usage le long du cycle de vie du projet, permettant sa visualisation et l'expérimentation sur le modèle. À condition que ses objets soient porteurs de données, de maquette Building Information Model (BIM).

Selon l'architecturologie systémique, la cognition renvoie à la construction de la connaissance qui évolue, d'après Piaget, selon un échafaudage qui tend vers l'abstraction. La construction génétique d'une structure passe par des stades de « déséquilibres partiels » avant d'atteindre une « nouvelle forme d'équilibre » relative à la nouvelle structure construite. Cette interaction permanente serait liée au processus biologique d'assimilation-accommodation. [8]

La maquette virtuelle cognitive proposée s'inscrit dans une approche holistique alliant cognition et numérique. Elle est au croisement de deux savoirs, l'un issu d'une intelligence naturelle, le système architecturologique, l'autre résultant d'une intelligence artificielle, la représentation virtuelle. Nous nous référons à Herbert A. Simon selon lequel l'intelligence naturelle est associée au cerveau humain « de chair et de sang », doté d'une aptitude à construire et à assimiler la logique derrière les idées abstraites et les formules mathématiques. En l'occurrence, l'intelligence artificielle « de verre et de métal » est relative aux machines conçues par l'homme, en particulier les ordinateurs : « Les ordinateurs ont transféré les systèmes de symboles du paradis platonique des idées au monde empirique des processus réels effectués par des machines, ou par ces cerveaux, ou par les deux travaillant ensemble. » [13] Nous considérons que l'intelligence artificielle, telle que définie par Simon, est capable de compléter l'intelligence naturelle dans la réalisation des processus créatifs.

Le système architecturologique est un « système conjonction du modèle du système cognitif total et du modèle du système architectural. » [5] Le modèle du système cognitif opère à un niveau épistémologique permettant de développer les connaissances nécessaires à la production architecturale et le modèle du système architectural explique cette production architecturale à un niveau matériel. Le système architecturologique structure le processus conceptuel suivant l'enchaînement paradigmatique de la connaissance annoncé par Piaget. Un échafaudage de stades successifs de plus en plus abstraits : descriptif, systématique, analytique, génétique et poïétique. De là émerge un modèle génératif cognitif, intégré dans la maquette virtuelle, qui passe ainsi d'un niveau de représentation à un niveau d'abstraction supérieur, rassemblant l'ensemble des systèmes complexes adaptatifs et créatifs du spécimen architectural.

L'association de l'intelligence naturelle à l'intelligence artificielle permet à la maquette virtuelle d'acquérir les connaissances nécessaires à la conception, opérant à un niveau cognitif, et l'aptitude à la modélisation et à la simulation de ces connaissances à un niveau matériel : « Aujourd'hui, les mémoires artificielles et numériques remplacent la mémorisation naturelle, typographique et analogique. Des bases de données architecturologiques assurent dans l'avenir la transmission de l'Architecture. Elles contiennent tous les systèmes architecturaux inventoriés, classés et systématisés ainsi que la connaissance qui permet de les : reproduire et interpréter [...] dans les bases de données architecturologiques, on ne garde pas simplement de l'information, mais aussi de la connaissance systématisée. Les données organisées deviennent informations, les informations organisées forment de la connaissance, les connaissances organisées et générales, comprimées par des théories puissantes, sont considérées comme des systèmes cognitifs : espèces de programmes génétiques de ces architectures, nécessaires et suffisants à leur auto-reproduction. » [7]. La maquette virtuelle n'est plus seulement représentative, elle devient cognitive, reliant le niveau matériel de représentation au niveau abstrait de conception.

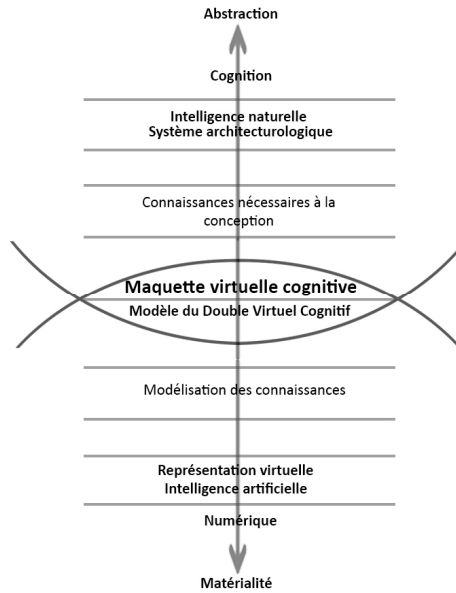


Fig. 3. La maquette virtuelle cognitive comme interface entre les différents niveaux cognitifs (source : auteurs)

La « maquette virtuelle cognitive » joue le rôle d’interface intermédiaire entre les différents niveaux cognitifs. Elle prend en charge et modélise les trois perspectives constitutives de la création qui se matérialisent en trois processus complémentaires et synthétiques de la conception : (1) un processus imaginatif de créativité et de poétisation, d’élévation du matériel vers l’idéal et inversement de concrétisation, d’une vision ou idéalité ; (2) un processus génératif d’émergence évolutive qui se développe en se complexifiant suivant la logique générer/tester ; (3) un processus de structuration d’affirmation des éléments constitués et leur intégration dans un tout équilibré et l’harmonisation de cette totalité.

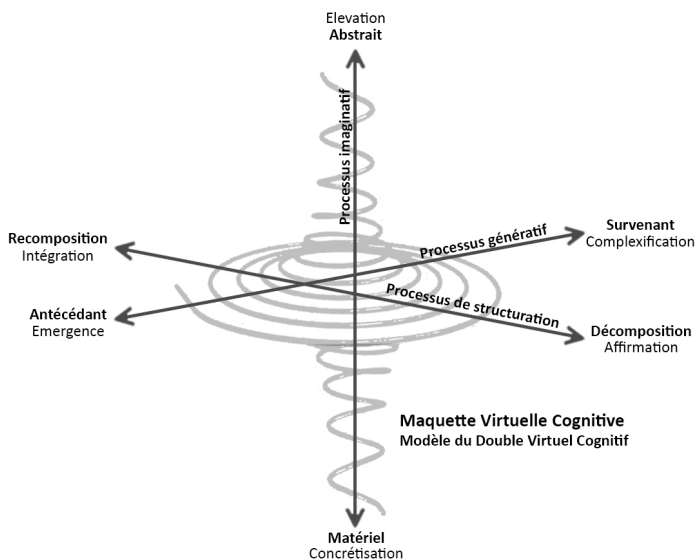
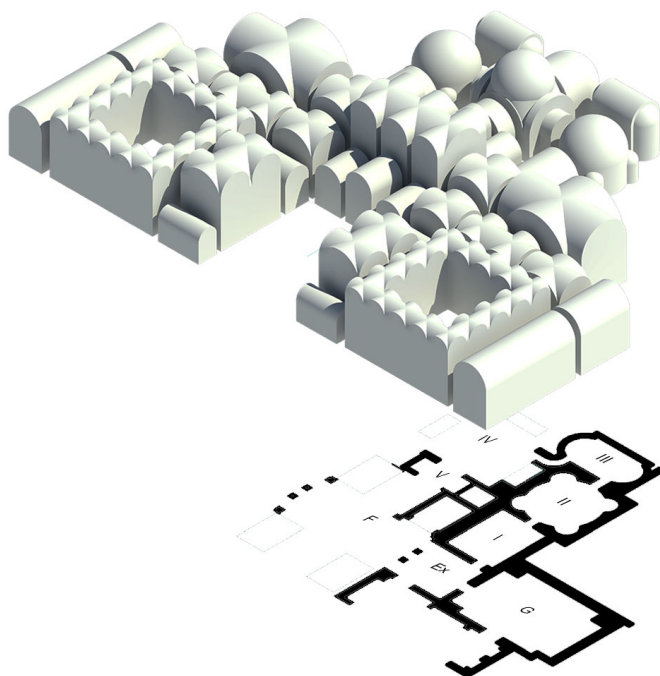


Fig. 4. Processus complémentaires et synthétiques de la conception (source : auteurs)

« Le processus de conception par construction spatiale est ce mouvement à trois temps : la genèse, la croissance et le croisement, ou formation, intégration et composition. L'être architectural est ce mouvement où l'espace se défait et se refait produisant du vocabulaire et de l'organisation et où l'existence spatiale émanant du simple est tendue vers le complexe. » [6] L'enchaînement de ces processus syncrétiques et synthétiques à trois temps s'inverse si nous partons d'un édifice réalisé ou si nous sommes en situation de conception inventive de projet architectural et sa décomposition en rétroconception qui vise à expliquer la genèse de l'édifice étudié. La maquette virtuelle cognitive permet, d'une part, de générer une autoreproduction virtuelle ou *digital twin* fidèle au spécimen architectural qui constituerait une convergence entre deux mondes : le physique et le virtuel. Le *digital twin* sert alors d'interface intermédiaire entre le réel et le virtuel. D'une autre part, la maquette virtuelle cognitive constitue une mémoire informationnelle durable apte à assurer la conservation ou la restitution d'un spécimen architectural. Dans ce contexte, plusieurs recherches ont été soutenues au sein de l'équipe de recherche *Architecturologie et modélisation de la conception* (ArMC) depuis 2008, visant à proposer des hypothèses de restitution de vestiges matérialisées par le *digital twin*. La méthode adoptée détermine le code génétique ou programme puis transforme cette information en matière. Nous avons appliqué la méthode en question aux thermes impériaux de Ain Doura en Tunisie [12]. Ce qui nous a permis de générer une autoreproduction virtuelle ou *digital twin* rassemblant des connaissances précises qui réduisent l'écart d'incertitude dans les hypothèses de restitution proposées.

Restitution à travers la maquette virtuelle



Plans des vestiges

Fig. 5. Exemple de *digital twin* : restitution à travers la maquette virtuelle des thermes impériaux romains de Ain Doura, d'après Dhoub et al. (2023)

5 Conclusion

L'évolution du numérique continue d'influencer et de développer divers domaines. Cette étude se focalise spécifiquement sur son apport à l'architecture, dans le but de situer la maquette virtuelle d'un point de vue épistémologique.

Cette étude examine, dans un premier temps, la mutation du mode de représentation architecturale avec l'introduction des premiers outils numériques dans les bureaux d'architecture. Pour ce faire, l'étude se base sur les travaux de Boudon en particulier sur son étude expérimentale effectuée en 1989 qui s'intéresse aux espaces architecturologiques et aux articulations possibles entre l'architecturologie et l'informatique.

Nous avons constaté que la maquette virtuelle représente pour Boudon un outil de représentation rattaché au niveau matériel et qui intervient dans les espaces de représentation et de référence. Nous avons émis l'hypothèse que cela était dû au fait que la maquette virtuelle marquait encore ses débuts quand elle a été confrontée à l'architecturologie de Boudon et que, à cette époque, elle n'était pas apte à contenir le processus conceptuel opérant à un niveau d'abstraction supérieur. Ce qui accentue la séparation entre le niveau matériel de représentation et le niveau abstrait de conception.

Dans un deuxième temps, l'étude se penche sur les possibilités qu'offre aujourd'hui la maquette virtuelle lui permettant de s'adapter à la complexité architecturale et au dynamisme de la conception. La question porte alors sur la validité du postulat qui limite la maquette virtuelle à un simple outil de représentation. L'approche de l'architecturologie systémique est alors mise en avant proposant la maquette virtuelle cognitive, comme concept qui croise maquette virtuelle et cognition, désignant une représentation numérique d'un système cognitif.

À travers ce croisement, la maquette virtuelle a dépassé son rattachement au niveau matériel de représentation. L'association de l'intelligence naturelle à l'intelligence artificielle lui a permis d'acquérir les connaissances nécessaires à la conception, opérant à un niveau cognitif abstrait, et l'aptitude à la modélisation de ces connaissances à un niveau matériel. Nous considérons que la maquette virtuelle cognitive sert d'interface intermédiaire entre le réel et le virtuel, le matériel et l'immatériel, marquant ainsi une élévation vers un niveau d'abstraction cognitif.

Cette étude contribue à retracer l'évolution du positionnement épistémologique de la maquette virtuelle d'un point de vue architecturologique. La maquette virtuelle cognitive, telle qu'avancée par l'architecturologie systémique, semble apte à englober les espaces architecturologiques et à générer les spatialités découlant des perspectives spatio-cognitives du processus de connaissance-crédation génératif de la forme.

L'hybridation entre l'intelligence artificielle et l'intelligence naturelle offre une possibilité d'expérimentation virtuelle presque réelle à travers la maquette virtuelle cognitive, la question soulevée est de savoir à quel point le jumeau numérique (ou *digital twin*) ainsi créé reproduit le modèle réel ? De cette alliance, pourrait-il émerger une nouvelle pédagogie d'enseignement du projet architectural autour de l'architecturologie expérimentale ?

Par ailleurs, cette brève étude épistémologique ouvre le champ à des recherches plus poussées, qui s'intéressent au parallélisme possible entre les espaces architecturologiques et les spatialités de l'architecturologie systémique organisées en niveaux cognitifs, reliant le matériel à l'abstrait. Les espaces architecturologiques pourraient-ils alors s'organiser en espaces matériels et espaces abstraits structurés selon l'enchaînement paradigmatique de la connaissance ?

Références

1. P. Boudon, *Sur l'espace architectural : essai d'épistémologie de l'architecture* (Parenthèses, Marseille, 1971)
2. P. Boudon, P. Deshayes, F. Pousin, and F. Schatz, *Conception architecturale architecturologiquement assistée par ordinateur (tome 1)* (Laboratoire d'architecturologie et de recherche épistémologique sur l'architecture (LAREA); École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy; Bureau de la recherche architecturale (BRA), 1993)
3. P. Boudon, *Nul n'entre ici s'il n'est géomètre*, DNArchi (2012)
4. P. Boudon, P. Deshayes, F. Pousin, and F. Schatz, *Enseigner la conception architecturale : cours d'architecturologie* (La Villette, Paris, 1994)
5. M. Dhouib, *De la construction de connaissances à la création : modélisation du processus de conception architecturale*, Thèse de doctorat en architecture, École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU), Université de Carthage (UCAR), (2004)
6. M. Dhouib, *Dialogique de dére-construction spatiale d'une architecture traditionnelle*, Mujtamâa wa Umrân, **21/22** (1995)
7. M. Dhouib, *La conservation virtuelle et cognitive, mémoire des formes, mémoire des lieux*, Archibat, **11** (2005)
8. J. Piaget, *Logique et connaissance scientifique* (Gallimard, Paris, 1967)
9. A. Koestler, *The Ghost in the Machine* (Macmillan, New York, 1967)
10. J. Piaget and R. Garcia, *Psychogenèse et histoire des sciences* (Flammarion, Paris, 1983)
11. H. Licheheb, K. Bouaita, M. Dhouib, *Modélisation architecturologique des thermes impériaux romains de Tunisie*, *Courrier du Savoir*, **13** (2012)
12. B. Dhouib, N. Ghribi, M. Dhouib, *Rétroconception spatio-cognitive et régénération : vers la digitalisation du patrimoine à l'ère du numérique. Modèle constitutif de mémoires architecturales virtuelles numériques*, colloque Villes et Territoires Intelligents : Concepts, enjeux et stratégies d'actions, Digi Arts and Sciences, 2^e édition (2023)
13. H. Simon, *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel* (Dunod, Paris, 1991)