

# De la conception architecturale biomimétique

Louis Vitalis

▶ **To cite this version:**

Louis Vitalis. De la conception architecturale biomimétique : Essai de modélisation à partir du cas du National Beijing Stadium 'Bird's nest' de Herzog & de Meuron. [Rapport de recherche] UMR 3495 MAP CNRS/MC. 2020. hal-02492364

**HAL Id: hal-02492364**
**https://hal.science/hal-02492364**

Submitted on 26 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Rapport de recherche**

# De la conception architecturale biomimétique

## Essai de modélisation à partir du cas du *National Beijing Stadium 'Bird's nest'* de Herzog & de Meuron.

Effectué dans le cadre du projet : **BiomimArchD** : Construction d'une base de connaissances pour l'architecture biomimétique durable / CNRS / Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires

**Commanditaire**

UMR 3495 MAP CNRS/MC - Campus CNRS, Bâtiment US - 31 chemin Joseph Aiguier - 13402 MARSEILLE cedex 20

Janvier 2020

**Louis Vitalis**
ENSA - La Villette
louis.vitalis@paris-lavillette.archi.fr

* *Nous souhaitons remercier l'UMR MAP pour le soutien apporté à cette recherche et sans lequel elle n'aurait pu voir le jour. Nous remercions également Philippe Boudon pour les échanges fertiles dont découle la formalisation présentée en Annexe.*

*Ce projet a obtenu le soutien financier du CNRS à travers les programmes interdisciplinaires de la MITI*

## Sommaire

I. Modéliser la conception architecturale : modèles et échelles ..... 2
II. La conception du '*Bird's nest*' — données ..... 6
III. La conception du '*Bird's nest*' — modélisation architecturologique ..... 10
IV. Généralisation - un modèle de la conception architecturale biomimétique ..... 14
V. Annexe – formalisation architecturologique de l'échelle de modèle ..... 20
Bibliographie ..... 29

## Résumé

Cette étude se propose d'analyser la conception architecturale biomimétique à partir d'un point de vue cognitif sur les activités et processus de conception. Elle mobilise comme cadre d'analyse les concepts de « modèles » et d'« échelles » de la théorie architecturologique et prend pour cas d'étude le stade olympique 'Bird's nest' à Pékin, conçu par les architectes suisses Herzog et de Meuron. Suite à la modélisation de ce cas particulier, un modèle générique du raisonnement de conception architectural biomimétique est proposé et des points d'attention particuliers pour l'instrumentation de la conception architecturale biomimétique sont identifiés.

## Abstract

This study proposes to analyze biomimetic architectural design from a cognitive point of view on design activities and processes. As a analytical framework it uses the concepts of "models" and "scales" from the architecturological theory. As a case study it focuses on the Olympic stadium 'Bird's nest' in Beijing, designed by swiss architects Herzog and de Meuron. Following the modelling of this particular case, we proposes a generic model of the reasoning of biomimetic architectural design and identifies particular points of attention for the development of technological assistance to biomimetic architectural design.

## I. Modéliser la conception architecturale : modèles et échelles

Il existe différents modèles théoriques permettant de modéliser la conception architecturale. Pour cette recherche, le modèle architecturologique a été mobilisé. Il présente l'avantage de s'attacher à la spécificité de la conception architecturale identifiée à l'endroit des mesures de l'espace, et s'appuie également sur un langage conceptuel structuré en système et sur une réflexion épistémologique importante. Dans cette partie, nous allons résumer très succinctement les principales notions utiles pour la suite de l'étude[1] :

### Le jeu modèle/échelle

La conception architecturale est décrite comme un processus au sein duquel des opérations peuvent être identifiées. Ces opérations sont ce qui fait que la conception « avance ». L'aspect continu du processus est ainsi discrétisé en éléments intelligibles. Les opérations auxquelles s'attache l'architecturologie sont des opérations d'attribution de mesure. Les mesures de l'espace permettent, dans la conception un embrayage : en donnant des mesures à l'espace, l'architecte raccorde ce qui n'existe pas encore (l'architecture en train d'être conçue) à une réalité future. Les mesures doivent être cependant entendues en architecturologie de manière abstraite. Une distance absolue, mais aussi une surface, un volume, un angle, une forme topologique, une distance relative, un matériau… sont pour l'architecturologie des mesures. Par ailleurs, il faut distinguer l'« attribution de mesure » de la « prise de mesure », car l'architecte a affaire à un réel qu'il se donne, une architecture qui n'existe pas encore.

Le concept d'opération suppose de distinguer un opérateur et un opérande. L'opérateur qui effectue l'opération d'attribution de mesure est appelé *échelle*. L'opérande sur lequel s'effectue l'opération d'attribution de mesure est appelé *modèle*[2]. Une ou plusieurs échelle(s) opèrent alors sur un modèle *n*, le résultat de cette opération est un modèle mis à l'échelle *n+1*, ce modèle est à nouveau opéré par des échelles, *etc*. Le processus de conception se décrit alors par le jeu modèle/échelle, schématiquement :

... $E(M_n) \Rightarrow Mn_{+1} \ldots E(M_{n+1}) \Rightarrow M_{n+2}$ ...

### Échelle(s)

L'échelle est un opérateur de la conception architecturale. Elle incarne la fonction de *réduction*, c'est-à-dire de transformation, d'émergence de la différence. La *réduction* est un cas limite de la conception où tout est nouveau, c'est une fiction théorique. L'espace de la conception est borné par les deux cas limites que sont la *réduction* et la *répétition* (cf. « Modèle » *infra*).

[1] Cette présentation s'appuie sur le *Cours d'architecturologie* (Boudon et al., 1994/2000), pour une présentation plus didactique nous renvoyons à l'*Introduction à l'architecturologie* (Boudon, 1992).

[2] Il faut donc distinguer nettement l'architecturologie comme modèle au niveau épistémologique visant à modéliser la conception architecturale (modélisation visant la connaissance, l'analyse) du modèle architecturologique, concept interne à cette théorie désignant un aspect du travail de l'architecte (modélisation visant le « faire », la conception ou la transformation du monde réel). Sur cette multivalence de la modélisation il est possible de reporter au travail de Jean-Louis Le Moigne (Le Moigne, 1977/2006).

L'échelle opère sur des dimensions du modèle, qui sont des supports de la mesure (des *mesurés*). À la différence de la proportion, l'échelle fait intervenir un référent extérieur. C'est le recours à ce référent qui permet l'embrayage (raccordement au réel). Ces référents peuvent être regroupés dans des classes en fonction des modalités récurrentes des architectes. Des mesures sont par exemple attribuées en fonction de références techniques, fonctionnelles, géographiques et symboliques formelles. Ces classes de références définissent alors des échelles canoniques : échelle technique, échelle fonctionnelle, échelle géographique et échelle symbolique formelle. Ces références sont des points de vue actifs dans la conception. Ils agissent comme ce par rapport à quoi la mesure est attribuée (des *mesurants*). Par ailleurs, la mesure attribuée à la *dimension* possède une *pertinence*. La pertinence est la valeur de la mesure ou son pourquoi. En fonction d'une même référence, la mesure peut être attribuée différemment selon les architectes et les moments de conception. La pertinence décrit le fait qu'il n'y a pas de nécessité de la conception, mais que les concepteurs se meuvent dans la contingence et opère avec une certaine liberté vis-à-vis du réel[3].

*Dimension*, *référence* et *pertinence* sont les concepts fondamentaux de la mesure. Trois opérations constitutives de l'échelle peuvent en être dégagées. La *référenciation* est l'opération consistant à choisir une référence au sein d'un espace de références. Une grande diversité des réalités peut servir de référence à un architecte. La *référenciation* possède sa propre pertinence. Le *découpage* est l'opération consistant à définir l'entité sur laquelle va porter la mesure. Elle produit une dimension. Le *découpage* possède également sa propre pertinence. Le *dimensionnement* est l'opération consistant à mettre en relation la référence et la dimension selon une certaine pertinence, pour finalement déterminer une mesure de cette dimension.

Les trois opérations constitutives de l'échelle ont chacune leur pertinence. Il existe alors, au-delà des échelles canoniques, des échelles plus complexes dont les opérations constitutives renvoient à des pertinences hétérogènes. Il y a donc une multiplicité d'échelle permettant de rendre compte de la complexité de la conception architecturale.

**Modèle**

Le modèle est opérande de la conception architecturale. Il incarne la fonction de *répétition*, c'est-à-dire de conservation de l'identité, de reprise du même. La *répétition* est un cas limite de la conception ou rien ne change, c'est une fiction théorique. L'espace de la conception est borné par les deux cas limites que sont la *répétition* et la *réduction* (cf. « Échelle(s) » *supra*).

Le modèle est ce sur quoi opère l'échelle. Sa caractérisation est donc, avant tout, fonctionnelle. D'un point de vue ontologique, le modèle est constitué de dimensions mesurées. Ces dimensions peuvent être regroupées dans des niveaux de conception. Un niveau de conception est un sous-espace de l'espace de conception. Il regroupe un ensemble de dimension que le concepteur souhaite traiter de manière spécifique et partiellement indépendante du reste du modèle. Les niveaux de conception sont le produit d'opérations de découpage spécifiques : les échelles de niveau de conception.

Le modèle sur lequel opèrent les échelles est donc *in fine* un ensemble de mesures qui évolue au fil des mises à l'échelle. Ce processus conduit le modèle à être de plus en plus embrayé. En effet, généralement, pour qu'un projet conçu puisse se construire (ce qui n'est

[3] Concernant la conception comme registre du contingent plutôt que du nécessaire, voir la distinction de Herbert A. Simon entre sciences naturelles et sciences de l'artificiel (Simon, 1969–1996/2004).

pas toujours souhaité), il faut pouvoir le transmettre à des entreprises sous forme de dessins côtés représentant un objet comme s'il existait.

### Échelle de modèle

Pour l'interprétation des processus de conception biomimétique, nous allons avoir recours à une échelle spécifique, l'échelle de modèle[4]. L'échelle de modèle est un cas particulier d'échelle où l'opérateur (échelle) a fonction de *répétition*. Dans ce cas, l'échelle ne change rien au modèle mais le transporte ou l'introduit dans l'espace de conception. Les architectes ont fréquemment recours à des éléments, des parties, des morceaux d'architecture qu'ils reprennent à l'histoire ancienne ou récente pour les réutiliser dans le projet. Ce sont des modèles qu'ils répètent. L'échelle de modèle désigne cette opération de reprise.

**Exemple** : le travail des architectes de l'agence Herzog & de Meuron nous donne l'occasion d'illustrer le concept d'échelle de modèle par un cas particulier, celui de la réutilisation de modèles pris parmi les productions de l'agence elle-même. Pour leur projet de musée d'art contemporain de Baranca au Mexique (2009, n°351[5]), les architectes de l'agence Herzog & de Meuron ont repris de leur premier musée d'art Parrish situé à Southampton aux États-Unis (projet non réalisé de 2005-2008, n°277), l'idée d'un groupement de formes géométriques similaires formant un ensemble complexe (Herzog, 2011). Le modèle repris au musée d'art Parrish est également mis à l'échelle des vues qu'offre le site mexicain mais aussi par rapport à la référence d'ordre culturelle des rosaces d'orientation. Ces objets d'art de la culture précolombienne induisent une certaine régularité selon un ordre circulaire par rapport à l'organisation des espaces plus désordonnés à Southampton.

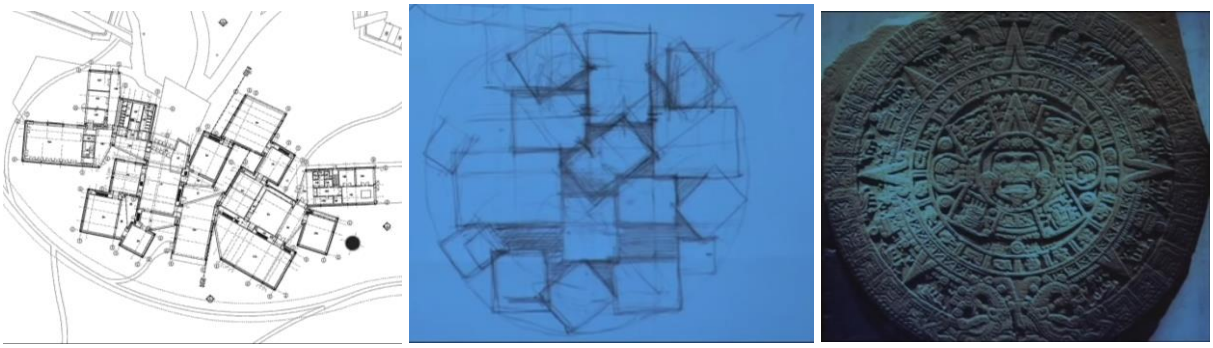


Figure 1 — de gauche à droite : le musée d'art Parrish, le musée de Baranca, un objet traditionnel précolombien pris comme référence par les architectes (extrait de Herzog, 2011).

Chez les architectes de l'agence Herzog & de Meuron, ce modèle du groupement devient plus général. Par sa réutilisation régulière, ils en font un modèle, celui des « stacks » (empilement) qu'ils reprennent dans plusieurs projets (de manière verticale, par exemple pour la maison Vitra 2010, n°294). Cet exemple montre que l'échelle de modèle induit une

[4] L'échelle de modèle a demandé un travail supplémentaire de formalisation qui, par commodité de lecture, est retranscrit dans l'Annexe – formalisation architecturologique de l'échelle de modèle, p. 20 et synthétisé dans la Figure 8, p. 28. Si la portée de ce travail est celle d'une architecturologie fondamentale il reste crucial pour la définition des concepts et donc, indirectement, pour leur application à la conception biomimétique.

[5] L'identification numérotée des projets suit celle de l'archivage de l'agence Herzog & de Meuron.

répétition mais que cette répétition tolère des variations ou adaptations dues à la mise en œuvre d'autres échelles.

Par ailleurs, les modèles répétés dans la conception par les échelles de modèle ne sont pas nécessairement des modèles d'objets architecturaux. Il n'y a pas de limite *a priori* à ce que l'architecte peut décider de réutiliser. Ainsi des modèles peuvent être pris à des espaces urbains, des organisations, des objets manufacturés, des machines, des paysages, mais également des formes naturelles. Une des clés de la compréhension architecturologique du biomimétisme se situe alors à l'endroit de l'échelle de modèle dès lors qu'elle répète des modèles naturels dans l'espace de conception.

**Précision épistémologique : modèles naturels ou modèles biologiques ?**

Il semble préférable de parler de « modèles naturels » plutôt que de « modèles biologiques » car l'espace de conception n'est pas soumis à une structuration épistémologique : la connaissance de la nature que possède le concepteur n'est pas une connaissance scientifique. Elle n'est pas structurée par un *logos*. Un concepteur, même informé par la littérature scientifique ou des échanges avec des biologistes, fut-il lui-même biologiste, est mis, par la conception, dans une position différente à l'égard du réel. Sa visée n'est pas celle de décrire le réel mais de le transformer. La connaissance devient pour le concepteur un outil. Il importe peu qu'elle soit vraie ou fausse, ni même qu'il l'ait correctement comprise, car la production de l'architecte change le réel dans le réel. En ce sens, des modèles biologiques historiquement dépassés ou démontrés faux peuvent être tout aussi utiles à un architecte que des modèles biologiques actuels qui seront peut-être falsifiés plus tard. Il importe avant tout que ces modèles rendent l'architecte opérant et, de ce point de vue, tout peut valoir car la conception est affaire de contingence et non de nécessité (cf. Simon, 1969–1996/2004, p. 207).

Le transfert de concept depuis des disciplines scientifiques vers la pratique architecturale est chose courante[6]. Il faut pourtant se garder de leur attribuer la même valeur scientifique une fois importé dans un autre domaine. Une théorie biologique, comme toute autre théorie scientifique, est transformée lorsqu'elle est utilisée ou introduite dans une pratique de conception. Cette transformation lui fait perdre son caractère descriptif tout en ajoutant d'autres ingrédients propre à la pratique de conception (tels que des valeurs), comme nous avons pu l'argumenter ailleurs (Vitalis & Guéna, 2019). Pour étudier des phénomènes de conception architecturale biomimétique il semble donc plus pertinent de comprendre la connaissance que possèdent les architectes des modèles naturels — aussi imparfaite soit-elle —, plutôt que de comprendre la connaissance scientifique que possèdent les biologistes des modèles biologiques.

[6] « Derrière […] la distance entre concepts de la science moderne et leur intégration dans la doctrine architecturale, il y a un mécanisme fort général, celui du transport, de la circulation des idées d'un champ à l'autre ; et le dévoiement, le détournement, les métaphores, sont le lot constant de la créativité architecturale. C'est en tant que tel qu'ils sont à analyser » (Guiheux, 1983, p. 93). C'est précisément cette non scientificité de l'utilisation des concepts scientifiques que reconnait Christian Girard dans la pratique des architectes (Girard, 1986). Il se méprend pourtant sur les conclusions à tirer quant à la possibilité d'une approche scientifique de l'activité de conception qui doit justement se donner pour tâche de comprendre ces importations à leur juste valeur.

## II. La conception du '*Bird's nest*' — données

Dans cette partie, nous exposerons les données relatives au cas d'étude. Ce sont des données brutes mais réorganisées diachroniquement pour faciliter l'analyse par le cadre de lecture architecturologique qui aura lieu dans la partie suivante. Le cas choisi pour cette étude est le projet du Stade National de Pékin, nommé aussi '*Bird's nest'*. Il a été conçu par un groupement dirigé par l'agence d'architecture suisse Herzog & de Meuron, à l'occasion des Jeux Olympiques de 2008, et initié lors d'un concours international en 2002 (projet n°226). Ne prétendant pas réunir des données exhaustives sur l'ensemble du processus de conception de ce vaste projet, nous nous focaliserons sur les données concernant un moment partiel du processus, à savoir, la reprise du nid d'oiseau dans la conception du stade. Sur ce point restreint, une de nos sources principales sera l'entretien inédit effectué avec les architectes de l'agence dans le cadre du projet BiomimArchD (Marbach et al., 2019), complété d'autres publications.

L'idée de nid d'oiseau n'est pas initiale dans le processus de conception, le processus de conception est déjà engagé et certaines décisions sont prises. En particulier, cette idée a été précédée et préparée par un travail de conception inspiré des craquelures caractéristiques des vases en céramique émaillée chinois et des *gongshi*, pierres veinées ou évidées, dites aussi pierres de lettré qui servaient de support à la méditation et à l'imagination (Parrish, 2009, p. 11)[7]. Les architectes ont alors travaillé au dessin d'une trame ou d'un *pattern* constitué de lignes organisées de manière irrégulière pour l'enveloppe du stade (Marbach et al., 2019).

L'artiste chinois Ai Weiwei, consultant de l'agence sur ce projet, est intervenu au cours d'une séance de collaboration. Voyant le pattern irrégulier il l'a alors réinterprété en dessinant un nid avec un oiseau sur un arbre. L'idée que se font les architectes du nid d'oiseau[8] s'ajoute donc aux idées précédentes et intéresse en particulier deux éléments : l'« enveloppe » et le « bol » (Marbach et al., 2019). Ces deux éléments sont déjà indépendants à ce stade de la conception, notamment pour des raison sismiques, et 24 piles sont définies de manière commune en prévision de la réunion de l'enveloppe et du bol (Parrish, 2009, p. 11, 14) :

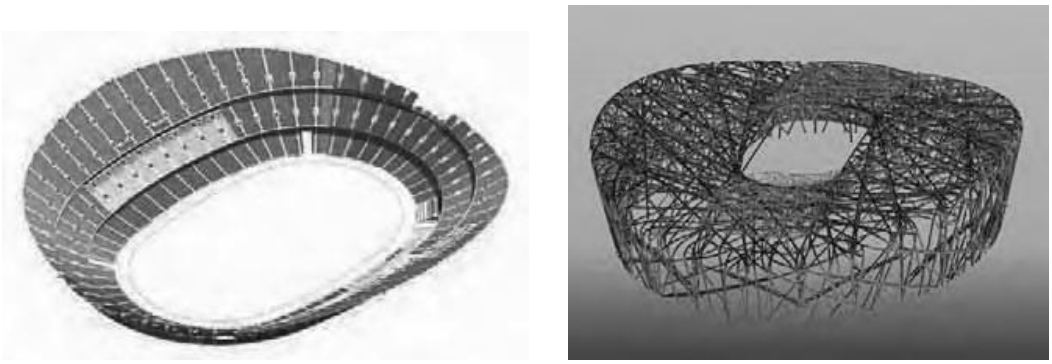


Figure 2 —le « bol » et l'« enveloppe » (tiré de Parrish, 2009, p. 8, 10)

[7] L'exposition qui a lieu au CCA entre octobre 2002 et avril 2003 atteste de la présence de pierres de lettré chinois parmi les inspirations de l'agence (cf. Magrou, 2003, p. 109).

[8] « we are always inspired by nature but in the way we see, the way we interpret into our architectural design (not the way it happens exactly in nature) » (Marbach et al., 2019) marque bien le fait que la connaissance de la nature est une connaissance profane, non scientifique mais que ceci n'est pas une limitation dans la conception architecturale.

— Le « bol » désigne la structure de béton intérieure définissant les rangées d'assises des spectateurs. La topologie concave de l'intérieur du nid d'oiseau est semblable à celle du bol. Dans l'organisation du travail et de la collaboration des équipes, la conception du bol est sous la responsabilité des ingénieurs de ArupSport (concernant l'organisation des équipes cf. Parrish, 2009). Le nid d'oiseau informe peu la conception du bol. La topologie générale est conventionnelle pour un stade et la forme précise est déterminée par des choix de visibilité et de proximité des spectateurs par rapport à la piste. La forme du bol contraint la forme de l'enveloppe. Néanmoins, les colonnes porteuses du bol sont situées du côté extérieur et donc en rapport avec l'enveloppe. Pour maintenir la cohérence de l'aspect « chaotique », certaines d'entre elles sont alors inclinées (Choi & Lam, 2009, p. 32). De plus, les différentes activités qui sont logées dans l'épaisseur extérieure du bol sont dessinées comme des unités autonomes ce qui permettant de laisser des porosités (Marquez Cecilia & Poveda, 2013, p. 132). Cette porosité est aussi induite par l'idée de microclimat propre au nid d'oiseau.

— L'« enveloppe » désigne la peau extérieure de l'édifice qui fait office de façade et de toit. Souhaitant réduire l'impact visuel en évitant la présence de mâts ou d'arches, les architectes ont défini l'enveloppe comme une forme lisse et continue. La structure en brindilles entremêlées du nid d'oiseau est semblable à la grille aléatoire sur laquelle travaillent les architectes. Le nid d'oiseau informe la conception de l'enveloppe en ajoutant l'idée d'une répétition d'éléments semblables et d'une tridimensionnalité des principes aléatoires de la grille[9].

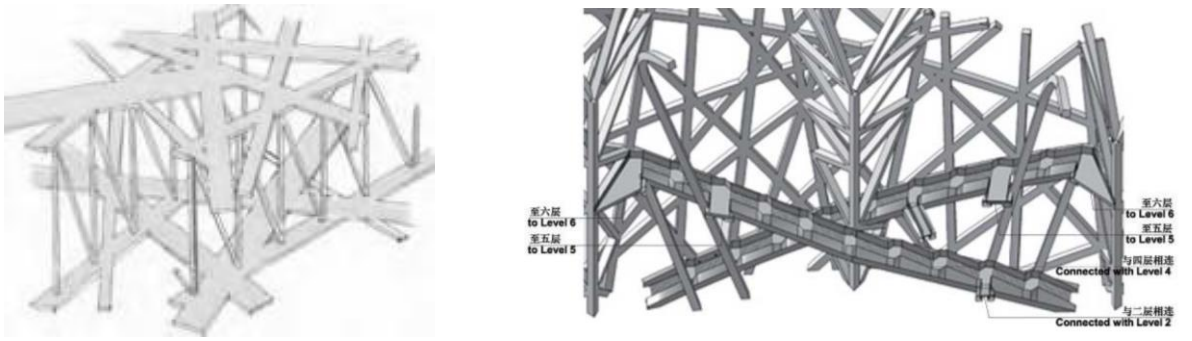



Figure 3 — évolution de l'organisation de la structure et de son épaisseur (dessins tirés de Burrows, 2009, p. 4; Marquez Cecilia & Poveda, 2013, p. 142)

— L'ensemble « enveloppe + bol » est sujet à des décisions concernant le confort des spectateurs. Le nid d'oiseau renvoie à cette idée de confort par sa fonction de protection des œufs. Il informe la conception avec l'idée de microclimat en suggérant une structure ouverte au travers de laquelle l'air circule librement. Certains ajustements ont été nécessaires lors de la mise en commun du bol et de l'enveloppe pour maintenir l'effet de microclimat, notamment 6 mètres d'écart sont ajoutés entre le siège le plus haut et la couverture pour éloigner les spectateurs de la couche d'air chaud (Yin, 2009, p. 39).

[9] L'idée d'épaisseur semble être déjà présente dans les idées précédentes, mais celle-ci est alors organisée par une structure secondaire de triangulation régulière qui lie les deux couches de grilles de manière aléatoire (cf. fig.2 in Burrows, 2009, p. 4). Le nid d'oiseau amène l'idée que l'épaisseur elle-même est organisée selon les mêmes principes aléatoires que celle de la grille et donc avec des éléments égaux.

**La recherche d'un système multifonctionnel, une préoccupation générale de l'agence**

Il faut souligner un aspect particulier de la conception des architectes Herzog & de Meuron qui consiste à chercher une réponse aux différents enjeux qu'ils se donnent par le moyen d'un système multivalent. Il s'agit d'un phénomène général dans la conception architecturale qui a été désigné par Philippe Boudon sous le terme de multi-objet (Boudon, 2004, p. 57-58), c'est-à-dire un objet travaillé selon plusieurs points de vue et répondant à des considérations diverses. Cependant, la particularité du cas du *Bird's nest*, réside dans le fait que les architectes ce concentrent sur un seul multi-objet a valeur globale plutôt que d'en assembler plusieurs. De plus, le système qu'ils se donnent est d'abord un système structurel avant d'être multifonctionnel.

Ce type de travail de conception est à l'œuvre dans des projets de la même époque tel que le parking multifonctionnel de Lincoln Road, à Miami Beach (n°279, commencé en 2005) au sujet duquel les architectes établissent un lien explicite avec le projet de Pékin[10]. Ce projet procède d'une recherche de simplification par la structure qui « fait tout ». Elle organise des sous-espaces, permet au bâtiment de tenir, génère de l'ombrage, permet aux voitures de se ranger, *etc*[11]. Les autres éléments ne s'intégrant pas dans le système, mais restant néanmoins nécessaires, sont alors ajoutés comme des éléments secondaires (à Lincoln Road les garde-corps sont en verre pour s'effacer devant les piliers en béton).

À cela s'ajoute une autre idée récurrente du travail des architectes, celle d'un travail sur une couche intermédiaire qui ne fonctionne pas seulement comme une limite mais qui génère une profondeur dans laquelle se développe des usages (Marquez Ceclilia & Levene, 2006, p. 350). L'espace périphérique du stade incarne ainsi cette profondeur habitable : « in this piranesian space, people get together in restaurants, bars, hotels and shops, or on the platforms and the criss-crossing horizontal, diagonal and vertical paths of access. This space surrounding the interior of the stadium, is façade, structure, decoration, and public space all in one » (Marquez Cecilia & Poveda, 2013, p. 128). La possibilité d'usage généré par cet espace permet également, selon les architectes, une utilisation future de l'édifice après les Jeux Olympiques. Ainsi, l'idée du nid d'oiseau s'intègre dans un réseau de préoccupations qui la précède très largement, au niveau du projet de stade lui-même, mais aussi, au niveau de la production de l'agence, elle doit s'adapter à ces ensembles de valeurs et d'idées.

Après l'intervention de l'idée du nid d'oiseau, le processus de conception continue en faisant intervenir plusieurs autres considérations, dont certaines interagissent avec l'idée du nid :

L'enveloppe, en particulier, est retravaillée. D'une part, sa fonction va être enrichie pour devenir une épaisseur multifonctionnelle. Ai Weiwei introduit ici de nouvelles considérations relatives à la culture chinoise. Notamment, le fait que l'espace public est un lieu de rencontre et de socialisation important en Chine et que la couleur rouge symbolise la chance. Cela oriente la conception de cet espace intermédiaire défini par l'enveloppe et traité comme un espace public[12] : l'aspect poreux du nid d'oiseau est alors conservé. L'enveloppe va ainsi accueillir les circulations et le bol va être prolongé sur sa surface extérieure par des paliers sur lesquels sont placées différentes activités conçues avec un traitement de surface rouge.

[10] « So suddenly this kind of structure has been, through that project and through the Beijing's birdnest, being pushed to radical extreme » (Herzog, 2011).

[11] Dis plus généralement : « The form, and the structure and the ornament is coinciding. Every single element is all three of those things hold things in place, defines a space and is part of an ornament not as an idea of a decoration but as an idea of a holistic idea of a building. » (Herzog, 2015).

[12] La référence à la tour Eiffel est mentionné par Herzog (2006, p. 31) mais pas sa pertinence.

D'autre part, des opérations de simplification sont à l'œuvre[13]. La complexité de la grille désordonnée est réduite à quatre portiques continus situés aux tangentes de l'ouverture du toit et trois sortes de tubes assemblés en cinq types de modules (Marbach et al., 2019). La structure est également rationalisée en définissant une trajectoire pour la descente des charges selon des demi-portiques réguliers assemblés de manière tridimensionnelle et reposant sur les vingt-quatre piles prédéfinies. Une structure secondaire se distingue de ces portiques. Elle est présente uniquement sur la surface externe et permet non seulement de réintroduire l'effet aléatoire mais aussi de former les modules pré-assemblés. Une troisième structure est encore distinguée pour les escaliers (Burrows & Simpson, 2009, p. 16-17).

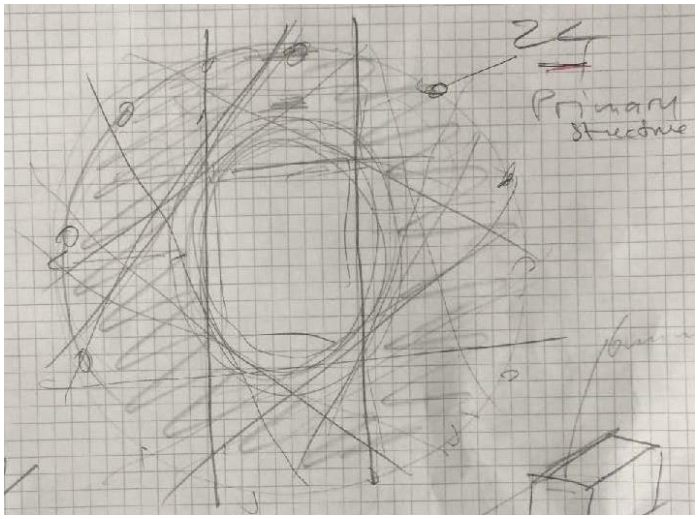



Figure 4 — Rationalisation de la structure (dessin réalisé de Marbach et al., 2019)

La taille des éléments est établie à 1,2 x 1,2 m en fonction de la charge. Selon les principes retenus pour la grille, tous les éléments (primaires, secondaires et tertiaires) ont une section identique. Toutefois, pour abaisser les coûts, certains éléments secondaires, non visibles depuis l'espace public, sont ensuite abaissés à une section de 1 m (Lam & Lam, 2009, p. 21).

Enfin, l'enveloppe définie avant tout par sa porosité (l'espace entre les lignes de la grille est laissé vide) va être partiellement couverte pour répondre à de nouveaux enjeux. Deux types de revêtement vont être imaginés sous forme de membranes semi-transparentes qui s'intègrent comme des panneaux remplissant certains vides entre les lignes de la grille, situés principalement en partie haute. Pour des raisons météorologiques (protection contre la pluie et le vent), des membranes d'ETFE (tétrafluoroéthylène) sont ajoutées sur la surface extérieure. Ainsi, pour des raison de conforts (acoustique et ombrage), des membranes de PTFE (polytétrafluoroéthylène) sont ajoutées sur la surface intérieure (Choi, 2009, p. 36). Le choix de ce type de matériaux est déterminé par sa légèreté, son coût peu élevé et sa qualité translucide (Marbach et al., 2019). Par rapport à une première version de ce revêtement, la présence des membranes a néanmoins été réduite pour garantir la ventilation naturelle et maintenir l'effet de microclimat (Yin, 2009, p. 39).

[13] Nous laissons ici de côté des opérations de représentation, pour lesquelles des logiciels notamment paramétriques ont été certes d'une grande utilité (cf. Burrows & Simpson, 2009, p. 16-17). Ainsi des études pourtant sur le dessin de la géométrie complexe (voir par ex. Nestorovic et al., 2012) apportent des précisions géométriques, mais passent à côté de l'invention des formes pour traiter de la représentation de formes déjà stables sans expliquer leurs pertinences. Si ces questions de représentations ont leur importance pour la réalisation du projet elles ne regardent pas directement le processus cognitif de conception sauf dans le cas d'effets de rétroaction sur la conception. Il manque ici des données précisément datées du processus pour identifier ces éventuels allers-retours.

## III. La conception du '*Bird's nest*' — modélisation architecturologique

Dans cette partie, nous présenterons une modélisation de la conception du *Bird's nest* à partir des données précédentes et à l'aide des concepts architecturologiques[14]. À nouveau, cette modélisation se concentre sur le moment où intervient l'idée du nid d'oiseau.

### Préalables

Lorsqu'intervient l'idée du nid d'oiseau, l'espace de conception est déjà préalablement structuré. Une échelle de niveau de conception est notamment intervenue comme méta-échelle d'une échelle technique (structure) suscitée par un espace de référence géographique (risques sismiques de la région). Elle a engendré un découpage en deux niveaux de conception : le bol et l'enveloppe. Ce découpage est surdéterminé par une opération de coopération (partage de tâches effectuées en parallèles[15]). Ces deux niveaux sont déjà en partie mesurés par différentes échelles. On retiendra que le niveau « enveloppe » est déjà défini comme une surface externe lisse selon une échelle de visibilité qui a pour pertinence d'éviter l'impact invasif de mâts ou autres excroissances dans la ville.

### Amorçage de l'échelle de modèle naturel

Un certain enchainement d'opérations va induire le recours au nid d'oiseau. Une opération de référenciation socio-culturelle est d'abord à l'œuvre, elle a pour pertinence une recherche d'ancrage dans le lieu et la culture. Les architectes suisses sont conscients de leur position d'étrangers en Chine, du déracinement culturel que représente une agence internationale et du qualificatif « starchitectes » qui leur est parfois attribué[16]. Ils cherchent donc des moyens d'éviter ce déracinement. Du point de vue collaboratif, le rôle même de leur collaboration avec l'artiste Ai WeiWei dans les projets en Chine[17] peut être compris comme relevant de cette pertinence culturelle.

Deux modèles vont alors être pris comme référence pour la conception : les céramiques chinoises et les *gongshi*. De ces modèles sont découpées seulement certaines dimensions retenues pour être répétées dans le projet : un réseau de lignes s'entrecoupant de manière aléatoire ou chaotique. Cette grille suit, dans le cas des céramiques, une surface courbe. (Dans le cas des *gongshi*, ces lignes sont tridimensionnelles, mais cela ne semble pas être retenu à ce stade). Ces dimensions sont pertinentes d'un point de vue technique (la grille forme une structure) et de visibilité (effet perceptif produit). Il y a donc déjà une échelle de modèle à l'œuvre.

[14] La modélisation proposée ici est donc relative, elle ne saurait prétendre à une vérité absolue. Avec d'autres données sur ce processus de conception la modélisation pourrait être différente.

[15] Plus précisément il s'agit d'une opération pragmatique de découpage selon la terminologie de Samia Ben Rajeb mise au point pour la modélisation des activités de conception collaboratives (2012, p. 208).

[16] Au sujet des polémiques qu'on engendrés les grands projets internationaux en Chine et leur liens paradoxaux à l'expression d'un nationalisme voir l'article de Ren (Ren, 2008). Néanmoins, ce type de recherche ne s'attache néanmoins pas à l'activité cognitive de conception dont résultent les objets des polémiques étudiées.

[17] Herzog & de Meuron collaborent avec Ai Weiwei en 2005 sur un autre projet chinois la Beijing Film Academy, de Qingdao (n°269).

### Échelle de modèle naturel

L'idée de nid d'oiseau ne vient pas (contrairement à celles des céramiques et des *gongshi*) de l'exploration intentionnelle d'un espace de référence. L'aspect fortuit de l'apparition de ce modèle est en fait produit de l'interaction entre l'espace de conception et l'espace de représentation et s'explique par un phénomène sémiotique. Les modèles de céramiques et de *gongshi*, une fois abstraits sous la forme graphique de lignes irrégulièrement organisées permet un glissement référentiel : l'abstraction du représentant graphique rend possible le passage d'un représenté [craquelure du vase] un autre représenté [brindille d'un nid]. Il y a là un effet de ce qui peut être désigné comme une vicariance de signe (Boudon, 2019), soit un signe qui est pris pour un autre, phénomène courant dans la conception architecturale[18]. C'est donc, avant tout, selon un axe métonymique que le nid d'oiseau est suscité. En ce sens, c'est un espace de référence géométrique qui est exploré. Un espace qui regroupe toutes sortes de trames et de grilles irrégulières. Au sein d'un tel espace on trouverait également les modèles que sont les « mikados », les « spaghettis » ou encore, pour donner un exemple naturel, les « coraux *Annella mollis*, de la famille *Subergorgiidae* des Gorgones ». Toutefois, il ne faut pas exclure le rôle éventuel d'un axe métaphorique qui peut être reconnu dans un jeu de proximité sémantique liant « céramique » et « bol » qui sont des « contenants alimentaires » pouvant contenir des œufs, de même qu'un « nid ».

Le nid, est retenu comme modèle en raison de plusieurs pertinences : il correspond à la recherche de grille de l'enveloppe (échelle optique), il s'apparente topologiquement à la forme du bol (échelle géométrique) et il suggère un confort particulier (échelle fonctionnelle).

De ce modèle sont découpées seulement certaines dimensions retenues pour être répétées dans le projet. Mais certaines de ses dimensions sont déjà le résultat des mesures attribuées par l'échelle de modèle des craquelures de céramique. Il s'agit donc plutôt d'abord d'une sorte de correspondance ou de confirmation. Parmi les dimensions mesurées confirmées, se trouvent celle d'une grille constituée de lignes droites se croisant aléatoirement.

À ces dimensions s'ajoutent de nouvelles dimensions que sont la répétition d'éléments semblables, la porosité et la tridimensionnalité de la grille (par rapport aux craquelures de céramique qui se développent en surface), cela conduit notamment à l'idée que les éléments constituants la grille sur sa surface extérieure et ceux pris dans l'épaisseur sont du même matériau et ont la même section. La pertinence « microclimat » vient également préciser la pertinence « confort thermique » déjà présente et découpe les dimensions que sont la porosité de la grille : le fait que des vides soit laissés et permettent la ventilation.

Le niveau dans lequel est importée cette trame est défini par la forme lisse et continue de l'enveloppe déjà déterminée. Il n'y a pas réellement de rétroaction de l'importation du modèle sur le niveau dans lequel il est importé sinon qu'il l'épaissit vers l'intérieur.

### Échelles consécutives

Le modèle du nid d'oiseau n'est pas autosuffisant, pour être embrayé plus avant, il doit être opéré par de nouvelles échelles qui opèrent selon différents moments de conception :

L'enveloppe va être définie par un enchainement d'échelles techniques et fonctionnelles se relayant. Une échelle technique, est d'abord nécessaire puisque le matériau du nid d'oiseau

[18] Philippe Boudon, dans son article, discute le cas de signes symboliques pris pour des signes indiciels (suivant la terminologie peircienne des types de signes). Ici entre les craquelures et les brindilles, il s'agit de deux signes indiciels.

n'est pas retenu comme une dimension pertinente répétée. Une structure en acier soudé est alors choisie selon des pertinences non explicitées par les données. Une échelle économique va opérer selon la pertinence consistant à simplifier la complexité de la grille en un système constitué de modules répétés et donc plus facilement constructible. Il aboutit à la définition de demi portiques réguliers, d'une différenciation entre structure primaire et secondaire et de cinq types de modules. Une échelle technique va déterminer le dimensionnement des éléments de la grille suivant la pertinence de sa solidité mais également selon la pertinence issue du nid d'oiseau qui veut que tous les éléments soit identiques (les éléments font 1,2 m de section). Une échelle économique intervient néanmoins par la suite pour abaisser à 1 m la section de certains éléments. Les éléments à diminuer sont choisi selon une échelle technique (éléments de la structure secondaire) et optique (éléments non visibles depuis l'espace public).

Un autre moment de conception va consister en la surdétermination[19] de l'espace intermédiaire entre la façade et le stade. Une échelle de niveau de conception va d'abord découper l'« épaisseur » comme niveau à part entière, c'est-à-dire la partie de l'enveloppe externe (façade et début du toit) et la partie externe du bol (derrière les gradins). Une échelle fonctionnelle va y positionner les escaliers et des paliers dimensionnés pour des usages en lien avec des activités. La pertinence du confort lié au microclimat conduit au découpage des activités en unités autonomes espacées. Une échelle socioculturelle intervient suivant la pertinence de l'espace public en Chine Elle conduit à maintenir l'ouverture de la façade et dimensionner les espaces pour permettre la rencontre. Une échelle d'extension considère le futur de l'édifice après les Jeux Olympiques et surdétermine la création d'espaces pour des activités (hôtellerie, restauration) donnant au stade une valeur pour le futur. Une échelle symbolique formelle est suscitée par l'espace de référence culturel. Elle conduit au choix de la couleur rouge, symbole de la chance (pertinence liée aux Jeux Olympiques). Une pertinence optique vient préciser le dimensionnement des colonnes portant le bol en les inclinant. Cette pertinence issue du modèle du nid d'oiseau agit ainsi de manière globale.

Par ailleurs, deux niveaux de conception vont être découpés pour la couverture de l'enveloppe, selon deux pertinences principales : géographique pour le niveau extérieur et acoustique pour le niveau intérieur. L'ordre ou les modalités de ce découpage ne sont pas explicités par les données considérées. Une échelle géographique considère les intempéries éventuelles (pluie et vent) et détermine la couverture de la partie haute et extérieure de l'enveloppe. Cette échelle s'associe à une échelle fonctionnelle (créer de l'ombrage sans être tout à fait opaque), une échelle technique (légèreté pour éviter la surcharge de la structure dont le dimensionnement a déjà été abaissé pour des raisons économiques) et une pertinence économique qui induit une échelle économique (faible coût du matériau de couverture) conduisant au choix des membranes en ETFE et en PTFE. Une échelle fonctionnelle considèrant le confort acoustique et l'ombrage des spectateurs, conduit à la détermination d'une couverture intérieure en PTFE. Des échelles techniques définissent ensuite, plus précisément, les modules et leur système de fixation. Un changement de niveau de conception ultérieur conduit à l'ajustement de la quantité de parties couvertes pour en supprimer certaines et permettre la ventilation selon la pertinence du microclimat.

Enfin, un autre changement de niveau de conception, considère les niveaux « bol » et « enveloppe » ensemble. Une échelle fonctionnelle ajuste leur position respective en surélevant l'enveloppe de 6 m. Cette échelle est motivée par la pertinence du microclimat.

[19] La surdétermination définit la mise en œuvre conjointe de plusieurs échelles sur une même dimension ou niveau regroupant des dimensions. La surdétermination conduit à la production de multi-objet.

Cette modélisation peut être résumée par la figure suivante :

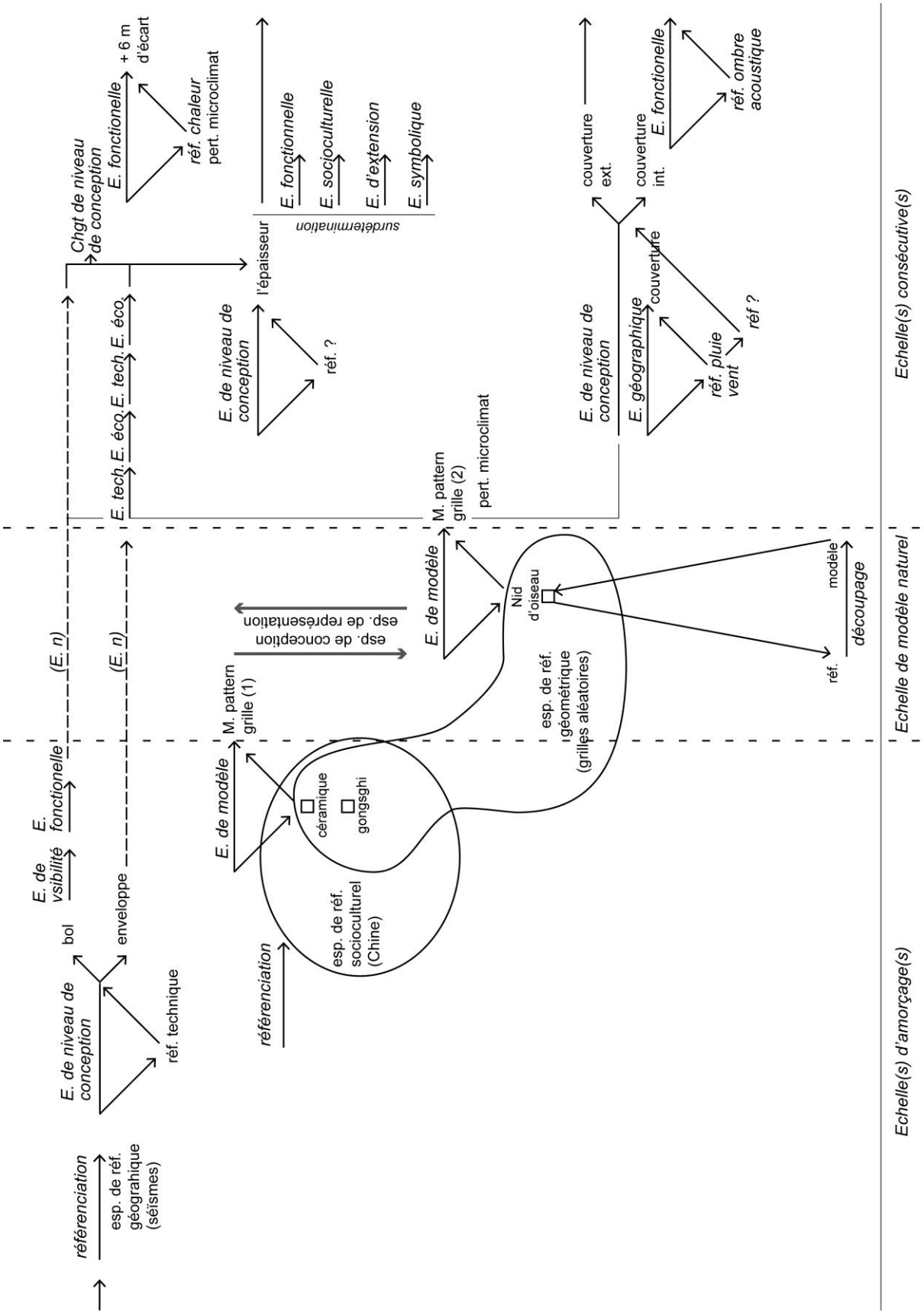



Figure 5 — résumé de la modélisation de l'intervention du nid d'oiseau dans la conception du stade olympique de Pékin (schéma L.Vitalis)

## IV. Généralisation - un modèle de la conception architecturale biomimétique

Dans cette partie, nous généraliserons le modèle en partant de l'idée russellienne que la généralisation procède par transformation des constantes en variables. Il s'agit de produire un modèle architecturologique du raisonnement de conception architecturale biomimétique qui soit détaché du cas du *Bird' nest* et qui par son abstraction puisse s'appliquer à différents cas existants ou à venir.

Une telle tentative de généralisation est bien sûr perfectible et mériterait d'être amendée. Ceci entendu, il faut néanmoins s'affranchir de l'idée que la limite de cette généralisation tient au fait qu'elle opère à partir d'un seul cas et reposerait sur une base empirique insuffisante. Deux arguments s'opposent à cette limitation :

— D'une part, la généralisation n'opère pas à partir d'un seul cas. En mobilisant le modèle architecturologique dans sa conceptualisation actuelle, nous avons recours aux résultats de cinquante années de recherche architecturologique au cours desquels de nombreux cas de conception architecturale ont été considérés. Ainsi, la liste des classes de pertinence des échelles a été constituée par une exploration empirique, *a posteriori*, des activités des architectes, et ces résultats empiriques peuvent être mobilisés pour cette étude.

— D'autre part, l'idée d'une nécessité de plus de cas empiriques rencontre le problème de l'induction : conclure d'une série d'observations particulières répétées à la vérité générale du phénomène pose la question des justifications ou de la preuve de cette conclusion. Sans rentrer dans les détails ici, notre position sur ce point est que l'idée selon laquelle il faudrait toujours plus de cas pour pouvoir généraliser correctement est un leurre. Une autre approche consiste dans un travail *a priori*, détaché dans un premier temps du souci de la représentation du réel. L'architecturologie, à ses débuts principalement, a été en partie construite comme un modèle *a priori* ainsi que l'a argumenté Philippe Deshayes (1984). Le travail d'abstraction et de conceptualisation systémique du modèle architecturologique tend ainsi à sa généralité et permet des applications à des cas de conception contemporains ou historiques, à des programmes ou situations géographiques diverses.

Remarquons que les modalités *a priori* et *a posteriori* ne sont pas deux modalités de la recherche absolument séparées, mais que leurs interactions enrichissent la recherche (voir sur ce point les analyses du cours de Tiercelin, 2012). Ainsi, architecturologie appliquée et architecturologie fondamentale se nourrissent l'une l'autre[20].

### Des constantes aux variables

Pour procéder à la généralisation, il faut identifier les constantes du modèle pour envisager ensuite comment les transformer en variables. Cela peut être envisagé d'un point de vue qualitatif et quantitatif :

Qualitativement, il faut considérer les types de classes de références mobilisées dans le cas particulier du '*Bird's nest*'. Le fait qu'une échelle fonctionnelle soit mobilisée à telle ou telle

[20] C'est ce qui est à l'œuvre dans cette étude qui conjoint un travail d'architecturologie fondamentale (cf. Annexe) prolongeant la visée de généralité du modèle par quelques amendements et permet un travail d'architecturologie appliqué au cas du '*Bird's nest*' qui suscite et nourrit en retour des questions fondamentales.

étape relève d'une occurrence particulière propre à ce processus de conception. Le qualificatif « fonctionnelle » peut être considéré comme une constante. Dans ce cas on généralise une « échelle fonctionnelle », mobilisée à telle ou telle étape du processus en la remplaçant par une « échelle *x* » où « *x* » est une variable. « *x* » peut prendre la valeur d'une classe de référence parmi la liste des classe de références [ *technique ; fonctionnelle ; symbolique dimensionnelle ; symbolique formelle ; de voisinage ; parcellaire ; géographique ; de visibilité ; optique ; socioculturelle ; de modèle ; sémantique ; d'extension ; économique ; géométrique ; cartographique ; de représentation ; de niveaux de conception ; globale ; humaine* ][21].

Quantitativement, il faut considérer la succession d'échelles plus ou moins nombreuses qui est à l'œuvre à différents moments de conception. Le fait qu'un moment de conception peut être constitué de nombre plus ou moins grand d'échelles, ou qu'une échelle suscite plus ou moins d'enchainements consécutifs, peut être attribué à la contingence du processus de conception particulier, contingence qui structure l'espace de conception avec des pertinences et des niveaux particuliers. Le fait que plusieurs échelles techniques et fonctionnelles s'enchainent dans la mise à l'échelle du modèle du nid d'oiseau au niveau de l'enveloppe peut être considéré comme une constante de la modélisation du '*Bird's nest*' d'Herzog & de Meuron. Nous proposons de regrouper ces échelles en moments de conception qui peuvent contenir un nombre variable d'enchainement. On substitut donc « échelle *x* > échelle *y* > échelle *z* » par « une.des échelle(s) *x* ». La délimitation de ces moments de conception ne ressort pas d'une nécessité, mais de la focalisation propre à cette étude concernant le biomimétisme. Les moments sont donc découpés par rapport au problème particulier travaillé ici, l'intelligibilité de l'échelle de modèle naturel.

**Un modèle du raisonnement de conception architecturale biomimétique**

Notre proposition consiste en un modèle qui distingue trois moments de conception principaux :

Une.des échelle(s) d'amorçage(s) : il s'agit des opérations qui suscitent l'échelle de modèle naturel, elles mettent en place des niveaux de conception au sein desquels des modèles naturels vont pouvoir être répétés, des pertinences qui motivent l'importation de ces modèles et des espace de référence au sein desquels ces modèles vont pouvoir être retenus.

Une échelle de modèle naturel : il s'agit de l'opération de répétition à proprement parler qui sélectionne une référence naturelle dans un espace de référence qui peut contenir d'autres types de références également naturelles. Elle constitue la référence en modèle en découpant des dimensions pertinentes selon une.des échelle(s). Ces dimensions sont ensuite répétées dans un niveau de conception avec lequel elles s'ajustent réciproquement.

Une.des échelle(s) consécutive(s) : Il s'agit des opérations qui sont suscitées par la répétition du modèle naturel. Le modèle naturel ne pouvant être suffisant pour produire une architecture consistante, d'autres embrayages sont nécessaires. Ces nouvelles échelles engagent le modèle naturel dans la complexité de la conception architecturale.

Ce modèle peut être représenté sous la forme du schéma suivant :

[21] Nous nous basons ici sur la liste la plus commune (Boudon et al., 1994/2000, p. 167-186). D'autres classes peuvent venir compléter cette ainsi celles été proposées par Caroline Lecourtois (2004). De nouvelles classes peuvent voir le jour tant qu'elles s'accordent aux classes existantes selon le principe du rasoir d'Ockham et qu'elles démontrent leur pertinence.

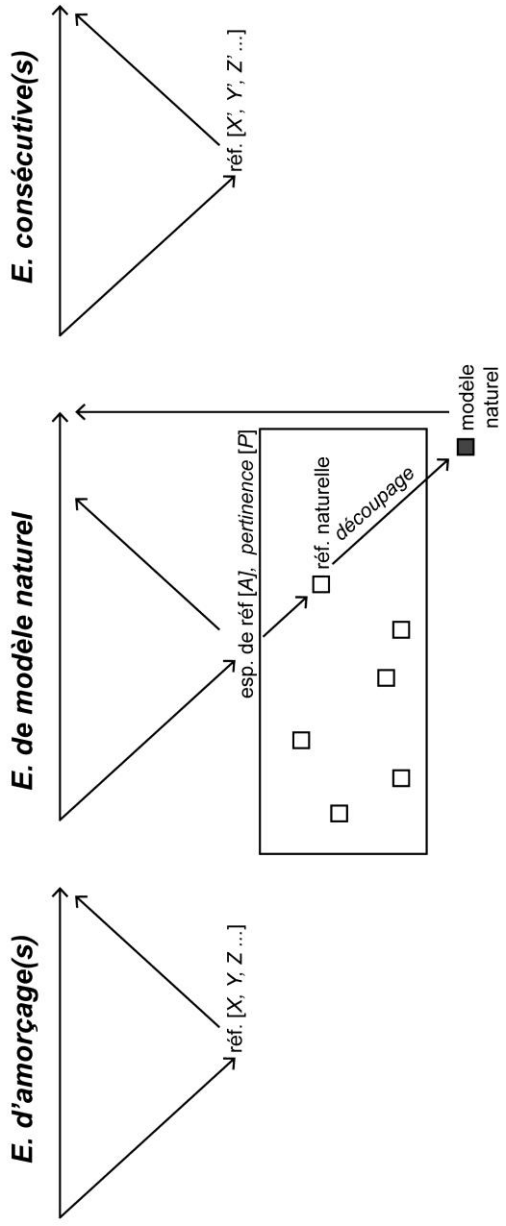



Figure 6 — proposition d'un modèle du raisonnement de conception architectural biomimétique (schéma L.Vitalis)

**Points d'attention particuliers**

Dans le cadre de la recherche BiomimArchD et de ses objectifs d'instrumentation de la conception architecturale biomimétique, il semble opportun d'indiquer maintenant certains points auxquels rester attentif. Notamment, et nonobstant cette proposition de généralisation, des considérations empiriques induisent l'idée que certaines variables ne sont pas toujours aussi radicalement variables. Dans ce cas, il y aurait des sortes de constantes résiduelles qui pourraient être réintroduites dans le modèle, car fonctionnant comme des nécessités *a posteriori*. Les autre points concernent plutôt des préconisations au regard de la pertinence d'un outil d'aide à la conception architecturale biomimétique. Elles invitent à opérer un déplacement des objets conçus vers l'espace de conception, c'est-à-dire à un moment donné où l'objet n'existe pas encore, dans une situation de flou où les possibilités sont ouvertes et les choix contingents.

Échelle(s) d'amorçage(s) : le fait qu'une échelle socio-culturelle soit mobilisée dans le cas du '*Bird's nest*' peut être ramené à une situation de conception plus générale, celle de la conception de projets internationaux à l'ère de l'architecture mondialisée et de sa critique. C'est un cas particulier de conception biomimétique, mais il n'est pas anodin qu'il touche également un autre cas du corpus considéré par la recherche BiomimArchD : l'Esplanade Théâtre de l'architecte anglais Michael Wilford à Singapour dont la conception se base sur un modèle du Durian, fruit très apprécié dans la culture singapourienne. La présence d'une référenciation à un espace de référence socio-culturel peut donc être suspectée dans ce type de situation où le concepteur et le site sont distants. Cela ne reste néanmoins pas une nécessité forte.

Il est donc important de comprendre les motivations du recours à un espace de référence au sein duquel un modèle éventuellement naturel est retenu. Un architecte ne s'inspire pas d'un animal ou d'une plante sans raison. Ce sont ces raisons qui importent et qui font la pertinence de tel modèle naturel par rapport à un autre qui pourrait n'avoir aucune pertinence. C'est aussi en raison de cette pertinence qu'un modèle non-naturel peut être tout aussi pertinent que le modèle naturel. Si l'on s'intéresse à un fruit pour des raisons *X* (socioculturelles, par exemple), il faut, pour instrumenter le concepteur, repartir du *X* quitte à ne plus retrouver un fruit, mais un insecte… (rappelons que dans le cas du '*Bird's nest*', le nid d'oiseau semble être tout aussi pertinent que la céramique ou les *gongshi* du point de vue socioculturel. Du point de vue géométrique, il est tout aussi pertinent que les mikados, ou les coraux *Annella mollis*).

Cette attention portée à l'espace de référence au sein duquel le modèle naturel est retenu peut être développée aussi à partir d'une distinction architecturologique. L'échelle de niveau de conception qui découpe le niveau au sein duquel le modèle naturel est ensuite répété peut avoir deux caractéristiques : elle peut-être arbitraire (pertinente pour la conception et non pour l'espace conçu) ou être une méta-échelle (mobilisée par une autre échelle).

Le cas d'architectures volontairement biomimétiques[22] peut être considéré comme un cas d'échelle de niveau de conception arbitraire, car l'espace de référence qui induit la recherche d'un modèle est déjà par défaut centré sur la nature. Or la pertinence de cet espace de

[22] Nous pensons par exemple aux pavillons produits de la collaboration entre l'Institut for Computational Design (CIM) et l'Institut des structures de construction et de conception structurelle (ITKE) à l'Université de Stuttgart. Ces pavillons sont des cas tout à fait singuliers car il semble aussi qu'ils ne découpent pas de niveau de conception au sein du projet, mais que l'entièreté de l'objet architectural sert de niveau pour la répétition du modèle naturel. Cela est rendu possible par la faible complexité des projets et des programmes mais en fait ainsi un cas éloigné de la pratique courante des architectes.

référence est alors arbitraire, en ce sens que ce n'est pas une pertinence pour l'espace architectural mais pour l'espace de conception[23]. Ces cas sont des cas particuliers car ils postulent *a priori* l'intérêt de la reprise de modèles naturels dans l'espace architectural sans que cet intérêt émerge au cours du processus de conception lui-même. L'intérêt de la reprise de modèles naturels porte sur le processus de conception lui-même, non sur ces produits. Il est en quelque sorte postulé que recourir à des modèles naturels (« faire du biomimétisme ») est une valeur en soi ou générale. Ce n'est que dans un second temps que les modèles naturels envisagés devront trouver une pertinence pour l'espace architectural.

À rebours de ce cas particulier, le cas plus général veut que l'espace de référence d'amorçage de l'échelle de modèles naturels ne soit pas d'abord centré sur la nature, mais sur une classe de référence particulière qui recoupe des références naturelles et des références non-naturelles. C'est en fonction de la pertinence de cet espace de référence pour l'espace architectural qu'un modèle naturel est susceptible d'être retenu. Pour l'instrumentation de la conception, c'est donc au type de destinataires et à leurs pratiques qu'il faut être attentif.

Par ailleurs, le cas du '*Bird's nest*' pointe une ressource importante de la conception : l'interaction entre l'espace de représentation et l'espace de conception. Si le fait que l'architecte représente ou non ce qu'il conçoit est contingent et appartient à ses habitudes et à son style de conception. Néanmoins, le fait de représenter ce qui est conçu est un ressort pour la conception qui permet d'envisager autrement l'objet conçu. Herbert A. Simon reprenant un thème leibnizien radicalise cette idée ainsi : « résoudre un problème signifie simplement : le représenter de façon à rendre sa solution transparente » (1969–1996/2004, p. 237)[24]. Sans souscrire à cette radicalisation, les allers-retours entre conception et représentation sont un facteur à ne pas négliger dans l'adoption d'un modèle naturel. Il pourra donc être pertinent, pour l'instrumentation de la conception, de recourir à des représentations graphiques des modèles naturels et éventuellement de regrouper ses représentations selon des pertinences graphiques. Ce faisant, il faudra garder à l'esprit les phénomènes de vicariance de signes, selon lesquels des représentations peuvent être prises pour autre chose qu'elles ne sont et des signes symboliques pour indiciels (un diagramme de relation pour une coupe par exemple).

Échelle de modèle naturel : au sein de l'opération du découpage du modèle, c'est-à-dire de sélection des dimensions pertinentes à répéter, plusieurs échelles peuvent intervenir mais il semblerait qu'une échelle fonctionnelle ai quelque nécessité. Cette échelle considérant l'habitabilité[25] du projet induira généralement que la taille ne puisse pas être retenue comme dimension à répéter du fait que les espèces naturelles sont, en général, plus petites que les édifices (des exceptions peuvent bien sûr être envisagées) [26].

[23] On pourrait parler de méta-pertinence dans ce cas où la pertinence ne vise pas l'architecture mais le processus qui la produit.

[24] Dans une édition antérieure, la proposition moins radicale ajoutait : « résoudre un problème signifie simplement : *le représenter autrement*, le représenter de façon à rendre sa solution transparente ».

[25] Pour être théoriquement rigoureux, il faut reconnaître que l'habitabilité n'est pas une pertinence nécessaire de la conception architecturale. Elle n'est pas toujours primordiale. Pour citer un exemple, le travail de Peter Eisenman, Jacques Derrida et Bernard Tschumi attaché à l'idée de déconstructivisme mérite d'être considéré.

[26] Nous nous écartons ici de l'interprétation de Dominique Raynaud décrivant la conception des architectes de l'atelier Zô comme mettant à l'échelle des formes d'animaux (cœlacanthe, éléphant dans les exemples pris) selon une échelle fonctionnelle qui agrandit ces modèles (Raynaud, 2002, Chapitre 5). Il nous semble plus juste d'indiquer que l'échelle de modèle intervient avant, dès la sélection des traits pertinents du modèle plutôt qu'après la répétition de ce modèle.

Échelle(s) consécutive(s) : les modèles naturels n'étant pas autosuffisants pour constituer de l'architecture, d'autres embrayages sont nécessaires et engageront le modèle naturel dans la complexité de la conception architecturale. Parmi lesquels une échelle technique semble avoir quelque nécessité. La nécessité de cette échelle découle du fait que la taille ne soit pas retenue comme dimension répétée en raison d'une échelle fonctionnelle. Si la taille change, quand bien même le matériau serait retenu comme dimension répétée (ce qui semble improbable étant donnée la différence entre les modalités de production de la nature et du bâtiment), la structure devra faire l'objet d'adaptations pour conserver sa solidité. Galilée exprimait clairement cette idée au sujet des os :

> « Pour illustrer brièvement ce que je dis, j'ai représenté un os dont la longueur a été augmentée trois fois seulement, mais dont l'épaisseur a été accrue de telle façon qu'il puisse remplir pour un animal de grande taille la même fonction que le plus petit pour un petit animal ; voici les figures sur lesquelles vous remarquez comment l'os agrandi acquiert une forme disproportionnée. Il apparaît donc clairement que, si l'on voulait conserver chez un géant particulièrement grand la proportion qu'ont les membres chez un homme ordinaire, il faudrait ou trouver une matière bien plus dure et plus résistante pour en constituer les os, ou admettre que sa robustesse serait proportionnellement beaucoup plus faible que celle des hommes de taille médiocre ; sinon, à augmenter sans mesure sa hauteur, on le verrait plier sous son propre poids et s'écrouler » (Galilée, 1995, p. 106-107).

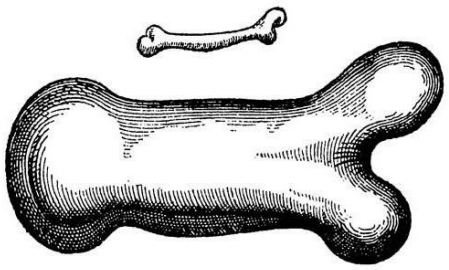


Figure 7 — L'augmentation de taille d'un os conservant ses propriétés structurelle ne serait être proportionnelle (Galilée, 1995, p. 106-107)

## V. Annexe – formalisation architecturologique de l'échelle de modèle

0. L'échelle de modèle en architecturologie n'est pas décrite formellement dans les termes des concepts de la mesure (référence, dimension, pertinence) ni dans les termes des opérations constitutives de l'échelle (découpage, référenciation, dimensionnement). La question de la formalisation de l'échelle de modèle doit donc être posée pour pouvoir engager un travail d'architecturologie appliquée ou de modélisation.

0.1. Pour ce faire, il est proposé de raisonner sur les concepts et définitions architecturologiques tout en s'aidant de l'exemple la pyramide du Louvre de l'architecte Ieoh Ming Pei qui peut être compris comme un cas d'échelle de modèle, où le modèle repris au Louvre est celui de la Pyramide de Khéops. Par hypothèse, ce cas peut être décrit *a minima* par les opérations suivantes :

0.1.1. Au préalable une référenciation de type socioculturel et en lien avec les collections du Louvre, fait émerger la référence à l'Égypte ancienne. Cette échelle est toutefois considérée comme étant antérieure à l'échelle de modèle qu'il importe de décrire ici.

0.1.2. La pyramide de Khéops, un objet de l'histoire de l'architecture, est importée, c'est-à-dire qu'elle est prise comme modèle, certaines dimensions ou certains traits distinctifs sont retenus dans la pyramide de Khéops (sa forme, ses proportions, mais pas sa matière ni sa taille par exemple) pour être transportés au Louvre. Cette importation a une pertinence, symbolique par exemple qui peut être celle la rencontre de deux cultures éloignées par leurs monuments.

0.1.3. Ensuite, d'autres échelles interviennent pour achever de mettre à l'échelle ce modèle. Une échelle symbolique dimensionnelle pour que la pyramide soit plus petite que le Louvre. Une échelle optique pour la transparence de la pyramide. Une échelle technique pour tenir le verre. Ces opérations sont consécutives à l'échelle de modèle qu'il importe de décrire ici.

1. L'échelle de modèle est notamment définie comme « copie pure et simple » elle « opère comme le chiffre zéro de l'addition : le résultat reste inchangé » (Boudon et al., 1994/2000, p. 146). Cette définition dans sa radicalité est reconnue comme théorique (Boudon et al., 1994/2000, p. 146). C'est-à-dire qu'elle correspond à un cas idéal. Le cas théorique, « tout bateau est copié d'un bateau » (selon la formule d'Alain), permet de poser la répétition comme l'un des deux cas limite de la conception, l'autre étant la réduction (« tout change avec la grosseur » selon la formule de Valery). Ce sont deux bornes de la conception.

1.1. Certains exemples de reprise à l'identique peuvent faire penser qu'il ne s'agit pas d'un cas idéal, mais bien d'un cas réel. Il faut pourtant y regarder de plus près avec trois exemples :

1.1.1 Lors de la reconstruction du centre de Varsovie après 1945, il est question de reproduire la ville datant d'avant le XVIIIe siècle. Or, l'évolution des techniques de construction, la disparition de savoir-faire, la disponibilité des matériaux, leurs coûts, *etc*. engendrent nécessairement quelques adaptations. Dans les faits, cette reproduction qui se voulait précise, s'est faite en ajoutant des techniques modernes, notamment de canalisation.

1.1.2. À la piazza Santissima Annunziata à Florence, Da Sangallo au XVe siècle reprend le portique de l'hôpital des Innocents conçu par Brunelleschi au XIVe siècle sur la même place, pour concevoir sa façade de la Loggia dei Servi di Maria. Pourtant le portique de

Brunelleschi comporte douze travées en plein cintre, tandis que celle de Da Sangallo en comporte onze dont une centrale au plafond plus ouvragé que les autres. Il y a ainsi à la fois plus et moins dans la répétition qu'il n'y en avait dans le modèle.

1.1.3. La Villa Savoye de Le Corbusier se veut également un modèle répétable à l'identique. Il faut remarquer que répéter la Villa Savoye sur un site en pente nécessite à tout le moins de rallonger certains pilotis, voire de raccorder le rez-de-chaussée au sol.

1.2. En conclusion : s'il peut y avoir répétition pure et simple, ce n'est que dans l'ordre du projet, c'est-à-dire d'une idée générale, éventuellement initiale ou globale. Mais de l'idée à l'architecture opère un travail de conception qui nécessairement s'écarte d'une répétition « pure et simple » par plusieurs différences entre le modèle et sa répétition. Si ces différences peuvent paraître mineures dans l'ordre du projet, elles sont fondamentales dans l'ordre de la conception. La répétition pure et simple est un cas limite (de même que la réduction faisait perdre l'identité du modèle). C'est une fiction théorique, nécessaire à la construction de la théorie, mais ne correspondant pas à une réalité. Le détachement de la singularité et de la contingence des cas réels est une nécessité de la théorie. Toutefois, en l'état, le concept d'échelle de modèle peine à s'instancier sur des cas de conception réels sans en oblitérer la complexité. Cela notamment parce que, n'étant pas défini dans les termes des opérations constitutives de l'échelle, l'échelle de modèle fait assez peu système avec les autres concepts architecturologiques. Ainsi, la recherche délibérée de modéliser des cas réels[27], c'est-à-dire d'instancier les concepts de manière à saisir la complexité de la conception, soulève alors trois problèmes relatifs à la mise en système des concepts. Le premier concerne la relation entre l'échelle de modèle et son contexte du processus de conception en cours (avant et après), le second concerne le concept de modèle lui-même et la genèse du modèle, le dernier concerne la relation interne à l'opération et à ses concepts (opérateur, opérande, mesure) utilisés par d'autres opérations :

2. Premier problème : dans des cas de conception réels, il y a, en général, quelque chose sur quoi le concepteur est en train de travailler et qui précède l'échelle de modèle[28]. L'échelle de modèle intervient au milieu d'un processus. Donc si le modèle est répété, *il est répété au milieu de quelque chose qui est déjà là*, un autre modèle donc auquel le modèle de l'<échelle de modèle> s'*ajoute,* il s'ajoute au travail de conception en cours. Le terme « s'ajoute » pose une difficulté puisqu'il s'oppose à l'idée de répétition simple où rien n'est ajouté.

2.1. Cette difficulté peut être résolue en distinguant d'abord les différents modèles en jeu :

2.1.1. Le <modèle source préalable>, celui qui existe avant que l'échelle de modèle intervienne. C'est le modèle produit des échelles qui ont opéré avant (cela dans l'idée que l'échelle de modèle n'intervient en général pas comme une origine absolue du projet).

2.1.2. Le <modèle source à répéter>, celui que l'<échelle de modèle> prend comme modèle pour le répéter.

2.1.3. Le <modèle but>, qui est théoriquement le résultat de l'opération de l'échelle de modèle. Ce <modèle but> équivaut au <modèle source préalable> + <modèle source à répéter>, mais le « + » pose la question de sa modalité.

[27] Nous opérons une distinction entre l'ordre théorique et l'ordre de la modélisation qui se base sur les travaux de l'épistémologue Anne-Françoise Schmid. Contrairement au détachement par abstraction qu'opère la théorie, les modèles opèrent comme des intermédiaires avec le réel (Vitalis & Guéna, 2019).

[28] À moins de vouloir remonter aux origines absolues des modèles, et donc de l'histoire de l'architecture et de ses débuts, mais cela nous ferait retomber dans l'idéal.

2.1.3.1. Pour résoudre la question du « + » une étape préalable peut être envisagée, elle consiste en deux modèles-buts successifs : d'abord, le <modèle but répété> celui produit de l'échelle de modèle, qui correspond au <modèle source à répéter>, mais répété indépendamment du <modèle source préalable> dans lequel il sera ensuite inséré. Puis un <modèle but répété inséré> correspondant au <modèle but répété> une fois raccordé au <modèle source préalable>.

2.2. Cette indépendance possible entre les deux modèles (<modèle but répété> et <modèle source préalable>) suggère un niveau de conception. Un niveau de conception est découpé dans le <modèle source préalable> au sein duquel le <modèle à répéter> sera répété. L'indépendance n'interdit pas que la délimitation précise de ce niveau soit ajusté par une opération de bouclage qui revienne sur le découpage du niveau de conception au vu du <modèle but répété inséré>. L'indépendance décrit le fait qu'une succession d'opérations sont à l'œuvre de manière indépendante de la totalité du <modèle source préalable> entre le moment où le niveau est découpé et le moment où le <modèle but répété> est inséré dans le <modèle source préalable> par un changement de niveau de conception.

2.2.1. Dans certains cas particuliers on peut imaginer que l'échelle de modèle intervient au début d'un processus de conception, auquel cas, le <modèle source préalable> = 0. Ainsi : <modèle but répété> = <modèle but répété inséré> auquel cas il n'y a pas de niveau de conception puisque l'espace de conception n'est pas encore découpé.

2.2.2. Dans le cas plus général, un <niveau de conception> est produit par une <échelle de niveau de conception> qui prépare le terrain à l'arrivée du <modèle source à répéter> venant de l'extérieur du processus en cours. Conformément à la définition architecturologique, l'échelle de niveau de conception peut intervenir comme échelle élémentaire ou comme méta-échelle (Boudon et al., 1994/2000, p. 189, 210-211, 220). Cette échelle de niveau de conception et les échelles antécédentes qui l'induisent (causalement sous la forme de cascade ou relai ou librement sous la forme d'un choix arbitraire) sont initialisantes ou amorçantes[29] pour l'échelle de modèle. Au Louvre, il est envisageable qu'une échelle fonctionnelle ait œuvré, cherchant à concevoir l'entrée cour Napoléon, que cette échelle ait ouvert un espace de référence symbolique formel considérant la valeur historique du lieu et ait alors cherché un moyen satisfaisant de se mettre en rapport.

3. Second problème : dans l'échelle de modèle il ne s'agit pas tant *d'ajouter* quelque chose au modèle, que de lui *retrancher* quelque chose. La pyramide de Khéops est reprise au Louvre, tout en étant dépourvue de sa matérialité, de sa technique de construction et de sa hauteur. C'est donc bien qu'il y a eu un choix. L'idée qu'« un modèle n'est modèle que par les copies dont il a été l'objet » (Boudon, 1992, p. 92) signifie qu'il n'y a pas de modèle en soi ni de substantialité du modèle. La fonction de modèle de la pyramide ne dépend que du choix du concepteur de la réutiliser. Il faut donc distinguer l'objet (la pyramide de Khéops comme référent réel), et le modèle (la pyramide de Khéops comme ensemble de traits pertinents retenus dans l'esprit d'un concepteur). Ainsi, comme cela est précisé dans l'ouvrage cité, il y a une opération de <découpage> (Boudon, 1992, p. 92) qui fait du modèle ce qu'il est, avant d'être répété. Ce <découpage> retient, ou sélectionne, ou délimite, les dimensions mesurées qui constituent le modèle et qui seront ensuite répétées. Il y a donc moins que l'objet réel dans le modèle de cet objet répété. La difficulté est donc d'expliquer le

[29] Le caractère initialisant est considéré comme relatif, ici à l'échelle de modèle, il ne s'agit donc pas d'un point de départ absolu, le terme d'amorçage semble donc préférable.

passage de l'objet au modèle. L'enjeu de cette explication est d'acter la désubstantialisation du modèle.

3.1. Il est possible de distinguer deux types de choix dans l'échelle de modèle :
A — Le choix du modèle à répéter
B — Le choix, au sein de l'objet pris comme modèle, de certains traits pertinents à répéter

3.2. Il est possible de considérer que A et B forment une seule et même opération. Peut-être est-ce parfois le cas. La question est difficile à statuer, car dans le choix A, il est déjà question d'un modèle et non de l'objet réel. Or si nous revenons sur l'idée de Paul Valery « nous ne raisonnons que sur des modèles » (reprise par Le Moigne, 1987), il faut considérer que dans les deux choix, aussi bien en A que en B il n'y a toujours au départ que des modèles. L'objet réel est dans l'ordre de la perception directe ou médiatisée. Dans ce cas, le choix B correspond plutôt à une reprise d'un modèle mémorisé, au sein duquel est éventuellement sélectionné un ensemble de traits pertinents à répéter. Cette sélection peut aussi engager à un réexamen de l'objet pour identifier de nouveaux traits pertinents à sélectionner pour être répétés. La distinction entre A et B repose sur une différence d'ordre : le choix A se situe au niveau n+1, c'est la sélection d'un modèle dans un espace donné constitué d'un ensemble de modèles réunis selon quelque pertinence. Le choix B se situe au niveau n, c'est la sélection de traits pertinents dans un espace constitué par le modèle d'un objet. Ces deux espaces sont expansibles, en ce sens qu'il est toujours possible de considérer de nouveaux modèles pertinents dans l'espace du choix A et de considérer de nouveaux traits pertinents de l'objet dans l'espace du choix B.

3.3. Dans le cas de la pyramide du Louvre, on peut imaginer que sous l'impulsion d'une échelle socioculturelle, le concepteur considère les collections du Louvre et notamment le département des antiquités égyptiennes. Dans cet espace de référence, le choix du modèle de la pyramide de Khéops se distingue du choix du modèle de la momie. Ce choix peut être motivé par la considération de mesures propres au modèle : prendre la mesure du modèle de la pyramide du Louvre par le moyen de l'échelle optique permet de considérer sa pertinence, celle de masquer faiblement les éléments situés derrière elle. (Un autre architecte tel Franck Gehry aurait pu considérer le modèle de la momie et le trouver pertinent au regard d'une échelle technique : les bandelettes formant une enveloppe permettant de couvrir des formes complexes dont cet architecte est friand). Il s'agit du choix A.

3.4. Dans ce cas, la pyramide de Khéops est prise comme modèle au vu de certains de ces traits pertinents. C'est en particulier la forme de la pyramide qui revêt une pertinence optique. Le choix (B) des traits pertinents du modèle de la pyramide pour sa répétition suivra en toute logique cette pertinence. Parmi les traits pertinents du modèle mémorisé, ne seront retenus pour la répétition que certains traits. Ainsi, la matérialité de la pyramide, n'était pas optiquement pertinente, n'est pas retenue. Ainsi le choix A influe sur le choix B. Ce qui ne signifie pas qu'ils soient équivalents.

3.5. On peut aussi imaginer que l'intérêt pour la pyramide parmi les modèles possibles dans l'espace de référence des antiquités égyptiennes ne soit pas tout à fait satisfaisant. En particulier au regard de l'échelle fonctionnelle considérant la pyramide comme une entrée dans le Musée du Louvre. Le modèle de la pyramide tel que mémorisé renvoie plutôt à un édifice plein, sans espaces vides habitables ni porte d'entrée. Cette situation du modèle partiellement pertinent (échelle optique) partiellement non pertinent (échelle fonctionnelle) peut engager à un réexamen de l'objet. Ce réexamen permettrait alors de considérer la coupe de la pyramide de Khéops montrant les galeries et chambres funéraires excavées dans la masse de la pyramide qui n'avaient pas été retenues dans le modèle mémorisé par le concepteur. Ces galeries se révèlent alors pertinentes au regard de l'espace de référence

des souterrains par ailleurs mobilisé dans le projet. De plus, la complexité des accès aux chambres funéraires fournit un découpage en deux niveaux qui peut être repris pour varier les modalités de descentes dans la pyramide (traduit finalement par l'escalier hélicoïdal, et l'escalier mécanique avec palier intermédiaire). De nouveaux traits pertinents sont ainsi repérés dans la pyramide de Khéops pour être répétés au Louvre. Maintenir la distinction entre A et B semble alors plus précautionneux dans le but de pouvoir modéliser une diversité de cas.

4. Troisième problème : en architecturologie, « le modèle est opérande » de l'opération (Boudon et al., 1994/2000, p. 134). Mais le modèle est aussi résultat de l'opération d'échelle de modèle qui « produit un modèle d'arrivée identique au modèle substrat » (Boudon et al., 1994/2000, p. 146). Par ailleurs, en architecturologie, l'« échelle est ce qui mesure de mesure », c'est par elle que des attributions de mesures ont lieu (Boudon et al., 1994/2000, p. 134). La combinaison de ces définitions amène à la question de la cohérence des concepts entre eux : sachant que l'échelle, l'opération d'attribution de mesure, est définie par trois opérations constitutives (référenciation, découpage, dimensionnement), qu'est-ce qu'une attribution de mesure où l'opérande *et* le résultat de l'opération est un modèle ?

4.1. Nous posons d'abord que cette question a un sens. Il est contingent de se donner cette contrainte, mais il faut que cette question ait un sens si l'on souhaite construire un modèle formel de l'échelle de modèle basé sur les opérations constitutives de l'attribution de mesure. Considérer que cette question a un sens pourra avoir pour conséquence de préciser, ou d'amender la définition des concepts existants pour éviter d'éventuelles contradictions.

4.2. Le choix de certains traits du modèle (choix B) semble pouvoir être associé à une *opération de découpage*, ainsi que le suggère Philippe Boudon (1992, p. 92). Cela implique de considérer que ce qui est répété du modèle, ses traits pertinents, peuvent être compris comme des dimensions mesurées. Il semble que le pluriel s'impose, il s'agit d'« ensemble de dimensions ».

4.2.1. Que désigne le terme « ensemble » dans l'expression « ensemble de dimensions » ? La surdétermination désigne la mise en œuvre conjointe de plusieurs échelles sur une seule et même dimension (et non sur plusieurs). Il ne s'agit donc pas de <surdétermination>, mais éventuellement d'un <niveau de conception> qui met en relation plusieurs dimensions mesurées dans une forme d'indépendance. Il faut pourtant remarquer que ce <niveau de conception> perçu par le concepteur mettant en œuvre l'échelle de modèle ne correspond pas nécessairement à un <niveau de conception> produit par le concepteur de l'objet pris comme modèle. La pyramide de Khéops a pu faire l'objet de <niveau de conception> lors de sa conception par le.s architecte.s égyptien.s. Mais ces <niveaux de conception> concernent la conception de la pyramide de Khéops, pas celle du Louvre. Dans la conception de la pyramide du Louvre, choisir de répéter le niveau [la forme topologique + les proportions + la surface divisée en une trame] de la pyramide du Louvre n'est pas issu d'un processus de conception, mais d'une perception de la pyramide comme objet. Ce groupe (ou cette totalité) est une donnée reconstruite comme modèle par l'esprit, ce n'est pas un résultat de conception, mais un résultat de perception et de mémorisation.

4.2.2. Il existe, de droit, des cas particuliers où le pluriel ne s'impose pas et où c'est une seule mesure qui est répétée.

4.3. Il est possible de penser que le choix du modèle (choix A) procède d'une *opération de référenciation*[30]. Cette idée implique de considérer que le modèle est la référence dans <l'échelle de modèle>. La référence en architecturologie est le mesurant des opérations de

[30] À distinguer du choix d'un espace de référence préalable.

conception et donc ici de l'<échelle de modèle>. Elle est ce qui opère sur le modèle (s'ajoute à lui) et permet ainsi l'embrayage (raccord au réel). Or, l'échelle de modèle « opère comme le chiffre zéro de l'addition » (Boudon et al., 1994/2000, p. 146). Comment le modèle peut-il être à la fois référence et « zéro » ?

4.3.1. Soit le « zéro » prime, et il faut considérer que c'est une opération sans référence (+0), il n'y a pas de mesurant (le mesurant interviendrait ultérieurement dans le cours d'un processus, par le biais d'autres échelles consécutives).

4.3.2. Soit la référence prime, et il faut considérer que le modèle est lui-même la référence, il faut envisager une autre opération qui ne change pas le résultat : la division par « 1 ». Dans ce cas, le modèle reste identique reste identique parce qu'il occupe les deux positions opérateur et opérande de l'attribution de mesure (référence et dimension). Il n'est pas modifié parce que n'intervient pas la différence due à une référence autre. Ainsi, le modèle-référence divisant le modèle-dimension à la manière de l'opération 1/1=1.

4.3.2.1. Si l'on comprend la référence comme « mesurant », cela semble fonctionner en ce sens que le modèle est son propre mesurant, il ne change donc pas.

4.3.2.2. Si l'on comprend la référence comme « point de vue actif » ou univers de sens par rapport auquel mesurer, des conséquences moins intuitives émergent. Cela implique de comprendre le modèle comme un point de vue, comme ce par rapport à quoi le projet est mis en rapport tel que l'univers de sens est importé lui-même : la règle servant à mesurer devient l'objet mesuré.

4.3.3. Peut-être, le fait que l'opération d'échelle de modèle soit sans référence ou que le modèle soit sa propre référence revient au même : [Réf=0] = [Réf=modèle] au sens où x+0 = x/1. Les deux interprétations ne proposent toutefois pas la même explication. La deuxième voie explicative (le modèle est sa propre référence agissant comme division par « 1 ») a néanmoins l'avantage de préserver la continuité avec l'opération de référenciation qui précède et qui conduit au choix du modèle-référence[31] agissant comme point de vue embrayant. Elle pourra alors être préférée pour cette raison cohérentiste.

4.4. Une fois définis la référence, la référenciation, la dimension et le découpage de l'échelle de modèle, il reste théoriquement à définir la pertinence et de l'opération de dimensionnement. Il faut différencier la pertinence du modèle, de la pertinence des dimensions du modèle qui sont sélectionnées. Cela s'accorde donc avec l'idée que chaque opération constitutive (référenciation, découpage) a sa propre pertinence. Choisir la pyramide de Khéops peut avoir une pertinence symbolique tandis que choisir sa proportion, mais non sa matérialité (ne pas retenir sa matérialité), peut avoir une pertinence optique. L'opération de dimensionnement se définit par la « relation entre ce qui est mesuré et l'instrument de mesure qui suppose une pertinence » (Boudon et al., 1994/2000, p. 154), soir la mise en relation d'une dimension et d'une référence selon une pertinence. Dans le cas de l'échelle de modèle, il s'agira alors de la mise en relation d'une dimension à mesurer (un modèle-dimension constitué d'un ensemble de dimensions pertinentes) avec une référence (un modèle-référence servant de point de vue mesurant) selon une pertinence. Or mettre en relation le modèle avec lui-même (dans le cas où il est sa référence), ou le modèle avec rien

[31] Il est intéressant de noter que cet usage du terme référence rejoint ici l'usage courant des architectes qui parlent plus volontiers de référence que de modèle pour désigner les architectures ou éléments architecturaux dont ils reprennent certaines caractéristiques. Il n'est toutefois aucunement nécessaire de chercher à faire s'accorder le langage architecturologique avec le langage des architectes, ceux-ci étant travaillés par des visées différentes (théorique / opératoire).

(si la référence est un « zéro »), conduit à ne pas modifier le modèle ce qui peut être pertinent à trois égards :

4.4.1. Il y a une pertinence dans le fait de ne pas modifier le modèle répété, c'est la pertinence de la reprise qui porte sur la qualité de ce qui est repris. C'est une pertinence triviale, mais qui peut être soulignée, il s'agit de ne pas modifié le modèle puisqu'on veut le répéter. La conséquence est que les pertinences des autres opérations constitutives précédentes (pertinence du modèle choisi, pertinence des dimensions du modèle découpées, pertinence de la référence…) sont héritées telles qu'elles au moment du modèle inchangé. La pyramide reprise au Louvre est pertinente parce que la pyramide a une pertinence symbolique et que la forme de la pyramide a une pertinence optique notamment.

4.4.2. Ensuite, il n'est pas anodin que l'échelle de modèle conduise à passer d'une mesure à un ensemble de mesures, à passer d'une dimension à un niveau. Cela correspond à l'idée que l'<échelle de modèle> procède par « paquets », c'est-à-dire au moyen de *chunks* d'information plus gros. Elle permet des bonds dans le processus de conception, des sauts plus grands que d'autres échelles. Cela ressort d'une pertinence qui se situe alors à un niveau méta. L'échelle de modèle est pertinente pour l'espace de conception lui-même, dans l'économie de la conception elle produit des résultats conséquents par des moyens modestes. La pyramide reprise au Louvre est pertinente parce qu'elle permet de concevoir « tout d'un coup » une totalité qu'est l'entrée cour Napoléon.

4.4.3. Enfin, l'on pourrait aussi considérer que le modèle répété est mis en relation avec une dimension au sens où la dimension serait le niveau préalablement découpé de l'espace de conception (découpé dans ce qui est nommé ci-dessus <modèle source préalable>). Dans ce cas, le découpage préalable du niveau (permettant de faire atterrir le modèle extérieur dans le modèle en cours de conception) doit être compris comme une opération constitutive de l'<échelle de modèle> qui a une pertinence. La pyramide reprise au Louvre est pertinente parce qu'elle détermine la forme de la cour Napoléon qui est un lieu crucial du projet au centre symboliquement du Louvre et dans l'axe historique de développement de l'édifice.

5. En définitive, la formalisation de l'<échelle de modèle> permettant de la faire correspondre à des cas réels de conception s'extrait de l'idéal d'une « répétition pure et simple » par plusieurs aspects :

5.1. L'échelle de modèle n'est pas répétition pure et simple, car ce n'est pas l'objet « pyramide de Khéops » qui est répété dans l'espace de conception, mais un modèle de cet objet, en tant que tel le modèle est déjà produit d'un découpage donc d'un processus de conception.

5.1.1. Il est possible de dire qu'il s'agit d'un découpage curieux parce qu'il s'applique non pas à l'espace de conception pour découper des dimensions *à mesurer*, mais à une sorte d'espace parallèle (issue de la perception et à la mémoire), dans lequel est le modèle avant d'être importé, pour sélectionner des mesures *déjà attribuées* pertinentes à répéter.

5.1.2. Néanmoins, le fait de découper des dimensions d'un modèle est déjà un travail mental et donc un travail de conception. Dans ce cas l'« espace parallèle » est déjà l'espace de conception, même si l'on peut au sein de ce dernier distinguer des sous-espaces. Une éventuelle différence peut porter sur le fait que le découpage des dimensions du modèle ait lieu avant ou après sa mise en relation / sa répétition dans le niveau où il s'insère.

5.1.3. Cette différence diachronique repose sur le fait suivant : au Louvre, si l'on ne répète que la silhouette de la pyramide avec ces proportions, alors l'échelle optique n'enlève pas la matérialité (minérale) de la pyramide (celle-ci n'ayant pas été importée dans l'espace de

conception). Par contre elle ajoute à ce modèle n'ayant pas de matérialité, une certaine matérialité qu'est le verre. C'est donc un cas différent de celui où la matérialité est importée de fait parce que le modèle que le concepteur a de la pyramide hérite de différents traits pertinents mémorisés. Dans ce cas, l'échelle optique retire la pierre pour la remplacer par du verre. Cette question des allers-retours entre modèle retenu et objet est traitée aux points 3.3., 3.4., et 3.5.

5.2. L'échelle de modèle n'est pas répétition pure et simple, car elle est précédée par un travail de conception auquel elle s'ajoute et dans lequel elle s'insère. Il y a des opérations de conception préalable qui conduisent à définir un niveau de conception au sein d'un modèle plus vaste : ce sont des échelles d'amorçage de l'échelle de modèle.

5.3. L'échelle de modèle n'est pas répétition pure et simple, car elle est suivie par un travail de conception. Ce sont alors les opérations consécutives à l'échelle de modèle qui continuent de faire perdre son identité au modèle en le réduisant plus avant. Elles permettent d'embrayer le modèle répété.

6. Dans le travail de conception, l'échelle de modèle est une répétition partielle et complexe.

Cette description de l'échelle de modèle peut-être résumé par la figure suivante :

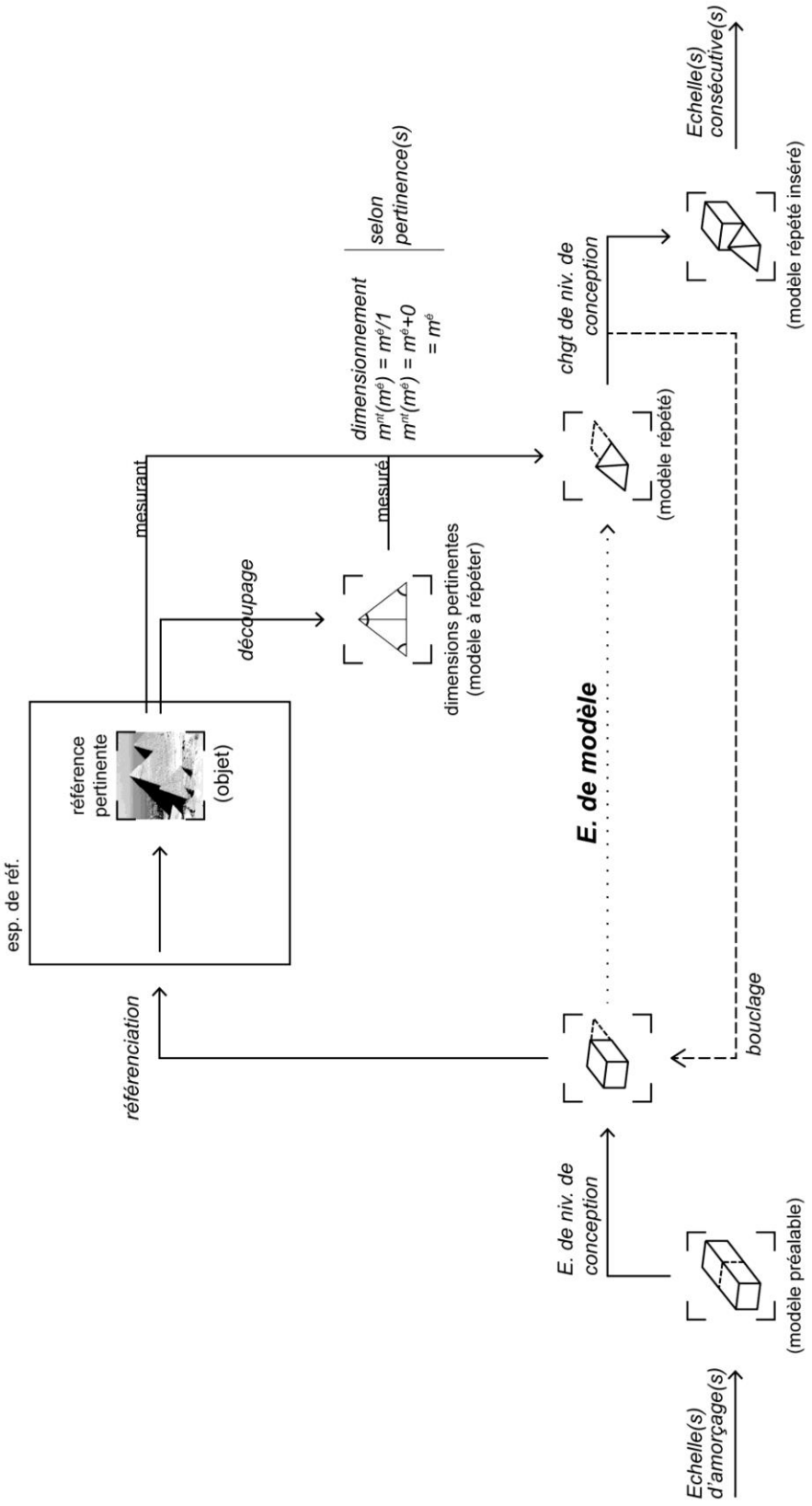



Figure 8 — Les opérations constitutives de l'échelle de modèle (schéma L.Vitalis)

## Bibliographie


Boudon, P. (1992). *Introduction à l'architecturologie*. Dunod.

Boudon, P. (2004). *Conception*. Editions de La Villette.

Boudon, P. (2019). Figures "vicariantes" de signes de la conception architecturale. *DNArchi*. https://dnarchi.fr/divers/figures-vicariantes-de-signes-de-la-conception-architecturale/

Boudon, P., Deshayes, P., Pousin, F., & Schatz, F. (2000). *Enseigner la conception architecturale. Cours d'architecturologie*. Editions de La Villette. (Original work published 1994)

Burrows, S. (2009). Introduction. *The Arup Journal*, *1*, 4-6.

Burrows, S., & Simpson, M. (2009). The Stadium geometry. *The Arup Journal*, *1*, 16-19.

Choi, T. (2009). Roof cladding and acoustic ceiling. *The Arup Journal*, *1*, 36.

Choi, T., & Lam, T. (2009). Layout and analysis model. *The Arup Journal*, *1*, 32-33.

Deshayes, P. (1984). Modèles a priori et modèles a posteriori du travail de l'architecte. In *La recherche en architecture un bilan international* (p. 93–96). Parenthèses.

Galilée. (1995). *Discours concernant deux sciences nouvelles* (M. Clavelin, Trad.). PUF.

Girard, C. (1986). *Architecture et concepts nomades*. Mardaga.

Guiheux, A. (1983). Humeurs d'espace. In J. Pigeat, *Au temps de l'espace*. Éditions du Centre Pompidou.

Herzog, J. (2006). Ornament, structure, space. A conversation with Jacques Herzog. *El Croquis, Herzog & de Meuron 2002-2006 The monumental and the intimate*.

Herzog, J. (2011, mai 5). *Herzog & de Meuron, Overview of projects*. Lecture at the Harvard Graduate School of Design, Cambridge. https://www.youtube.com/watch?v=cbIjyVnD3Y8

Herzog, J. (2015, mai 6). *Vancouver Art Gallery*. Lecture at the Orpheum Theatre, Vancouver. https://www.youtube.com/watch?v=G9n2PAt4mt8

Lam, K., & Lam, T. (2009). Analysis and prototype testing. *The Arup Journal*, *1*, 20-23.

Le Moigne, J.-L. (1987). Qu'est-ce qu'un modèle ? *Confrontations psychiatriques, Les modèles expérimentaux et la clinique*(numéro spécial consacré aux modèles).

Le Moigne, J.-L. (2006). *Théorie du système général. Théorie de la modélisation*. mcxapc. www.mcxapc.org/inserts/ouvrages/0609tsgtm.pdf (Original work published 1977)

Lecourtois, C. (2004). *De la communication sur l'espace : Espace conçu et espace perçu de l'architecture et de l'urbanisme. Tome I* [Thèse]. Paris X, Nanterre UPX, sous la direction de Philippe Boudon.

Magrou, R. (2003). Mémoires d'outre-architecture. Exposition Herzog et de Meuron. *Technique & architecture, 463*, 108-111.

Marbach, S., Riegar, S., & Heil, N. (2019). *Interview—Case study : The Beijing National Stadium « Bird's nest »*. inédit.

Marquez Cecilia, ernando, & Poveda, P. (Éd.). (2013). *El Croquis, Herzog & de Meuron 2005-2010 Programme, Monument, Landscape*.

Marquez Ceclilia, F., & Levene, R. (Éd.). (2006). *El Croquis, Herzog & de Meuron 2002-2006 The monumental and the intimate*.

Nestorovic, M., Cucakovic, A., Jovic, B., & Teofilovic, N. (2012). Analysis geometry structure of four buildings in olympic beijing. *Прикладна геометрія та інженерна графіка, 90*, 391-396.

Parrish, J. (2009). The architectural design concept. *The Arup Journal, 1*, 8-15.

Rajeb, S. B. (2012). *Modélisation de la collaboration distante dans les pratiques de conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives en conception collaborative instrumentée* [Thèse]. ENSA - La Villette / Université Paris Est, sous la direction de François Guena et Caroline Lecourtois.

Raynaud, D. (2002). *Cinq Essais sur l'architecture. Étude sur la conception de projets de l'Atelier Zô, Scarpa, Le Corbusier, Pei*. L'Harmattan.

Ren, X. (2008). Architecture and Nation Building in the Age of Globalization : Construction of the National Stadium of Beijing for the 2008 Olympics. *Journal of Urban Affairs*, *30*(2), 175-190.

Simon, H. (2004). *Les sciences de l'artificiel* (J.-L. Le Moigne, Trad.). Gallimard. (Original work published 1969–1996)

Tiercelin, C. (2012). *La connaissance métaphysique de la nature*. https://www.college-de-france.fr/site/claudine-tiercelin/course-2011-2012.htm

Vitalis, L., & Guéna, F. (2019). Que peut-on faire des théories ? Essai de classification des modélisations en architecture. *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère, 4*. https://doi.org/10.4000/craup.1828

Yin, R. (2009). Introduction. *The Arup Journal, 1*, 38-39.