



HAL
open science

De la conception architecturale biomimétique 2

Louis Vitalis

► **To cite this version:**

| Louis Vitalis. De la conception architecturale biomimétique 2. [Rapport de recherche] UMR 3495
| MAP CNRS/MC. 2021. hal-03144851

HAL Id: hal-03144851

<https://hal.science/hal-03144851v1>

Submitted on 17 Feb 2021

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 2

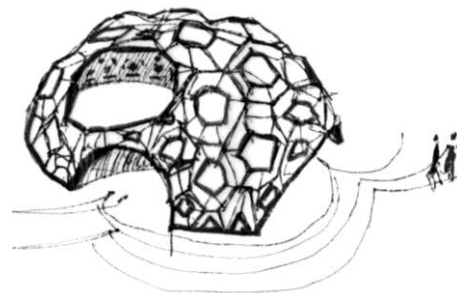
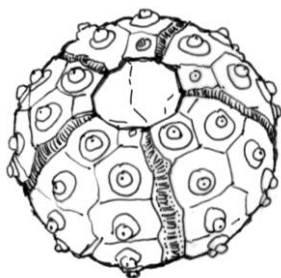
Essai de modélisation à partir du cas des pavillons en bois conçus par l'ICD/ITKE à Stuttgart

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

Février 2021



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.*

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

Sommaire

I. La conception architecturale biomimétique et l'échelle de modèle naturel	2
II. La conception des pavillons bois de l'ICD/ITKE — données	6
III. La conception des pavillons bois de l'ICD/ITKE — modélisation architecturologique	20
IV. Résultats relatifs à la conception architecturale biomimétique	30
V. Spécificités et problèmes des analogies « nature : : architecture »	35
VI. Pour un scénario d'usage d'une ontologie du biomimétisme.....	42
Bibliographie.....	50

Résumé

Ce travail fait suite à une première étude de la conception biomimétique portant sur le cas du stade de Pékin de Herzog et de Meuron. Dans la continuité de ce travail, la conception architecturale biomimétique est étudiée 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 la série de pavillon bois construite entre 2011 et 2019 issue d'une collaboration entre *l'Institute for Computational Design* (ICD) et de *l'Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen* (ITKE) de l'Université de Stuttgart. Ce cas, permet d'étudier la spécificité de processus de conception biomimétique réalisé en contexte académique et avec la collaboration de biologistes. Enfin, il permet de mettre à jour des problèmes spécifiques relatifs aux analogies entre nature et architecture et de réfléchir à un scénario d'usage pour un outil d'aide à la conception basé sur une ontologie informatique.

Abstract

This work follows a first study of biomimetic design on the case of the Beijing stadium by Herzog and de Meuron. In the continuity of this work, biomimetic architectural design is analyzed from a cognitive point of view on design activities and processes. It uses the concepts of "models" and "scales" from the architecturological theory as a framework for analysis and takes as a case study the series of timber pavilions built between 2011 and 2019 through the collaboration between the *Institute for Computational Design* (ICD) and the *Institute for Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen* (ITKE) of the University of Stuttgart. This case study allows to examine the specificity of biomimetic design processes carried out in an academic context and with the collaboration of biologists. Finally, it allows to uncover specific problems related to the analogies between nature and architecture and to reflect on a usage scenario for a design support tool based on an ontology.

I. La conception architecturale biomimétique et l'échelle de modèle naturel

Cette recherche prolonge un premier travail (Vitalis, 2020) qui mettait à contribution, parmi d'autres cadres théoriques possibles, le modèle architecturologique. Une brève présentation du modèle est disponible dans le précédent rapport¹, ce n'est donc pas l'objet de revenir ici exhaustivement sur ce cadre théorique, mais plutôt de présenter les acquis du premier travail et les nouvelles hypothèses ouvertes.

La modélisation architecturologique

D'après ce modèle, la conception architecturale est décrite comme un processus au sein duquel des opérations d'attribution de mesure font progresser la conception. 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*. Le processus de conception se décrit alors par le jeu *modèle/échelle*, soit schématiquement :

$$\dots E_n(M_n) \Rightarrow M_{n+1} \dots E_{n+1}(M_{n+1}) \Rightarrow M_{n+2} \dots$$

L'échelle opère sur des *dimensions* du modèle, qui sont des supports de la mesure (des *mesurés*), en fonction de *références* et, qui revêtent une *pertinence* pour le concepteur. Des mesures sont par exemple attribuées en fonction de références techniques, fonctionnelles, géographiques, symboliques, etc. Ces classes de références définissent alors des échelles particulières : échelle technique, échelle fonctionnelle, échelle géographique, etc. L'échelle technique peut être illustrée par le cas d'un concepteur qui envisage un matériau de couverture plus lourd (référence) et ajoute alors 10 cm à la hauteur d'une poutre (dimension) pour assurer la solidité de l'édifice (pertinence).

Dimension, *référence* et *pertinence* sont les concepts fondamentaux de la mesure et permettent de définir trois opérations constitutives de l'échelle. La *référenciation* est l'opération consistant à choisir une référence au sein d'un espace de références. Le *découpage* est l'opération consistant à définir l'entité sur laquelle va porter la mesure. Elle produit une dimension. 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.

Échelle de modèle naturelle

L'échelle de modèle² 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 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 de l'architecture pour les réutiliser dans le projet. Ce sont des modèles qu'ils répètent. L'échelle de modèle

¹ Pour une présentation plus complète, voir le *Cours d'architecturologie* (Boudon et al., 1994/2000) et, pour une présentation plus didactique, voir *Introduction à l'architecturologie* (Boudon, 1992).

² L'échelle de modèle a demandé un travail supplémentaire de formalisation qui est retranscrit dans l'annexe du rapport précédent (Vitalis, 2020).

désigne cette opération de reprise. Il s'agit, par exemple, du motif soubassement-corps-attique tant repris dans l'architecture classique, puis moderne et contemporaine³.

L'échelle de modèle suppose l'identification d'un espace de référence, puis un objet retenu au sein de cet espace de référence, en fonction d'une ou plusieurs pertinences. Avant de pouvoir le répéter, il faut néanmoins que les concepteurs se soient constitués un modèle de l'objet visé. La constitution d'un modèle est décrite architecturologiquement par le fait de retenir certaines dimensions de l'objet. Ces dimensions sont retenues en fonction de pertinences. Ainsi, pour un même objet, plusieurs modèles peuvent être constitués.

Lors de la recherche précédente, nous avons défini *l'échelle de modèle naturelle* comme un cas particulier d'échelle de modèle où la source du modèle répété est prise dans la nature. Cette opération constitue alors le cœur d'un processus de conception biomimétique.

Un modèle du raisonnement de conception architecturale biomimétique

Un modèle général de la conception biomimétique a alors été élaboré. En identifiant les moments de conception, en amont et en aval de l'échelle de modèle naturel, un raisonnement de conception biomimétique est défini :

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 espaces 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 pouvant 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.

Les occurrences (token) de ces échelles (type) sont variables à la fois de manière quantitative (elles peuvent être plus ou moins nombreuses et qualitatives : ce sont des « échelles x » où « x » est une variable. « x » peut prendre la valeur d'une classe de référence parmi les classes de la liste : [*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*]⁴.

³ Cette tripartition verticale de l'édifice est un modèle très fréquent de la conception architecturale. Il joue un rôle par exemple dans la conception du palais Rucellai d'Alberti à Florence (1451), du Buffalo Guaranty Building de Louis Sullivan (1895), de la Cité Radieuse de Le Corbusier à Marseille (1952), ou encore de l'hôtel Renaissance de Christian de Portzamparc à Paris (2009). Des concepteurs ont choisis, en fonction de pertinences spécifiques, de reprendre ce découpage pour la conception d'édifice particulier, tout en l'adaptant ensuite sous l'action d'autres échelles.

⁴ 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 comme celles proposées par Caroline Lecourtois (2004).

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

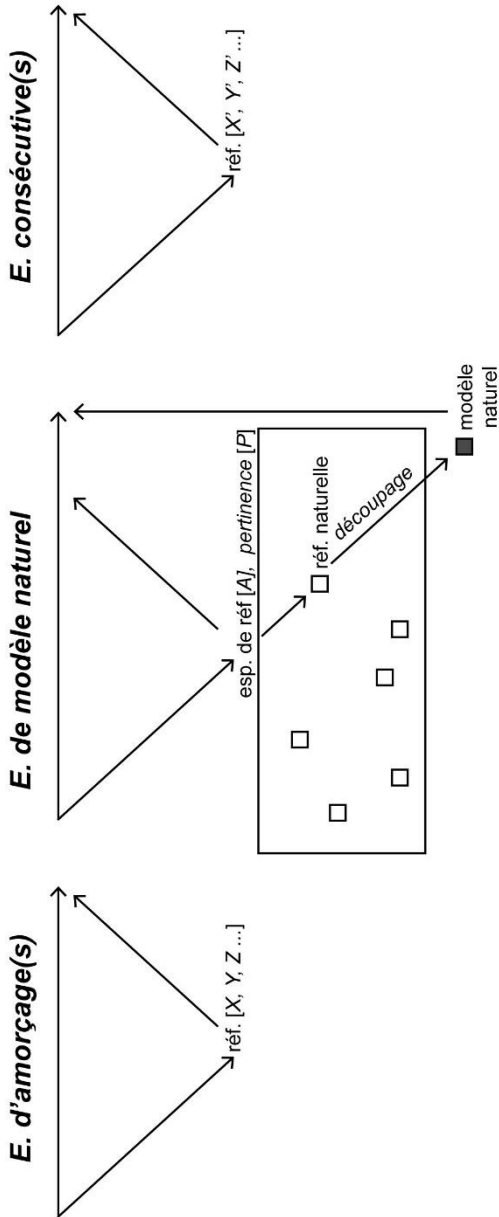


Figure 1 — proposition d'un modèle du raisonnement de conception architecturale biomimétique (schéma L.Vitalis)

Hypothèses de recherche

Après avoir étudié au moyen de modèle architecturologique un premier cas de conception biomimétique (le stade olympique de Pékin de Herzog et de Meuron, inspiré du nid d'oiseau), nous avons fait différentes hypothèses concernant la spécificité des processus de conception biomimétique :

Il semblait nécessaire de différencier les processus de conception biomimétique qui se déroulent en contexte professionnel (comme le stade de Pékin) de ceux qui se déroulent en contexte académique. Cette différence tiendrait à ce que les architectes exerçant dans le monde professionnel sont soumis à des contraintes économiques et techniques liées au monde professionnel de la construction, tandis que le contexte académique serait en revanche plus libre vis-à-vis de ces contraintes, lui permettant d'engager des collaborations avec des biologistes et donc d'impliquer des connaissances biologiques en amont de la conception à la manière des processus dits « bottom-up » ou « biology influencing design » (Helms et al., 2009). Par ailleurs, la conception biomimétique académique semblait poser de manière arbitraire le recours à un modèle naturel (n'ayant pas de pertinence pour l'espace architectural, mais seulement à un niveau méta, pour l'espace de conception) qui intervient, sans découpage d'un niveau de conception préalable, sur tout l'objet architectural.

Pour mettre à l'épreuve ces hypothèses, il fallait donc les tester en comparant la conception du stade de Pékin, avec un cas de conception réalisé en contexte académique. C'est pourquoi la série de pavillons bois, conçus à l'université de Stuttgart, a été choisi comme cas d'étude.

II. La conception des pavillons bois de l'ICD/ITKE — données

Le cas d'étude choisi est constitué par une série de pavillons en bois conçus par le groupe ICD/ITKE réunissant deux instituts de l'Université de Stuttgart l'*Institute for Computational Design* (ICD), dirigé par l'architecte Achim Mengès, et l'*Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen* (ITKE), dirigé par l'ingénieur Jan Knippers rejoint par l'Université de Tubingue dont le biologiste James H. Nebelsick et son équipe. Ce cas a été considéré comme pertinent car il présente une collaboration effective avec des biologistes dans un processus de conception qui aboutit néanmoins à des réalisations matérielles.

Parmi les pavillons en bois de l'ICD/ITK ont été sélectionnés seulement ceux qui procèdent de l'inspiration d'un même modèle naturel, l'oursin dit « dollar des sables », soit : un pavillon sans-titre de 2011⁵, le pavillon d'exposition du festival de paysage de Schwäbisch Gmünd, dit LAGA de 2014⁶, un pavillon sans-titre de 2015-16⁷, le pavillon bois de l'exposition au musée Rosenstein en 2017⁸ et le pavillon dit BUGA de 2019⁹.

Ces cinq pavillons sont considérés comme faisant partie d'un seul et même processus de conception fait d'itérations. Ces constructions matérielles fonctionnent comme les maquettes que les concepteurs construisent en général pour explorer l'espace de conception. La différence réside, à Stuttgart, dans le fait qu'elles sont construites à l'échelle 1:1. Ces prototypes permettent aux concepteurs de tester leurs idées et d'acquérir des connaissances permettant de relancer le processus de conception. Cette manière de considérer la continuité du processus est cohérente avec la doctrine d'Achim Menges selon laquelle l'activité cognitive de conception coïncide avec une exploration matérielle (Menges, 2015), mais aussi avec la vision rétrospective proposée par les concepteurs (Schwinn et al., 2019).

Nous nous sommes concentrés uniquement sur la conception de ces pavillons et les moments de conceptions en lien avec le biomimétisme. Des données ont été récoltées au sein des publications de l'ICD/ITKE. Cette littérature, pourtant riche, n'a pas pour objet le processus cognitif de conception tel que nous l'entendons ici. Elle traite souvent plutôt du conçu, du produit de la conception, selon différents angles d'analyse (technique, matériaux, stabilité...), ou encore des outils numériques de sa conception (paramétrique, robotique, système multi-agents...), mais ces outils, même s'ils intègrent une part processuelle et générative, sont eux même des produits¹⁰. Il aura donc fallu reconstituer les processus au travers des informations parcellaires de ces publications. Pour y parvenir, un entretien semi-directif a été réalisé avec Tobias Schwinn, architecte et chercheur à l'ICD ayant participé à la plupart des projets (Schwinn et al., 2020), complété par un échange par écrit avec Oliver David Krieg, ancien étudiant puis chercheur de l'ICD (Krieg & Vitalis, 2020).

⁵ Cf. www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2011/, consulté le 15/07/2020.

⁶ Cf. www.icd.uni-stuttgart.de/projects/landesgartenschau-exhibition-hall/, consulté le 15/07/2020.

⁷ Cf. www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2015-16/, consulté le 15/07/2020.

⁸ Cf. www.icd.uni-stuttgart.de/projects/segmented-timber-shell/, consulté le 15/07/2020.

⁹ Cf. www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/, consulté le 15/07/2020.

¹⁰ Du point de vue de la cognition, on sait que les concepteurs se fabriquent des outils, les testent avant de les adopter, parfois les rejettent avant d'en trouver d'autres qui conviennent mieux et qu'ils s'approprient parfois en les modifiant ou les détournant... c'est toute cette hésitation, ces essais/erreurs dont une focalisation sur le *conçu* ne rend pas compte, à la différence de celle sur le *concevoir*. Néanmoins les deux points de vue sont tout à fait complémentaires et valables. Pour des éléments au sujet de la distinction entre calcul et conception voir l'article (Vitalis, 2018).

Premières explorations de la fabrication bois

Le point de départ¹¹ de ce processus de conception peut être situé dans les premiers tests effectués sur des petits objets en bois, fabriqués à partir de plaques planes prédécoupées par un bras robotique (cf. Figure 2). Ils sont réalisés à l'automne 2010, au cours d'un studio de projet à l'Université de Stuttgart par un étudiant en architecture de l'ICD, Oliver David Krieg. Ce studio se donne explicitement pour objet de développer des approches biomimétiques. Il est encadré avec la collaboration des botanistes de Fribourg. Fort d'une formation antérieure dédiée à la construction et les assemblages bois, Oliver David Krieg décide d'importer dans son projet son travail précédent sur des aboutements paramétriques à angles variables alors que le bois n'est pas un matériau imposé par l'exercice (Schwinn et al., 2020). Sans programme précis ni échelle architecturale, ces prototypes répondent plutôt à une exploration technique sur un matériau, le bois lamellé-collé, le détail et la résistance de ses assemblages.

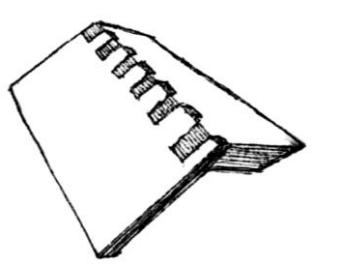


Figure 2 — Aboutement de pièces lamellé-collé à angles variables, réalisé par l'ICD (dessins L. Vitalis)

Deux principes sont posés à ce stade : le principe global d'une structure en coque (*shell*) composée à partir de modules que sont les plaques et le principe local d'une connexion de plaques par aboutement (*fingerjoint*). Local et global sont en interdépendance dans ce cas, comme cela a déjà été identifié dans la littérature sur les structures duales plaque-treillis (Wester, 1987) que citent les concepteurs : l'idée de coque segmentée à partir de modules induit une difficulté principale au niveau de la descente de charge (contrairement à un dôme constitué par un treillis d'arrêtes porteuses et distinctes des plaques de remplissage). Cela a pour conséquence de nécessiter une liaison entre plaques particulièrement rigide pour éviter la discontinuité de la transmission des efforts, ce à quoi le choix de l'aboutement répond.

C'est la possibilité de découper les aboutements avec des techniques robotiques qui pousse les concepteurs de l'ICD dans leur exploration. En permettant de découper avec précision des aboutements sur des angles variés, cette technique ouvre des possibilités en dehors des standards de production, généralement à 90°, limitant le type de connexions et donc de formes. S'ajoute à cela le caractère durable du bois pouvant être produit localement, et qui, pour des questions environnementales, est l'objet d'un regain d'intérêt dans le domaine du BTP. Ainsi, l'aboutement, technique connue de la construction bois, semble posé avant l'introduction de l'oursin dans l'espace de conception (cf. Krieg et al., 2011; Riccardo La Magna et al., 2013; Schwinn et al., 2012). Les concepteurs parlent en effet d'un *technological push* ou d'un processus *top-down* au sens où la biologie est interrogée dans un second temps, à partir d'un projet déjà partiellement déterminé¹².

¹¹ Comme toute origine, ce point a quelque chose d'arbitraire si on l'entend comme absolu. Il faut plutôt l'entendre ici comme une origine relative, mais jugée pertinente au vu des objectifs portant sur la conception et visant à comprendre les processus et les décisions déjà posés. Remonter plus en amont serait possible en principe, mais apporterai, en fait, peu à nos objectifs de recherche.

¹² « a research methodology was used that suggests informing previously defined architectural material principles with a variety of principles from biological systems » (Krieg et al., 2011, p. 574).

Recours à la biologie

Pour insérer son projet dans le cadre de l'exercice biomimétique du studio, Oliver David Krieg va opérer une sorte de pas de côté, en interrompant le processus de conception en cours parti de considérations techniques concernant la fabrication bois pour se lancer à la recherche de modèles naturels pouvant lui permettre de poursuivre son travail. Il se tourne ainsi vers la considération de formes naturelles de coques et considère, en particulier, les oursins que lui suggère une des encadrantes du studio, Karola Dierichs, mais aussi le crâne humain et la carapace de tortue. S'engage ainsi un processus parallèle en sens inverse : partant d'organismes naturels pour envisager ce qui peut être ramené dans la conception architecturale (processus dit « *bottom-up* » ou « *biological pull* »).

Au cours de ce processus, un oursin plat dit « dollar des sables » finit par être retenu. Son intérêt par rapport au crâne et aux tortues, tiendrait aux connaissances disponibles sur le comportement de leurs plaques, connaissances qui seraient moins disponibles pour les autres organismes (Krieg & Vitalis, 2020), mais également au fait que la rigidité des connexions est liée à l'agencement de nombreuses plaques pouvant être considérés comme des surfaces plates (Schwinn et al., 2020). Le crâne présente un petit nombre de segments dont la courbure joue un rôle important. À la fin du semestre, en février 2011, Oliver David Krieg aboutit à une esquisse de projet (*design scheme*) qui est une sorte de couverture ajourée par des oculi et maintenue par les angles que forment entre eux un réseau de plaques de bois lamellé-collé jointes par aboutement¹³. Un prototype échelle 1:1, fragment d'une architecture potentielle, est réalisé à l'occasion (cf. Figure 3).

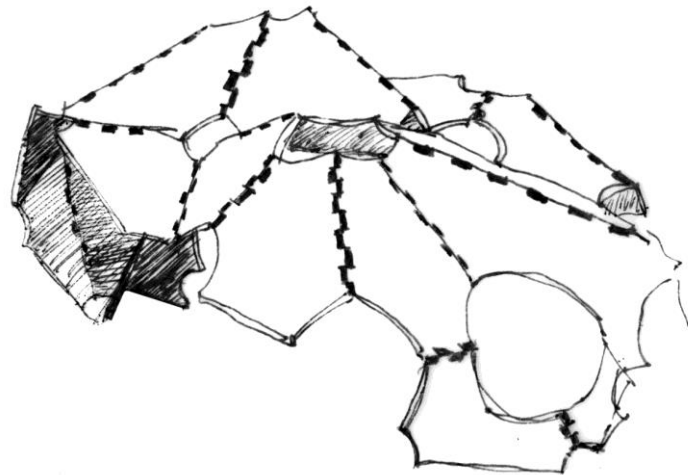


Figure 3 — prototype de l'esquisse architecturale de février 2011, projet d'Oliver David Krieg (dessin L. Vitalis)

Parmi les différentes esquisses des étudiants, le projet de Krieg est sélectionné au printemps 2011 pour être développé sous forme d'un pavillon pendant le studio de projet du semestre d'été. Oliver David Krieg forme à ce moment, avec son camarade Mihaylov Boyan, le noyau de l'équipe de conception dont les concepts sont développés collectivement par les étudiants du studio de projet et leurs encadrants.

Il semble que ce soit à ce moment-là que les principes biologiques destinés à un transfert vers l'architecture se soient alors explicités dans ce qui est nommé un « catalogue de

¹³ Cf. <https://www.oliverdavidkrieg.com/?p=646> (consulté le 18/12/2020).

performances » (*performance catalog*)¹⁴. Pour aboutir à ce résultat, les concepteurs disent avoir considéré les oursins, et plus particulièrement, ceux des trois grands ordres, *spatangoida*, *echinoida* et *clypeasteroida*, en retenant particulièrement le dernier appelé aussi « dollar des sables ». Ils mentionnent encore à ce stade les carapaces de tortues. Néanmoins, ils présentent surtout une image du test¹⁵ d'un oursin de l'ordre Echinoida — apparemment un *Phyllacanthus imperialis* (ou oursin crayon) Figure 4 (gauche) — à côté du prototype de la Figure 3, et dont la conception serait alors inspirée.

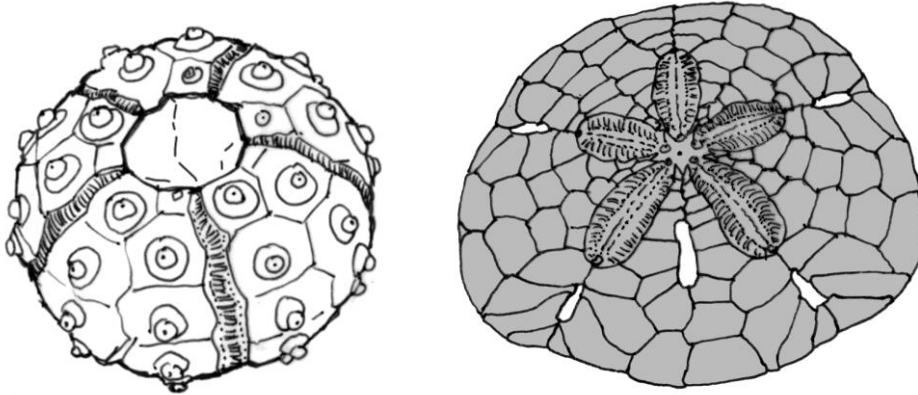


Figure 4 — tests d'oursins — gauche : *Phyllacanthus imperialis*, ordre *echinoida* — droite : *Mellita quinquesperforata*, ordre des *clypeasteroida* (dessins L. Vitalis)

Le « catalogue » est une tentative de mise en correspondance des caractéristiques des organismes naturels avec ceux d'un artefact architectural en cours de conception. Ce catalogue est une liste d'objectifs, au sein desquels les concepteurs retiennent sept principes à mettre en place dans la conception architecturale :

- 1- D'après leur compréhension des oursins et des tortues ; la forme géométrique d'une plaque (hexagonale, heptagonale, etc.), n'est pas fixe, mais déterminée en fonction de conditions locales et globales.
- 2- D'après les oursins ; en un point d'intersection se rencontrent toujours trois plaques, selon un agencement en « Y ».
- 3- D'après les oursins et les tortues ; les plaques sont reliées par des aboutements.
- 4- D'après les oursins ; l'utilisation de matériaux à densité variables ou de l'orientation des fibres du bois pour s'ajuster aux besoins de rigidité variables dans les plaques.
- 5- D'après les oursins ; présence de colonnes intermédiaires reliant les parties hautes et basses de la coque.
- 6- D'après les oursins et les tortues ; la taille des plaques varie, elles sont plus petites et plus nombreuses aux angles pour augmenter la résistance.
- 7- D'après les oursins et en particulier les dollars des sables ; la coque comporte des perforations appelées lunules. Ces ouvertures connectant les couches hautes et basses constituent des apports de lumière (Krieg et al., 2011, p. 577).

¹⁴ La datation n'est pas clairement attestée, mais le catalogue qui suit mentionne la règle du « Y » qui n'est pas suivi par l'esquisse de février 2010 (cf. Figure 3). Par ailleurs, la tournure collective que prend la conception à ce moment-là serait une raison au besoin d'explicitier les principes.

¹⁵ Le test désigne le squelette de la carapace des oursins, c'est la partie composée des plaques calcaires mais débarrassée des épines et du tissu vivant externe et interne.

Par contre, ils ne retiennent pas le motif global (notamment la symétrie radiale alternant des bandes de grandes et petites plaques chez les oursins). S'étant toutefois posés la question, les concepteurs laissent l'agencement global ouvert à des adaptations contextuelles. En effet à ce stade, les prototypes ne sont destinés à aucun lieu particulier.

À ce stade du projet et jusqu'à l'automne 2014, les concepteurs de l'ICD ne collaborent pas directement avec des biologistes spécialistes des oursins. Ces principes ont été trouvés dans la littérature biomimétique existante, ayant traité des oursins (en particulier les principes 2 et 3)¹⁶. Ils les trouvent aussi au travers des travaux déjà réalisés par des biologistes ayant étudié les oursins d'un point de vue constructif, comme des structures¹⁷. Ces travaux contribuent ainsi, sur le plan des représentations mentales, à un rapprochement entre cet organisme naturel et le domaine de l'architecture et cela dans les deux directions.

Le pavillon de 2011

Le pavillon qui sera construit à l'été 2011 ne répond pas à un programme particulier sinon d'être un abri extérieur situé sur un espace public au pied des bâtiments de l'Université de Stuttgart et à proximité d'un parc (le *Stadtgarten*). La topologie de base du pavillon est donc celle d'un dôme qui va être ensuite compliqué. C'est avant tout pour les concepteurs un démonstrateur qui sert à montrer les différentes possibilités constructives du principe structurel. Les contraintes sont essentiellement celle du temps et des matériaux qui sont issus de donation et notamment des partenariats établis avec les entreprises de robotique industrielle Kuka, de construction bois OCHS GmbH et l'office fédéral des forêts Landesbetrieb Forst Baden-Württemberg. En revanche, le pavillon étant construit par le groupe d'étudiants, les questions de coût de la main-d'œuvre sont considérées comme négligeables par les concepteurs (Schwinn et al., 2020).

Considérant le site et les usages, les concepteurs prennent un ensemble de décisions qui ne sont pas purement techniques et sur lesquelles ils restent discrets dans leurs publications. Ils vont placer à l'Est une ouverture principale pour l'entrée du côté des flux piétons venant des bâtiments de la faculté. Une deuxième entrée indirecte est également créée côté sud, ne donnant pas directement sur l'espace central créant un sas intermédiaire. Une séparation est ainsi créée entre deux espaces intérieurs par un appui central cloisonnant permettant de différencier les usages des espaces (un espace plus petit et de passage, un espace principal en impasse plus intime). Au Sud-Ouest, un oculus est ouvert à hauteur humaine pour créer une vue générale depuis l'espace principal sur le parc, sans toutefois, du fait de sa hauteur, y permettre l'accès. Ces caractéristiques génèrent une variété de situations spatiales qui visent à montrer l'efficacité du système constructif et incarnent le rôle démonstrateur du pavillon.

Le choix de l'oursin comme source d'inspiration découle ainsi directement de l'esquisse précédente et n'est pas remis en question. Cependant, les apports des organismes naturels vont être limités. Dans un premier temps, les concepteurs se concentrent sur le dollar de sable dans lequel ils *reconnaissent* certains principes (c'est parce que l'oursin est perçu comme étant proche de l'architecture que l'architecture peut s'en approcher). Il s'agit de :

¹⁶ En particulier ceux de Werner Nachtigall (2003, p. 7-10) et de Ture Wester (2016) cités dans (Krieg et al., 2011; Schwinn et al., 2012; Ricardo La Magna et al., 2012; Riccardo La Magna et al., 2013; Krieg et al., 2014). À noter que Nachtigall s'appuie lui-même sur les travaux de Ture Wester qu'il cite, mais aussi sur les travaux de sa doctorante Ute Philippi (voir Philippi & Nachtigall, 1996).

¹⁷ Voir les articles cités par les concepteurs de l'ICD/ITKE: (Seilacher, 1979; Telford, 1985). Le paléontologue Adolf Seilacher cite notamment les architectes Frei Otto et Pier Luigi Nervi.

— la forme globale par compositions de plaques polygonales irrégulières, sa reconnaissance est induite par les choix précédents du bois et de la découpe¹⁸ (cela explique notamment le choix de l'oursin et non d'autres organismes comme certains mollusques ayant des coques au sens non modulaire.).

— l'assemblage par aboutement (*fingerjoint*), l'observation microscopique des connexions entre plaques de l'oursin montre des protrusions dentelées que les concepteurs reconnaissent comme l'équivalent d'un assemblage de la charpenterie traditionnelle¹⁹.

Dans un second temps, deux autres principes sont plutôt *apportés* par le dollar des sables, il s'agit de :

— les sommets trivalents, soit l'agencement géométrique des plaques selon une forme en « Y », où chaque sommet est le point de rencontre de trois segments et donc de trois plaques. Cet agencement s'intègre aux choix précédents d'une coque modulaire et des aboutements, car il permet d'éviter des configurations instables en transférant les efforts de flexions en efforts de cisaillement le long des côtés des polygones.

— la variation de la taille des plaques, plus grande en hauteur, plus petite en partie basse (néanmoins, le ratio de cette variation n'est pas fixe, il n'est pas non plus mesuré sur l'oursin, il reste un principe général applicable de manière variable).

Ces principes fournissent des règles pour un modèle paramétrique élaboré sur la base d'un diagramme de Voronoï (Riccardo La Magna et al., 2013, p. 31-32). Tous les modules peuvent être différents puisque le découpage robotique permet de faire du sur-mesure. L'étape suivante consiste à effectuer une approximation de la surface courbe dans un découpage de polygones plats. À cela s'ajoutent d'autres règles utiles à la fabrication : d'abord une limitation des angles des joints aboutés (compris entre 15 et 165 degrés) relative à la précision du laminage robotique. Ensuite, une limitation de la taille des modules pour permettre la maniabilité. Aussi, une prise en compte des étapes intermédiaires de la construction pour permettre la stabilité de la structure encore incomplète, et un montage sans étais ni coffrages, ainsi que la facilité d'insertion de nouveaux éléments. Considérant la légèreté de la structure, les concepteurs décident d'un ancrage au sol pour éviter les soulèvements au vent.

Les concepteurs décident de décomposer les modules à partir de plusieurs planches de bois (23 planches pour les modules courants heptagonaux). À l'agencement des modules, ils appliquent la règle des sommets trivalents, tandis qu'à l'assemblage des planches formant les modules ils appliquent le jointement par aboutement. En revanche, les planches ne sont pas toutes agencées selon la règle des sommets trivalents. En raison notamment du fait que les modules soient creux et constitués d'une double épaisseur, la jonction de la couche intérieure avec la couche extérieure génère des sommets qui relient quatre arrêtes. Tandis que le jointement des modules entre eux est fait sans aboutement, mais simplement par la

¹⁸ L'action de reconnaissance, entre les plaques de bois et la coque de l'oursin, s'exprime typiquement dans l'expression « Shell action is very close to plate action because faceted polyhedron is nothing but a slightly discontinuous shell ; stabilized only by shear forces, acting across the edges. » (Riccardo La Magna et al., 2012).

¹⁹ Voir les différentes expressions mentionnant une équivalence : « the microscopic connection between the plates of the sand dollar skeleton, which was identified as the structural equivalent of a finger joint » (Schwinn et al., 2019, p. 117) « the traditional finger-joints typically used in carpentry as connection elements, can be seen as the technical equivalent of the sand dollar's calcite protrusions » (www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2011/, consulté le 15/07/2020). Ou encore : « on a microscopic level, the plates are joined by interlocking calcite protrusions that can be seen as the biological equivalent to man-made finger joints » (Krieg et al., 2014).

pose à sec des modules maintenus ensuite par vissage²⁰. Ce système produit alors des planches qui sont toutes uniques.

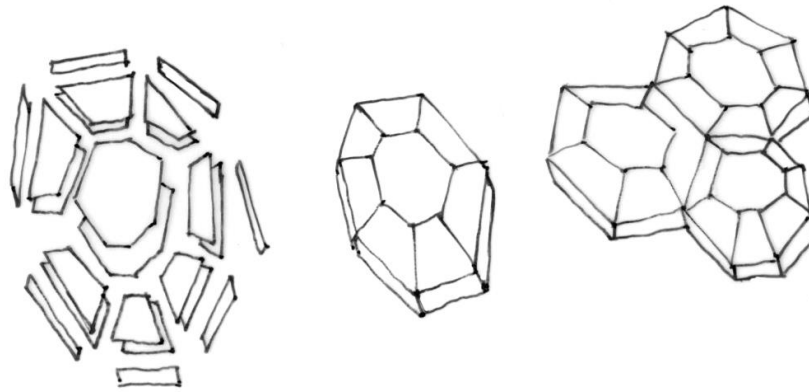


Figure 5 — principe de l'assemblage des planches en modules du pavillon de 2011 (dessin L. Vitalis)

Enfin, les modules sont différenciés en deux types : les planches côté intérieur des modules situés dans l'espace principal sont évidées, ce qui permet notamment d'installer un système d'éclairage nocturne. Les modules situés dans le sas de passage restent pleins (Schwinn et al., 2012). Ce processus aboutit au résultat du pavillon illustré par la Figure 6. Ses caractéristiques peuvent être résumées dans le tableau suivant.

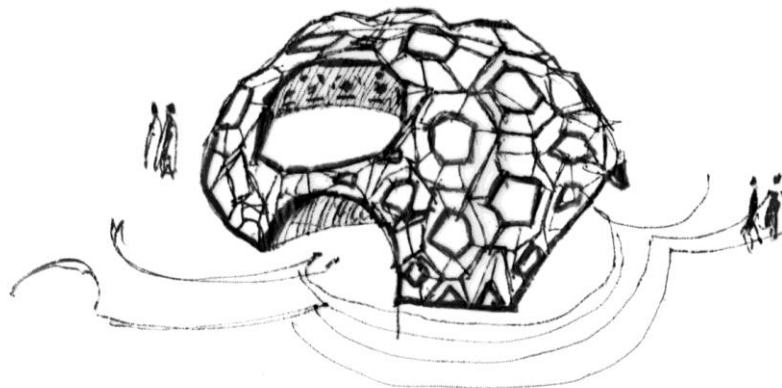


Figure 6 — vue du pavillon bois de 2011 réalisé par l'ICD/ITKE (dessin L.Vitalis)

<p>Coque Portée : 9 x 9 m. environ. Hauteur : 4 m. environ. Simple courbure sur un plan en hélice.</p>	<p>Plaques 6.5 mm. Polygones non tronqués : hexagones et heptagones. Convexes uniquement. Plus de 850 planches / une 40^{aine} de modules Matériaux : contreplaqué, bouleau.</p>
--	--

Le pavillon LAGA de 2014

Un second pavillon va être réalisé dans le cadre d'un festival annuel de paysage qui se tient en 2014 dans la ville de Schwäbisch Gmünd pour y créer un hall d'exposition fermé. C'est le

²⁰ « On the first level, the finger joints of the plywood sheets are glued together to form a cell. On the second hierarchical level, a simple screw connection joins the cells together » (www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2011/, consulté le 15/07/2020).

Landesgartenschau Exhibition Hall, ensuite renommé « Dieter Paul Pavillon ». Cet édifice a cette fois un programme nécessitant de deux espaces destinés à des usages distincts. Les principes du pavillon de 2011 vont être réinvestis et développés dans la conception sans nouveaux apports du dollar des sables. Les développements concernent principalement le contexte de production du BTP impliquant un coût de mise en œuvre. L'accent sera alors mis sur une simplification du système précédent pour atteindre un maximum d'efficacité constructive (Schwinn et al., 2020). L'aspect biomimétique est considéré comme acquis par l'héritage du pavillon de 2011, il n'est pas retravaillé dans ce pavillon²¹.

La forme de dôme va d'abord être adaptée au site et au programme. Le point d'entrée est commandé par le chemin d'accès à la parcelle, une grande ouverture est créée de ce côté pour que les fonctions soient visibles à l'extérieur. Les concepteurs créent alors un grand volume qui est ensuite séparé par une partie intermédiaire surbaissée créant une transition en forme de col. Une autre grande ouverture est créée dans le second espace pour donner une vue sur le paysage et la topographie en pente descendante. Bien que d'autres alternatives avec plusieurs ouvertures supplémentaires aient été testées, les deux ouvertures satisfont les concepteurs parce qu'elles correspondent au programme des deux espaces. C'est également l'alternative qui permet de pousser le plus loin la performance technique (Schwinn et al., 2020).

D'un point de vue technique, les concepteurs décident de réduire le nombre de composants. Dans le but de simplifier le processus de construction, une plaque correspond désormais à une planche (il n'y a plus de modules assemblant plusieurs planches pour constituer une plaque) (Schwinn et al., 2019, p. 118). Le principe des agencements par sommets trivalents (en « Y ») ainsi que celui des aboutements est inchangé. Mais cette fois, deux vis sont ajoutées et se croisent dans la dentelure des aboutements. Elles permettent de reprendre des moments de flexion et non seulement des cisaillements comme c'était le cas pour le pavillon de 2011 (Menges et al., s. d.). Par-là, le pavillon se conforme à des normes de construction, et n'est plus un pavillon temporaire.

La forme de l'enveloppe étant à double courbure, un autre type de plaques est décidé pour pouvoir gérer l'approximation de la courbe dans la partie intermédiaire en forme de col. Ce sont des plaques en formes de nœud papillon. Un modèle multi-agents (*agent-based modelling and simulation* ou ABMS) est alors créé en considérant chaque plaque comme un agent ayant un comportement propre et cherchant à répondre à certaines contraintes en fonction de son contexte. Ce type de modèle permet par un phénomène d'émergence (de type auto-organisation) de trouver par simulations calculatoires itératives un équilibre entre les contraintes sans les hiérarchiser à un niveau global. Ici les plaques (ou agents) sont plates et segmentent la surface courbe continue de manière discrète pour la fabrication. Les agents sont définis par leurs positions, leurs orientations, mais aussi par des contraintes géométriques des limites minimums/maximums. :

— la taille de la plaque (en fonction du stock de plaques disponible)

— le diamètre de circonscription de la plaque (en fonction de la zone de travail du robot de découpage)

²¹ Au moment de publication au sujet du pavillon LAGA, les concepteurs parlent du biomimétisme au passé « the design and fabrication of the University of Stuttgart's ICD/ITKE Research Pavilion 2011, at which time researchers followed a biomimetic design approach » et considère que le biomimétisme est un reste « « the Landesgartenschau Exhibition Hall's shell still exhibits the main principles that were originally identified as part of the analysis of sea urchins and sand dollar. » (Schwinn & Menges, 2015, p. 94-95, 98 nos italiques).

—les angles minimums/maximums de connexion entre les plaques (pour la fabrication des aboutements)

—l'approximation de la surface courbe en découpage de polygones plats est également intégrée²² au modèle multi-agents (Schwinn & Menges, 2015, p. 94-95).

Ce processus aboutit au résultat du pavillon illustré par la Figure 7. Ses caractéristiques peuvent être résumées dans le tableau suivant.

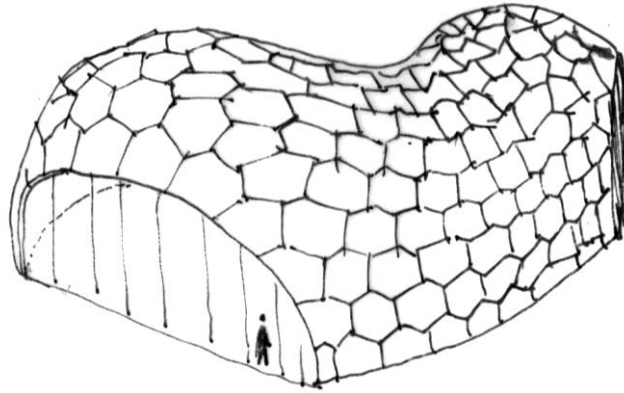


Figure 7 — vue du pavillon LAGA réalisé par l'ICD/ITKE (dessin L. Vitalis)

Coque Portée : 11 x 17 m. Hauteur : 6 m. max. Double courbure. 2 lignes d'appuis parallèles.	Plaques 50 mm. Polygones non tronqués : hexagones. Convexes et non-convexes sur la partie en « col ». 243 plaques. Matériaux : structure en hêtre (local) / bardage en mélèze.
---	--

Le pavillon de 2015-16

Le projet connaît ensuite une étape de développement différente avec un nouveau pavillon construit sur le site de l'Université de Stuttgart avec des étudiants du semestre d'automne 2015-2016, à quelques pas du site du pavillon de 2011. À cette occasion commence le début d'une collaboration avec les paléontologistes de l'Université de Tubingue. Le dollar des sables est à nouveau mobilisé. Il fait l'objet d'un nouvel examen permettant d'en tirer de nouveaux principes pour la conception. Sont notamment retenus :

— les joints entre les plaques de calcite montrent, au niveau microscopique, des fibres de collagène reliant les aboutements. > Pour l'architecture, cela permet d'envisager un assemblage par couture flexible.

— une section sur la coque d'un oursin montre une structure alvéolaire (vides dans l'épaisseur de calcite). > Pour l'architecture, cela signifie la possibilité d'alléger la coque.

— certaines espèces du dollar des sables (le *Mellita quinquesperforata* par exemple) présentent des ouvertures (dites lunules) entre les plaques. > Pour l'architecture, cela permettrait de faire pénétrer la lumière du jour pour éclairer l'intérieur.

— l'organisation des modules montre un principe de gradation (résultant de la croissance de l'oursin) avec des plaques plus grandes lorsque plus loin du centre. > Pour l'architecture,

²² Elle est résolue avec les principes géométriques d'intersection de tangentes (TPI ou *tangent planar intersection*).

cela donne une règle de générations des modules à partir d'un point de base positionné sur le site.

— l'observation microscopique de la matière calcite de l'oursin montre que celle-ci possède une densité et une porosité variable selon les endroits, sans doute en corrélation avec les efforts que les plaques reprennent. > Pour l'architecture, cela signifie la possibilité de varier les types de lamellé-collé pour optimiser l'utilisation de la matière en fonction des charges mécaniques à reprendre.

— entre la coque aborale (dessus) et orale (dessous), certains oursins (le *Clypeaster rosaceus* par exemple) disposent de sortes de piliers de contreforts intérieurs qui lient les deux coques. > Pour l'architecture, cela permet de porter le soulèvement de la partie arrière du pavillon laissant une ouverture depuis la rue²³.

De ces principes, va découler une hypothèse forte consistant à traiter le bois comme un textile. Cette idée permet aux concepteurs de se défixer du registre de la coque rigidifiée par des plaques de bois, en envisageant plutôt la souplesse et la légèreté comme objectifs. Les concepteurs vont alors chercher à faire des plaques les plus fines possible. Le principe du vissage dans l'épaisseur des plaques de bois impose, pour être résistant une épaisseur minimum, et est donc être remis en question (Schwinn et al., 2020). Les modules vont alors être formés en recourbant sur elle-même une feuille de bois suffisamment fine (6 mm ou moins) pour être flexible. Le module à ce stade est semblable à un tronçon de tube. Se penchant à nouveau sur l'application de l'aspect textile au lamellé-collé, les concepteurs décident de jouer sur le sens du fil du bois (principe non compris dans l'oursin). Ainsi les parties du tube sont divisées en tranches de 10 cm fabriquées avec des parties de lamellé-collé ayant une orientation et une épaisseur variable. La planche de lamellé-collé composite qui en résulte se courbe de manière non linéaire du fait de sa résistance variable (pour plus de rigidité, les fibres sont parallèles à la tangente de la courbure, pour moins de rigidité, elles sont perpendiculaires, avec une progression d'angles intermédiaires).

Un modèle paramétrique est alors élaboré pour générer un dôme. Une trame triangulaire ajourée est alors décidée, pour générer les modules à partir de deux points d'appui au sol selon le principe de gradation de la taille des modules. Le principe des feuilles de bois recourbées sur elle-même est alors adapté à un module en tripode (Figure 8 a. et b.). L'aspect cousu est transféré à deux niveaux. D'abord dans la couture qui relie les différentes feuilles de bois d'un même module. La couture est réalisée par un robot, en maintenant le module par un *grip* provisoire. Ensuite, les modules sont montés sur site et maintenus entre eux par laçage d'une corde (Figure 8 d.). Plus précisément, la couture des feuilles de bois permet de coudre dans le même temps une bande de membrane avec des œillets sur le pourtour des modules qui permet ensuite le laçage (Schwinn et al., 2016; Grun et al., 2016).

Le joint par aboutements des plaques est conservé pour caler les modules entre eux, mais il n'a plus le rôle majeur qu'il avait dans les pavillons précédents. Le principe de composition des plaques est changé, il s'agit désormais d'une trame triangulaire à partir de modules en tripodes. On peut y voir des sommets trivalents dans l'assemblage local des trois feuilles constituant un module (cf Figure 8 b. et c.). Ils ne jouent néanmoins plus le même rôle de rigidification globale puisque le recours au fonctionnement du textile repose plutôt sur la

²³ Il faut noter le caractère heuristique des principes, au sens où les architectes et les biologistes eux-mêmes ne savent pas toujours précisément si les règles observées sur les oursins sont bien à l'origine des performances mécaniques qu'ils leur attribuent pourtant pour la conception du pavillon (en particulier pour le rôle des fibres de collagène). Mais en testant ces principes sur un prototype architectural les concepteurs se proposent d'en explorer le fonctionnement mécanique à partir d'un modèle (Schwinn et al., 2020).

souplesse. Ce processus aboutit au résultat du pavillon illustré par la Figure 9. Ses caractéristiques peuvent être résumées dans le tableau suivant.

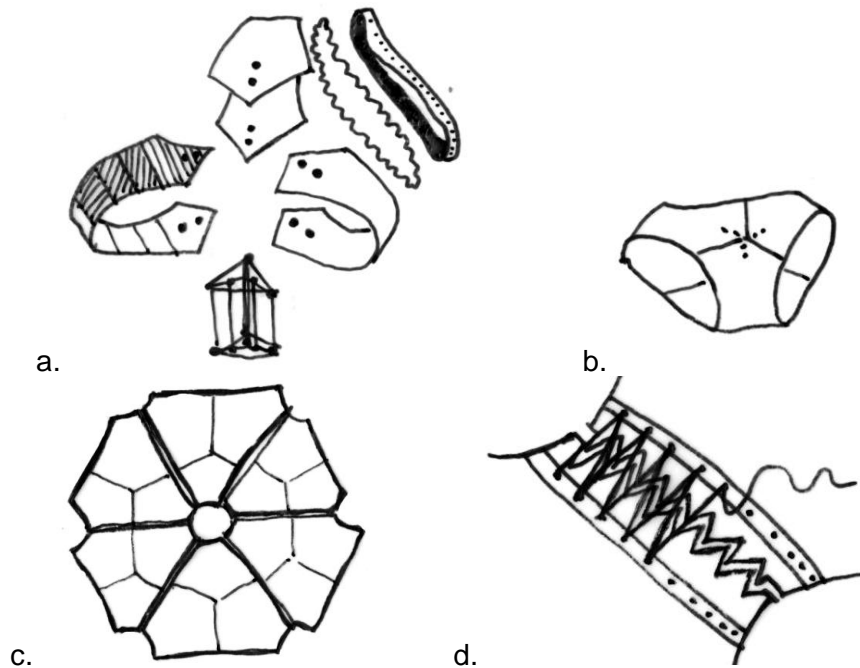


Figure 8 — a. assemblage des modules du pavillon de 2015-16 avec les trois plaques courbées, le « grip » de maintien provisoire et les membranes cousues / b. module assemblé formant un tripode / c. plan de composition des modules / d. détail de la jonction entre deux modules avec, au-dessus des aboutements, les liens lacés entre les membranes (dessins L. Vitalis)

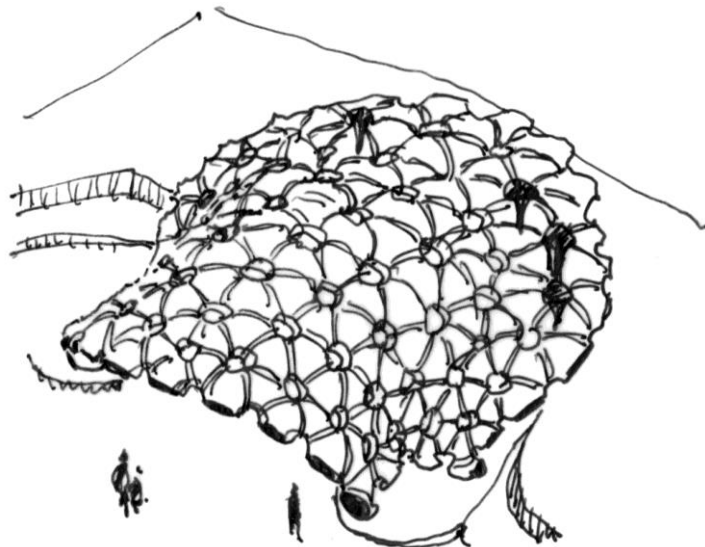


Figure 9 — vue du pavillon de 2015-2016 réalisé par l'ICD/ITKE (dessin L. Vitalis)

<p>Coque Portée : 9.3 m. Hauteur : 4 m. environ. Double courbure. 2 points d'appui et 4 piliers.</p>	<p>Plaques 6 mm. max. Modules en tripodes. 151 modules. Matériaux : feuille de placage, hêtre.</p>
---	---

Le pavillon bois de l'exposition au musée Rosenstein de 2017

À l'occasion d'une exposition des résultats du grand projet de recherche collaboratif entre architectes, ingénieurs et biologistes²⁴, un nouveau pavillon bois va être réalisé en 2017 à l'intérieur, cette fois-ci, d'une salle de musée.

Les concepteurs reconnaissent ce moment du processus comme celui où les connaissances biologiques du dollar des sables sont les plus développées. Ils disent à ce stade en savoir beaucoup plus sur les propriétés mécaniques sans pour autant être en mesure d'exprimer clairement à quelles connaissances ils ont eu recours pour la conception (Schwinn et al., 2020). Les publications consultées pour élucider ce point ambigu montrent cependant des résultats biologiques déconnectés de la conception du pavillon particulier de l'exposition au musée Rosenstein. Il semble que ces résultats montrent plutôt le bénéfice tiré pour la biologie des échanges avec le domaine de l'ingénierie du bâtiment puisque l'oursin y est étudié comme une construction²⁵.

Les biologistes du groupe semblent s'être focalisés notamment sur les dollars des sables de l'espèce *Echinocyamus pusillus* (Grun & Nebelsick, 2018a, 2018b; Grun et al., 2018) qui ont la particularité de ne pas posséder de fibres de collagène au niveau de la jonction entre leurs plaques. Cela expliquerait l'abandon au niveau architectural de l'approche par couture ou laçage pour ce pavillon. C'est plutôt le modèle multi-agents du pavillon LAGA qui est repris et redéveloppé. Les concepteurs disent avoir travaillé à la recherche d'agencements des plaques optimisant les performances structurelles : la réduction des forces agissant dans les joints rend possible l'affinement des plaques et donc un gain du ratio matière/portée. Cela est calculé par des simulations multi-agents qui incluent une analyse structurelle des différents types d'agencements de plaques générés (Schwinn et al., 2019). Les concepteurs n'expriment pas pourtant en quoi consistent formellement ces changements dans l'agencement. On peut penser qu'ils n'en ont pas eux-mêmes une vision explicite, puisque ces changements sont implicites au modèle génératif et qu'ils les saisissent principalement au travers des performances simulées.

La topologie générale du dôme est adaptée à l'espace du musée. Placé le long du parcours et d'une façade, le pavillon repose sur trois appuis laissant ainsi trois ouvertures (deux pour le passage, une pour l'apport de lumière des fenêtres). Au niveau de l'assemblage, une amélioration est opérée dans le système de vissage des aboutements par rapport au pavillon LAGA. Désormais une seule vis par dentelure maintient les plaques, mais elle est traversante.

²⁴ Le projet Transregio 141 (<https://www.trr141.de/>, consulté le 07/12/2020) comprend de nombreuses autres réalisations que celles présentées ici. Ce projet a financé notamment la thèse du biologiste Tobias Grun dirigée par James H. Nebelsick (Grun, 2018) (axe A07 du projet).

²⁵ Une étude morphologique par microscopie électronique à balayage et microtomographie (Grun & Nebelsick, 2018a) montre que la variation de l'épaisseur et de la densité de matière augmente aux jonctions faisant ainsi augmenter la surface de contact. Elle analyse la morphologie des aboutements et de leur dentelure, montrant notamment une forme sinueuse et irrégulière des aboutements et des « doigts » (ou entures) en forme de tige et de bouton (à tête plus large). Elle montre enfin la variation de l'organisation de la matière au sein d'une plaque : le stéréome est désordonné au centre, mais s'ordonne en périphérie de manière directionnelle, perpendiculaire aux jonctions. Ces recherches sont développées par des modèles physiques et virtuels visant à comprendre la densité et la distribution des paramètres structurels (Grun et al., 2018). Cette étude, indiquée par Tobias Schwinn, montre surtout le rôle crucial des piliers de contreforts intérieurs qui ne sont pas utilisés dans ce pavillon. Ces connaissances sont également présentées dans la republication augmentée du livre de l'exposition (Grun et al., 2019) sans faire de liens directs avec la conception du pavillon du musée Rosenstein. Elles sont présentées comme des outils utiles en général pour d'autres concepteurs.

Ce processus aboutit au résultat du pavillon illustré par la Figure 10. Ses caractéristiques peuvent être résumées dans le tableau suivant.



Figure 10 — vue du pavillon bois de l'exposition au musée Rosenstein réalisé par l'ICD/ITKE (dessin L. Vitalis)

<p>Coque Portée : 8.1 x 7.1 m. Hauteur : 3.6 m. 3 points d'appuis</p>	<p>Plaques Épaisseur : 20 mm. max. Polygones non tronqués : pentagones, hexagones, heptagones. Convexes. 92 plaques. Matériaux : hêtre.</p>
--	--

Le pavillon BUGA de 2019

Le dernier pavillon étudié dans cette série est réalisé par l'ICD/ITKE lors du salon fédéral biennal de l'horticulture (*Bundesgartenschau*) à Heilbronn en 2019. Ce projet s'inscrit dans un processus de reconversion d'une grande friche industrielle de la ville dont la conception est réalisée par l'agence de paysage SINAI qui dessine pour la première phase du projet un parc sur l'île centrale du quartier dans lequel prennent place deux pavillons, dont un en bois²⁶.

La conception de ce pavillon ne semble pas avoir opérée un retour vers le dollar des sables pour s'appuyer sur une connaissance nouvelle de l'organisme ni approfondir la transposition de ses principes biologiques. Elle semble plutôt avoir développée le modèle de coque à une situation particulière, notamment à la contrainte de franchir une portée d'une trentaine de mètres. Les développements importants qui ont été réalisés lors de ce processus de conception concernent ainsi plutôt des performances techniques sans liens directs avec le modèle de l'oursin. C'est pourquoi nous ne nous attarderons pas dessus.

On peut noter simplement que le pavillon s'implante à la croisée de deux axes de circulations principaux et d'un troisième chemin paysager. Il tire de cette situation parcellaire sa forme de dôme à trois appuis reprenant la topologie du pavillon du musée Rosenstein.

Pour augmenter la surface des joints et ainsi accroître la rigidité, tout en allégeant le poids des éléments, l'épaisseur des plaques va être considérablement augmentée. En contrepartie, pour les alléger, elles vont être évidées pour devenir des sortes de cassettes creuses (cf. Bechert et al., 2018). Les plaques sont alors constituées par un assemblage composite constitué d'une planche continue côté extérieur, de poutrelles périphériques plus épaisses et d'une planche évidée sur la face intérieure (cf. Figure 11). La forme évidée permet aussi, lors de la construction, d'accéder au système de vissage et d'installer un éclairage nocturne.

²⁶ Cf. <https://sinai.de/projekt/projekte/neue-landschaften-im-neckarbogen-bundesgartenschau-heilbronn-2019> consulté le 28/12/2020.

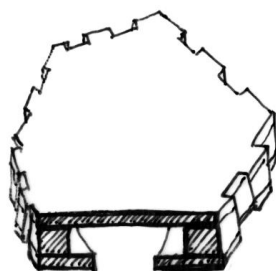


Figure 11 — coupe perspective sur un module creux avec l'assemblage des plaques et poutres (dessin L. Vitalis)

Pour éviter des flexions trop importantes dans les parties internes de la coque et pour créer un effet de délimitation visuel de la fin de la coque, les bords de la coque sont repliés vers le haut (Alvarez et al., 2019, p. 493).

Les concepteurs orientent le sens de la fibre du bois sur les plaques pour créer des effets visuels (accentuation de la perspective) à l'intérieur et à l'extérieur. L'orientation suit également le sens du ruissellement des eaux pluviales permettant ainsi d'assurer une plus grande pérennité des matériaux.

Ce processus aboutit au résultat du pavillon illustré par la Figure 12. Ses caractéristiques peuvent être résumées dans le tableau suivant.

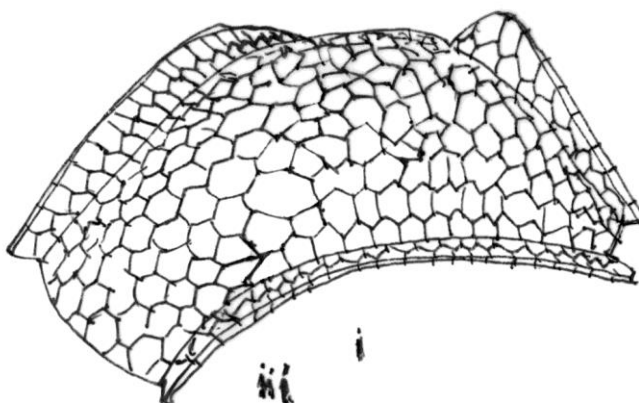


Figure 12 — vue du pavillon BUGA réalisé par l'ICD/ITKE (dessin L. Vitalis)

<p>Coque Portée : 30 m. Hauteur : 6 m. environ. 3 points d'appui.</p>	<p>Plaques Une 20^{aine} de cm. pour le complexe total de la plaque creuse. Polygones non tronqués : pentagones, hexagones, heptagones. Convexes. 376 cassettes composites (1128 plaques + 2168 poutres). Matériaux : lamibois.</p>
--	--

III. La conception des pavillons bois de l'ICD/ITKE — modélisation architecturologique

Dans cette partie, nous présenterons une modélisation de la conception de la série de pavillons bois de l'ICD/ITKE à partir des données précédentes et à l'aide des concepts architecturologiques²⁷. Ainsi, le modèle général de la conception architecturale biomimétique sera mis à l'épreuve. À nouveau, cette modélisation se concentre sur le moment où intervient l'idée du dollar des sables.

Considérer la conception des trois pavillons comme un seul et même processus de conception signifie qu'ils sont pris dans un jeu modèle/échelle continu où un pavillon produit par un premier processus est un modèle opéré par les échelles du processus suivant. Schématiquement la conception peut s'écrire sous la forme d'un enchaînement de quatre processus A, B, C, D, E :

$$E_{A1...An}(M_n) \Rightarrow M_{\text{pavillon2011}} \Rightarrow E_{B1...Bn}(M_{\text{pavillon2011}}) \Rightarrow M_{\text{LAGA}} \Rightarrow E_{C1...Cn}(M_{\text{LAGA}}) \Rightarrow M_{\text{pavillon2015-16}} \\ \Rightarrow E_{D1...Dn}(M_{\text{pavillon2015-16}}) \Rightarrow M_{\text{Rosenstein}} \Rightarrow E_{E1...En}(M_{\text{Rosenstein}}) \Rightarrow M_{\text{BUGA}}$$

Cela doit cependant être nuancé, car certains pavillons tel celui de 2015-16 représentent une voie divergente du processus qui n'est pas reprise par la suite (cf. Figure 13).

Préalables : premières explorations de la fabrication bois

Lorsqu'intervient l'idée de l'oursin, l'espace de conception est déjà préalablement structuré. Une première échelle technique opère le choix du bois et du lamellé-collé en fonction d'une pertinence écologique, soit technico-géographique au sens de Lecourtois (2014). Il s'agit d'un choix très général, peu embrayant, mais qui oriente néanmoins, par un espace de référence technique, toute la conception dans une direction, sans présager d'un résultat précis. Y sont associées plus particulièrement deux échelles techniques dans une relation de surdétermination : l'une opère un découpage en niveau de conception en distinguant la forme générale de la coque et ses éléments jointifs (plaques), l'autre est purement technique et détermine la forme de la jonction en aboutement. Ces deux échelles sont surdéterminées, car le besoin de rigidité induite par la première rend nécessaire la seconde. Une pertinence géométrique guide également les explorations de l'espace de conception, celles de possibilités formelles originales par rapport à des géométries standards (degré zéro de l'échelle géométrique).

Amorçage (arbitraire) de l'échelle de modèle naturel

L'espace de référence naturel est posé a priori puisque le cadre de l'exercice du studio de projet est celui de la conception biomimétique. Ainsi, un horizon biomimétique est posé, avant même qu'un besoin particulier de la conception se fasse sentir ni qu'un organisme naturel particulier ne soit convoqué. Cet espace de référence a un caractère arbitraire par rapport au processus de conception. La pertinence de cet espace de référence est générale, elle concerne des objectifs de développement durable (implicitement associé au

²⁷ 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.

biomimétisme) et de transmission pédagogique. Ces pertinences ne concernent pas un espace architectural particulier.

Ainsi, ce n'est pas une question architecturale précise qui suscite l'échelle de modèle naturel, mais seulement des valeurs générales. De ce fait, il n'y a pas un organisme naturel particulier plutôt qu'un autre qui soit privilégié pour être mobilisé dans la conception. Seules peut-être les plantes sont suggérées, mais seulement indirectement du fait que les biologistes co-encadrants du studio soient des botanistes. Mais les plantes n'étant pas pertinentes au vu de la structuration préalable de l'espace de conception, c'est plutôt l'idée de plaques et de joints par aboutement qui va orienter la recherche obligée d'un organisme naturel.

Échelle de modèle naturel : recours à la biologie

C'est en fonction d'une pertinence de ressemblance avec le système des plaques aboutées que sont sélectionnés des organismes (tortues, crânes humains, oursins). Ainsi est exploré un espace de référence naturel qui ne correspond pas à une taxinomie biologique, mais lui est transversale.

La pertinence des oursins dollar des sables²⁸ réside dans le fait qu'ils présentent d'après les concepteurs, une structure modulaire et performante pour son rapport poids/résistance permettant une diversité de formes. Cette diversité de forme est interprétée comme une capacité à s'adapter à des exigences et des fonctions diverses selon les situations de conception architecturale (Grun et al., 2019, p. 104). Il faut noter que la pertinence est géométrique et donc abstraite, elle n'est pas spécifique : elle ne dépend pas d'un site ou d'un programme particulier.

L'oursin se démarque du crâne humain, par une pertinence géométrique : ayant moins de plaques pour former une courbe, l'approximation de la courbe par des plaques plates est moins crédible. Or, cette pertinence géométrique est liée à l'échelle technique de la construction par plaques de bois découpées (produire des plaques de bois courbes est hors de propos). Mais c'est finalement en raison de la différence dans la quantité d'informations disponibles sur ces organismes que l'oursin est choisi. C'est donc une raison externe à l'architecture elle-même, mais relative à l'économie de la conception.

L'échelle de modèle naturel apporte donc certaines propriétés du dollar des sables comme propriétés du futur pavillon. On peut décrire cela par l'analogie suivante :

$$\frac{\text{dollar des sables}}{\text{propriétés du dollar des sables}} \quad :: \quad \frac{\text{pavillon}}{\text{propriétés du pavillon}}$$

Toutefois, en tant qu'échelle, ce n'est pas une analogie neutre, elle est orientée par un troisième terme (au sens de Peirce), soit la pertinence technique en fonction de laquelle l'oursin est perçu. C'est une analogie téléologique, elle vise un horizon de sens spécifique.

²⁸ Au sens large, il s'agit du taxon des *Clypeasteroida* dont fait partie les dollars des sables au sens strict (famille des *Mellitidae*). Les concepteurs, dans leurs publications, disent utiliser le terme « dollar des sables » par commodité pour nommer le taxon entier (à défaut d'un autre nom d'usage commun). C'est sans doute du fait de ce flottement taxinomique que les espèces d'oursins ne cessent de varier tout au long du processus.

La liste de propriétés particulières à importer fait l'objet d'hésitation : la constitution de l'objet dollar des sables en un modèle du dollar des sables est réitérée plusieurs fois. Ainsi, plusieurs dimensions seront découpées produisant au cours de la conception plusieurs modèles. L'échelle de modèle naturel est elle-même réitérée lors de la conception de certains pavillons tandis que d'autres pavillons héritent des effets de cette échelle au travers du modèle d'un pavillon précédent qui est repris pour être développé.

On peut remarquer qu'il s'agit ici d'une opération de découpage qui est en partie double. L'idée de « reconnaître » dans l'oursin des caractéristiques de la construction bois implique un mouvement à double sens de sélection de traits dans l'oursin et dans la construction bois. Ces traits sont mis en correspondance par une sorte d'isomorphisme. Cette double sélection concerne surtout la jonction par aboutements et le découpage d'un dôme en plaques. Les autres dimensions (agencement des plaques, lunules, piliers, etc.) sont plutôt injectées par le modèle de l'oursin dans la construction bois. On peut remarquer également qu'aucune de ces dimensions ne sont embrayantes. Il s'agit de déterminations géométriques formelles et proportionnelles : aucune taille réelle n'est posée à ce stade.

Dans le cas de l'esquisse de février 2011 réalisée par Oliver David Krieg (Figure 3), on dispose de peu de données, mais il faut croire que le modèle de l'oursin repose principalement sur le découpage en plaques, les aboutements et les ouvertures en lunules (la règle des sommets trivalents n'est pas appliquée, même si elle est connue). Il semble également qu'une morphologie ait été empruntée à l'autre oursin le *Phyllacanthus imperialis* (cf. Figure 4, gauche) montré dans les publications de l'époque. En effet, cet oursin présente des plaques proéminentes (chacune est un petit cône) qui s'agencent le long d'une ligne brisée. On retrouve cette morphologie dans l'esquisse de février 2011.

Du fait de l'apriori biomimétique au départ du projet, le modèle concerne l'ensemble de l'espace architectural (il n'est pas introduit au sein d'un niveau de l'espace architectural qui serait prédécoupé préalablement). L'espace architectural est plutôt découpé en niveaux (les plaques) par l'application du modèle naturel.

Échelles consécutives

Dans le cas de l'esquisse de février 2011 et du peu de données disponibles pour cette étude, il semble principalement que deux échelles techniques aient été mises en œuvre pour déterminer les planches de bois à découper et leurs agencements. C'est en considérant le système de production par découpage de planches plates que l'idée des plaques de l'oursin ayant une forme proéminente quasi-conique doit être subdivisée en plusieurs planches pour être productible. Une plaque d'oursin est alors produite par un module constitué de plusieurs planches de bois triangulaires. D'autre part, l'agencement des plaques doit permettre de franchir une certaine portée, tout en étant rigide, ce qui semble avoir été résolu par un dispositif de pli.

L'esquisse n'est réalisée en vue ni d'un site ni d'usages particuliers, ce qui explique que les espaces de références fonctionnels, visuels, géographiques, parcellaires, etc. ne soient pas plus mobilisés à ce stade.

Le pavillon de 2011

L'échelle de modèle naturel est ensuite réitérée. Cette fois, d'autres dimensions du dollar des sables et de la tortue vont être sélectionnées pour constituer le modèle à répéter. Le

catalogue de performance est une tentative de constitution explicite de ce modèle, mais il ne semble pas avoir été tout à fait utilisé comme tel : certaines dimensions n'ont pas été reprises pour le pavillon de 2011²⁹. Ce modèle n'est d'ailleurs pas constitué *ex nihilo*, mais repris en partie d'un modèle partiellement établis dans la littérature biomimétique existante.

Une autre échelle de modèle naturel semble être également à l'œuvre et détermine une forme géométrique générale de dôme. Elle permet de résoudre la question du point d'arrivée de la première échelle de modèle naturel qui répète des dimensions concernant les plaques et leurs assemblages. Elle fournit un niveau de conception sur lesquelles elles sont importées. Par ailleurs ce dôme est dimensionné par une échelle parcellaire à la taille du site et une échelle humaine pour permettre d'y rentrer (il faut soit considérer que le dôme est repris à l'oursin *Phyllacanthus imperialis* et que c'est sa taille qui est modifiée, soit qu'il est repris à l'oursin plat *Mellita quinquiesperforata* et que sa proportion est également modifiée). Une échelle fonctionnelle intervient en déterminant une ouverture d'accès dans ce dôme en référence à la provenance des flux. Une autre échelle fonctionnelle intervient en découpant deux sous-espaces et en les différenciant par leur taille et leur relation à l'extérieur (en impasse / de passage). Une échelle de visibilité génère une autre ouverture en établissant une référence au parc.

Le modèle du dollar des sables est ensuite importé. Il est constitué à partir de quatre traits, dont deux *reconnus* (déjà présents dans le modèle de la construction bois) : une échelle technique intervient pour distinguer deux dimensions : la forme globale et les éléments semblables répétés (modules), une autre échelle technique intervient en cascade et retient une géométrie pour le détail d'assemblage par l'aboutement qui est une géométrie particulière de jonction. Deux autres traits sont *apportés* par l'oursin : l'agencement en « Y » et la variation graduelle de la taille des plaques sont déterminés par une échelle technique en relation avec les échelles techniques précédentes. Par un effet de relai, elle surdétermine l'agencement de la coque. Ces deux traits géométriques permettent de lier des dimensions du modèle selon certains rapports.

Ensuite, une échelle géométrique intervient en tant qu'échelle de niveau de conception pour découper le dôme en cellules et ensuite appliquer à ces cellules les règles du modèle naturel. Le diagramme de voronoï est alors repris. Plutôt que d'inventer une nouvelle manière de subdiviser, il représente un gain dans l'économie temporelle de la conception. Différentes échelles géométriques ayant des pertinences techniques interviennent alors pour embrayer le modèle (voronoï + dollar des sables) sur l'espace réel, soit :

- un découpage de polygones plats pour la construction en plaque découpée ;
- une limitation des angles maximums des joints aboutés en référence à la précision du laminage robotique.

Différentes échelles techniques prennent le relai pour :

- déterminer la taille maximale des éléments en référence aux personnes mettant en œuvre manuellement la construction ;
- faire référence aux étapes de construction selon la pertinence de rendre la structure stable dans des états intermédiaires et à se passer d'étais (mais les concepteurs ne disent pas quelles mesures exactement sont affectées par cette opération) ;

²⁹ Le point 4 (densité de matière variable), et le point 5 (piliers intermédiaires), par exemple, ne sont utilisés que dans le pavillon de 2015-16. Il est également possible que le catalogue de performances établi dans la publication de fin 2011 peut avoir été une reconstruction a posteriori.

— après avoir pris la mesure du poids (simulé) de la structure, le vent sert alors de référence pour concevoir un ancrage au sol pertinent pour les soulèvements de la structure légère.

Une partie de ces activités s'inscrit dans un espace de conception du modèle paramétrique que nous distinguons, à la suite d'Aurélié de Boissieu, d'un espace de conception architectural comme deux sous-espaces de la conception en général, entre lesquels des relais sont possibles (de Boissieu, 2013). Nous nous focalisons ici sur la conception du modèle architectural, passant volontairement sous silence la conception du méta-modèle paramétrique lorsqu'elle ne provoque pas des opérations de conception architecturale particulièrement liée au modèle naturel.

Le découpage en deux niveaux de conception (plaques de l'oursin = modules constitués de plusieurs planches) déjà présent dans l'esquisse de février 2011 est repris, apparemment selon une pertinence technique liée au processus de fabrication (maniabilité des plaques). Des dimensions différentes du modèle du dollar des sables s'appliquent à ces deux niveaux :

- Les modules sont agencés en sommets trivalents ;
- Les planches sont connectées par aboutements.

Une échelle technique découle alors de ce choix : il faut décider d'une manière de connecter les modules. Aboutir les modules représente une complication technique trop lourde au regard de leur forme. En référence à un montage/démontage possible, les modules sont alors vissés.

Une échelle optique opère enfin pour ouvrir les modules dans l'espace principal et accentuer la différenciation en deux sous-espaces décidés précédemment. Une échelle fonctionnelle prend le relai en déterminant l'installation de l'éclairage en référence à des usages nocturnes.

Le pavillon LAGA de 2014

L'échelle de modèle naturel du dollar des sables n'est pas réitérée pour le pavillon LAGA, c'est plutôt une échelle de modèle qui reprend des dimensions au pavillon de 2011 pour le transporter dans le contexte de ce projet.

Une échelle parcellaire va positionner l'entrée le long du chemin et une échelle optique agit concomitamment pour faire en sorte que les fonctions soient visibles à l'extérieur par une grande ouverture. Une échelle de visibilité ouvre une autre grande baie sur le même modèle pour créer une vue sur le paysage et la topographie en pente descendante. Des essais sont réalisés pour créer d'autres baies, mais une échelle fonctionnelle limite finalement à deux ouvertures : aux deux parties du programme correspondent deux ouvertures et deux parties d'un grand volume séparées par une partie intermédiaire plus basse en forme de col.

Une échelle technique agit comme échelle de niveau de conception pour (re)découper autrement des niveaux en une seule entité simplifiant le processus de construction : les plaques et les modules sont congruents. Dans ce contexte le modèle est répété (agencement par sommets trivalents + aboutements + approximation d'une surface courbe par plaques plates). Une échelle technique intervient, faisant référence aux normes professionnelles de construction, pour décider d'un ajout de vis croisées dans les aboutements pour augmenter les capacités de résistance.

Le découpage du dôme en deux sous parties séparées par une partie surbaissée déclenche en cascade une échelle géométrique (au sujet de la forme des plaques) qui va intervenir

comme échelle de niveau de conception en découpant deux types de plaques : des plaques en nœud papillon au niveau de la partie intermédiaire, les autres restent de formes convexes (hexagonales).

Un modèle multi-agents est alors créé et agit comme un méta-modèle de l'espace architectural. Ce modèle génère un modèle d'espace architectural, dans une relation médiatisée, indirecte par rapport à lui, mais le déterminant néanmoins tout en laissant une marge de manœuvre. Ce modèle intègre essentiellement des échelles techniques selon plusieurs références : le stock de plaques, l'espace de travail du robot, les angles entre plaques pour la fabrication des aboutements. Une échelle géométrique intervient également pour générer l'approximation de la courbe en plaques plates sa pertinence est néanmoins encore une fois technique (système production).

Le pavillon de 2015-16

L'échelle de modèle naturel est ensuite réitérée pour le projet de 2015-16. Une nouvelle prise de mesure du dollar des sables va être effectuée pour en constituer un nouveau modèle. En retenant le modèle de la couture entre plaques, cela va ouvrir un espace de référence particulier, celui du textile. Cela permet une défixation de l'idée implicite de rigidité précédemment poursuivie par les concepteurs (en remettant en question certaines prémisses, devient possible l'exploration d'une direction de l'espace de conception auparavant invisibilisée par ces prémisses). Cela signifie le passage à une pertinence de la flexibilité associée à la légèreté.

En posant la pertinence technique qui sera dominante pour tout le processus, d'affiner au maximum l'épaisseur du lamellé-collé, les concepteurs induisent une échelle technique qui doit déterminer une autre modalité de raccord entre les planches (sans vissage dans l'épaisseur, mais des raccords perpendiculaire à l'épaisseur). Cela coïncide avec l'aspect alvéolaire qui est, dès lors, une mesure distributive retenue (distribution de quantité de matière selon la topologie). De manière binaire elle définit des pleins et des vides. Elle est pertinente, car elle vient en appui de la pertinence de légèreté induite par le textile. L'association des deux aboutit à un pliage des feuilles de lamellé-collé sur elles-mêmes.

La variation de la densité/porosité de matière est une mesure distributive similaire mais qui s'applique à un niveau micro de la matière des modules alvéolaires eux-mêmes. En renvoyant, du côté de l'architecture, à la composition de la matière, elle pousse à prendre différemment la mesure du lamellé-collé et retient sa dimension fibreuse dont la pertinence coïncide avec l'espace de référence textile. Cela va engendrer une échelle de niveau de conception comme méta-échelle d'une échelle technique : le caractère composé du lamellé-collé perd son caractère unitaire. Il est redécoupé en tranches en fonction des efforts mécaniques avec la pertinence sous-jacente d'optimiser les performances structurales tout en limitant la quantité de matière. Une échelle technique est finalement mise en œuvre pour dimensionner l'orientation des fibres dans les différentes tranches composant les plaques de lamellé-collé.

Le principe de gradation de taille des modules était déjà présent dans les modèles précédents, mais il est associé ici à l'idée de croissance qui informe, non l'architecture elle-même (qui ne croit pas), mais le modèle paramétrique génératif (méta-modèle). Une échelle géométrique intervient notamment dans cette phase pour décider d'une trame triangulaire, mais nous manquons de données pour interpréter sa pertinence. Le modèle des lunules de l'oursin va être intégré à ce méta-modèle pour créer des percements au croisement des modules selon une échelle fonctionnelle considérant l'éclairage de l'espace. Une échelle

technique est rendue nécessaire parce que l'aboutement n'est plus suffisant pour le maintien des modules entre eux. Ici, l'espace de référence textile intervient à nouveau pour déterminer un laçage.

Les piliers semblent constituer un modèle repris au dollar des sables pour être importé plus tard dans le processus de conception. Notamment en fonction d'une échelle de visibilité qui tient compte de la voie limitrophe pour soulever la coque.

Le pavillon bois de l'exposition au musée Rosenstein de 2017

L'échelle de modèle naturel ne semble pas être réitérée pour la conception du pavillon Rosenstein. C'est plutôt une échelle de modèle qui reprend certaines dimensions du pavillon LAGA pour le transporter dans le contexte de ce projet.

L'optimisation de l'agencement des plaques procède d'une échelle technique selon la pertinence globale d'une économie de matière. Cependant, elle semble avoir lieu de manière indirecte, médiatisée par les simulations du modèle multi-agents génératif, si bien que les décisions des concepteurs ne concernent pas directement l'espace architectural³⁰.

Une échelle de voisinage vient adapter la taille du dôme aux salles du musée, tandis qu'une échelle fonctionnelle crée trois ouvertures dans le dôme, en référence au passage et à l'apport de lumière des fenêtres.

Le pavillon BUGA de 2019

L'échelle de modèle naturel ne semble pas être réitérée pour la conception du pavillon Rosenstein, c'est plutôt une échelle de modèle qui reprend certaines dimensions du pavillon du musée Rosenstein pour les transposer dans le contexte de ce projet. Les trois ouvertures caractéristiques de ce modèle sont pertinentes notamment au vu d'une échelle parcellaire qui considère les deux axes de passage et le cheminement doux.

Une prise de mesure du site considère l'espace beaucoup plus grand à franchir que lors des pavillons précédents et induit une série d'échelles techniques. Elles vont d'abord opérer un agrandissement de la dimension de la surface de contact des joints en épaississant les modules. De cela découle une prise de mesure du poids des modules qui conduit à un évidement de ces modules en fonction d'une pertinence de légèreté. Cette opération pourrait tout à fait être considérée comme une reprise du modèle alvéolaire du pavillon de 2015-16, car elle implique la même pertinence. Une échelle technique induite par la facilité de fabrication des plaques conduit à dissocier l'unité des modules en plusieurs planches et poutres formant un module composite. La conception de l'évidement déclenche de nouvelles échelles techniques prenant pour référence le montage des modules. Cet évidement produisant un résultat comparable au pavillon de 2011, il déclenche une échelle de modèle qui répète le dispositif d'éclairage installé dans le creux du module.

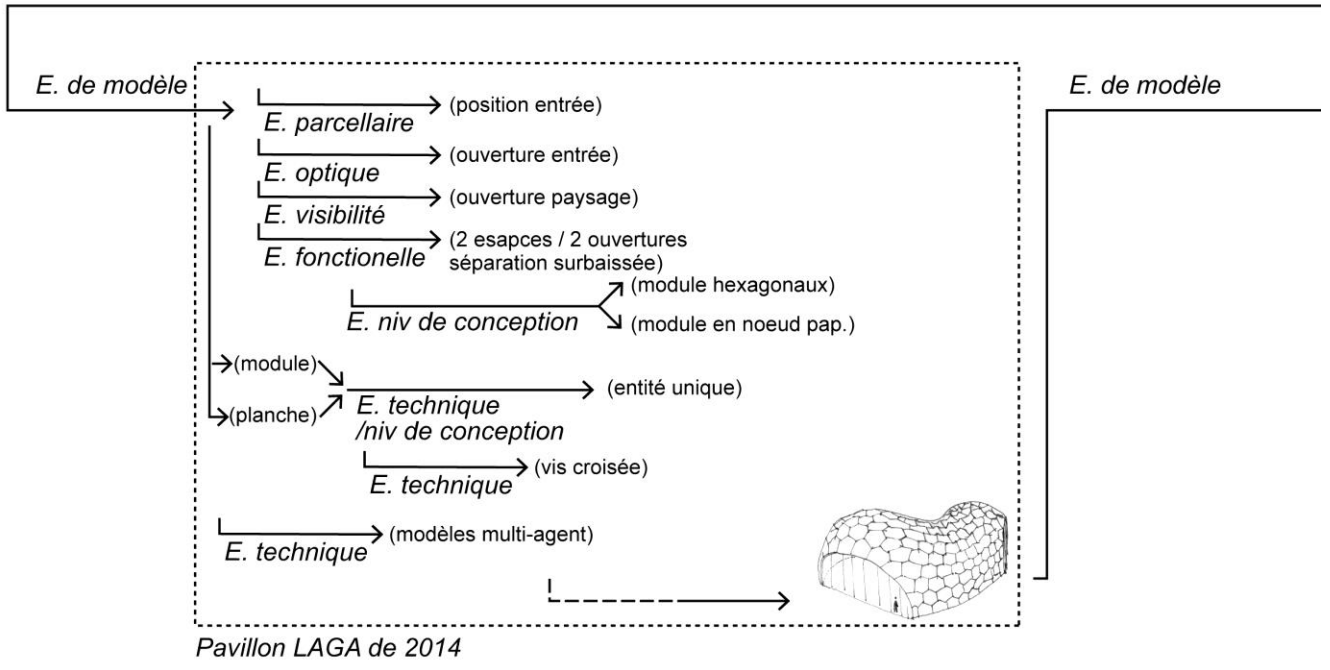
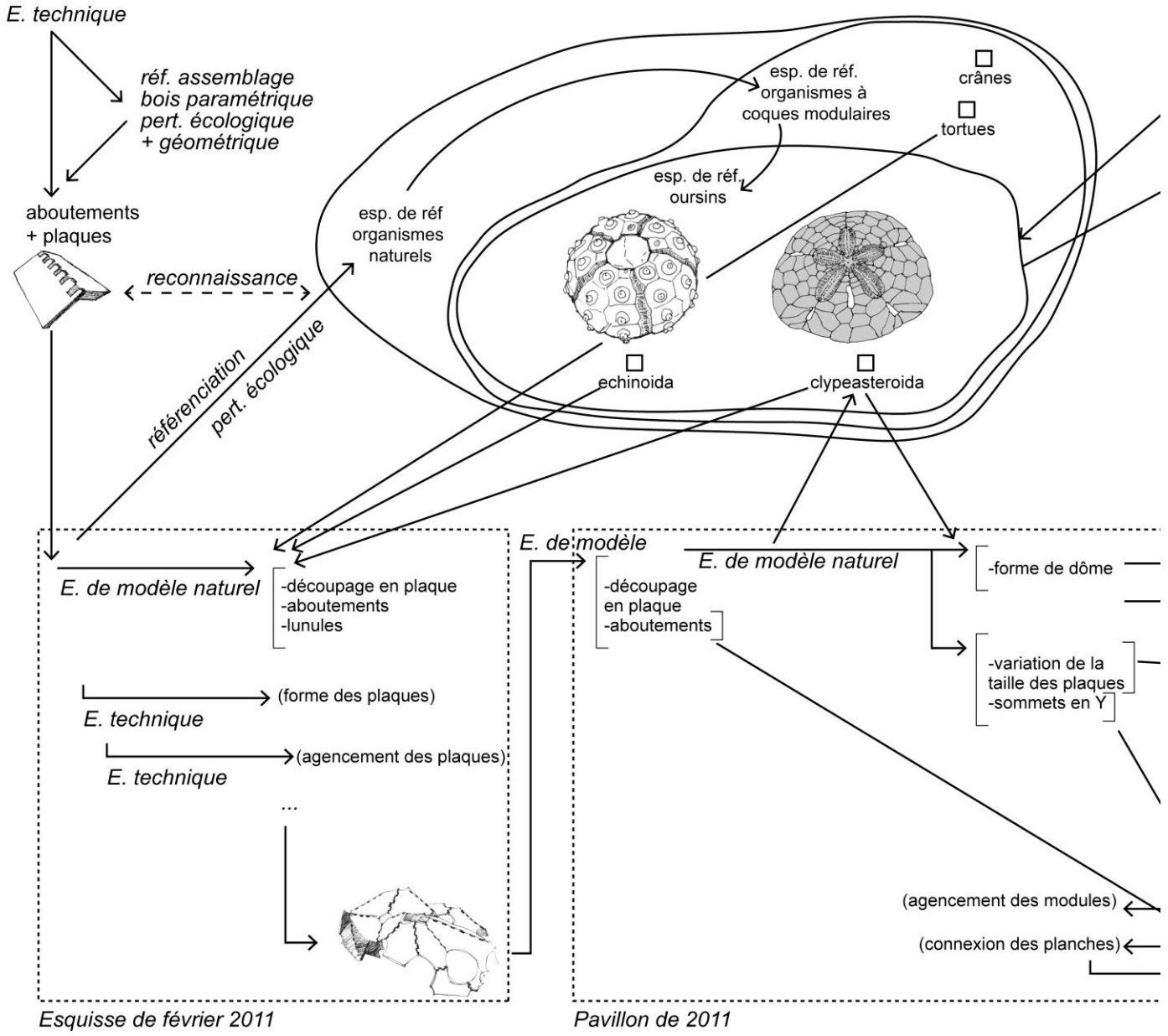
Une échelle technique associée à une échelle optique conduit à créer un angle sur les pourtours de la coque pour éviter une flexion trop importante dans la coque et créer une délimitation visuelle des bords.

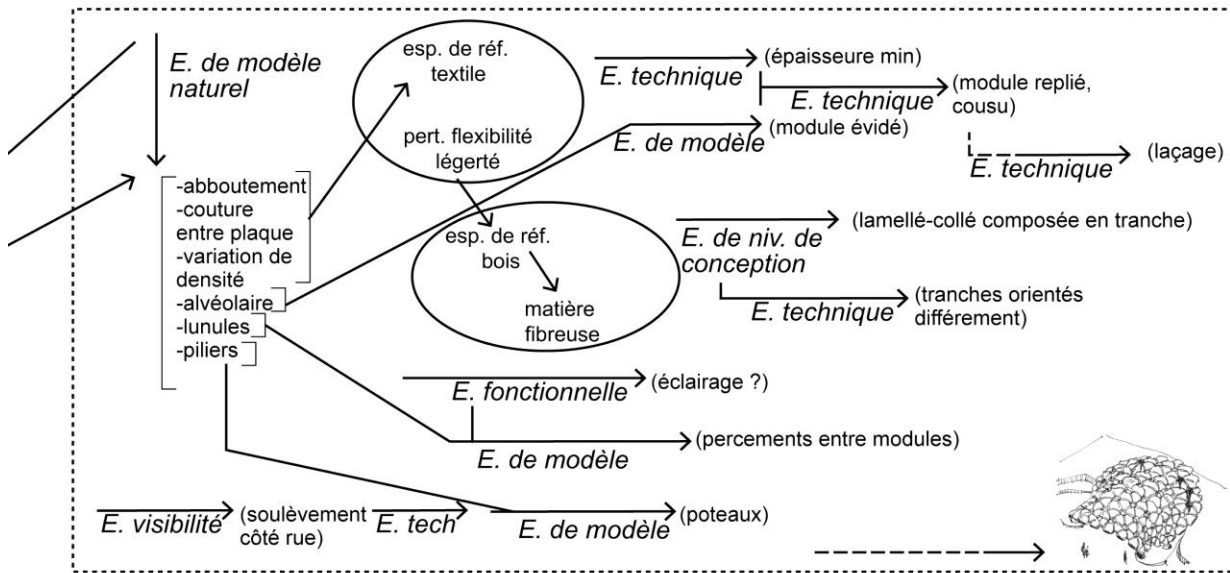
³⁰ Nous manquons de données sur la conception du méta-modèle, des hésitations et des tentatives alternatives réalisées pour décrire ce processus.

Les concepteurs se donnent également comme dimension à laquelle attribuer une mesure le sens de la fibre du bois. Cela peut être également considéré comme un héritage des dimensions du pavillon de 2015-16. Une échelle optique associée à une échelle technique opèrent alors conjointement pour créer des effets de perspectives visuelles tout en considérant le ruissellement des eaux de pluie.

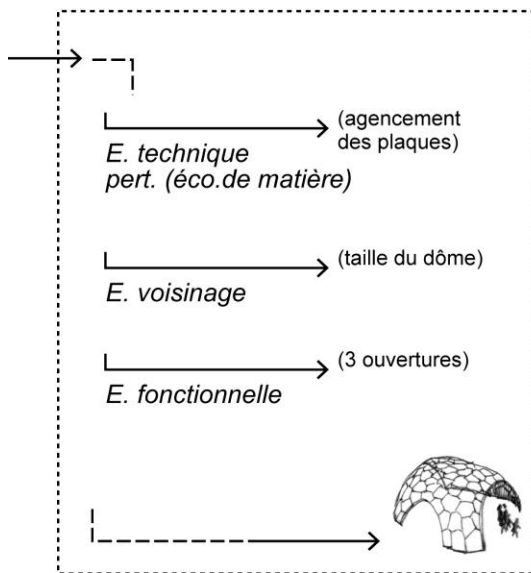
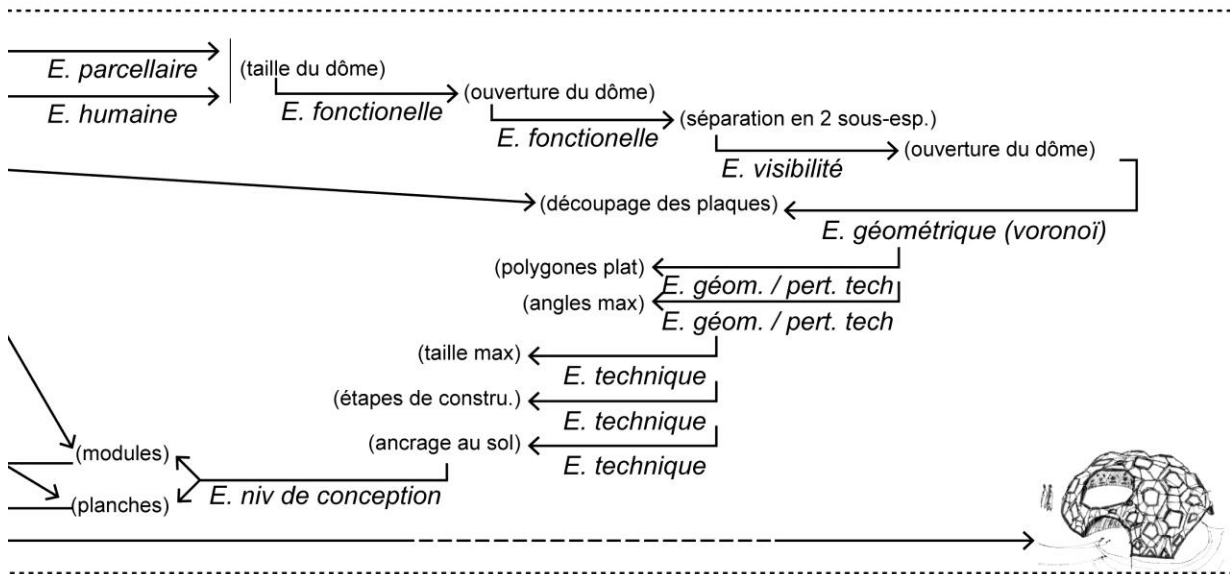
Cette modélisation architecturologique de la conception de la série de pavillons bois de l'ICD/ITKE peut être schématisée par la Figure 13 :

Figure 13 (ci-après) — modélisation récapitulative du processus de conception des pavillons bois de l'ICD/ITKE
(schéma L. Vitalis)

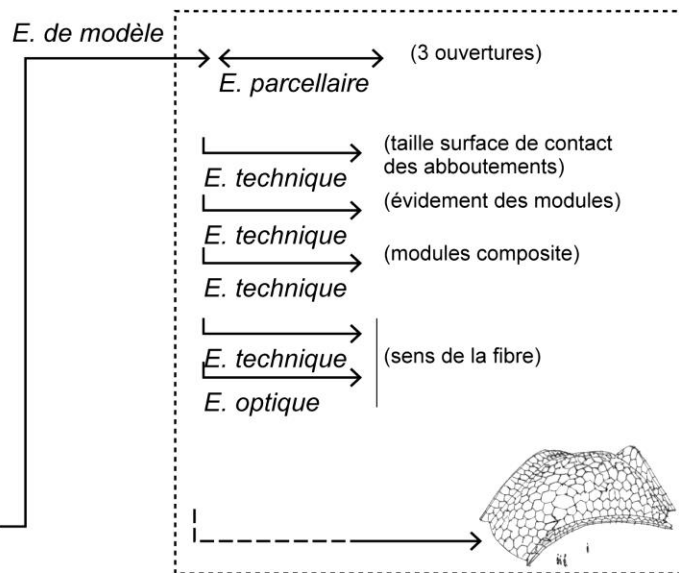




Pavillon de 2015-16



Pavillon du musée Rosenstein (2017)



Pavillon BUGA 2019

IV. Résultats relatifs à la conception architecturale biomimétique

Retour sur le modèle : confirmation et précisions concernant la reprise de modèles

Le modèle architecturologique de la conception biomimétique articulant des échelles d'amorçage, une échelle de modèle naturel et des échelles consécutives convient à la description de ce cas. Il semble ainsi confirmé dans sa valeur générale. Il s'y adapte de deux manières : d'abord l'amorçage est considéré comme un cas particulier, celui d'un amorçage arbitraire (qui n'est pas suscité par la conception architecturale elle-même) ; ensuite les échelles de modèle naturel sont multipliées pour décrire le processus comme procédant de *réitérations* de l'échelle de modèle naturel (processus de bouclage) ou comme un *héritage* des résultats des processus précédents et donc en partie du produit de l'échelle de modèle naturel sans avoir à la réitérer.

Quelques amendements peuvent être proposés pour faire gagner le modèle en généralité. À ce qu'il nous semble, ce qui est repris de l'organisme naturel pour être transposé dans la conception devrait être désigné comme *des modèles*, au pluriel, plutôt que comme des mesures. Cela reviendrait presque au même, car les modèles repris sont constitués d'une pluralité de mesures. Cependant, au-delà du changement de niveau hiérarchique de descripteur, cela permet de faire ressortir deux points particuliers : d'une part, chacun des modèles repris associe des mesures qui ont une cohérence entre elles (par exemple : le principe des sommets trivalents et de l'aboutement des plaques de bois formant la coque sont deux principes solidaires dans la constitution de la rigidité) ; d'autre part, d'un modèle à un autre, il y a une forme d'indépendance (dans le pavillon de 2015-16, le principe des oculi tiré des lunules et le principe des piliers forment deux modèles indépendants au point que les piliers seront ensuite placés au niveau des oculi créés par la transposition des lunules).

Dans l'ordre des généralisations, il faut noter que l'échelle de modèle naturel semble ne pas être embrayante. Elle ne permet pas d'établir une correspondance avec l'espace réel. Elle donne des principes abstraits, sans taille³¹, qui peuvent être appliqués à toutes les situations. D'ailleurs, ils se veulent expressément applicables à différentes architectures, quel que soient leurs sites, que ce soit pour les différents pavillons produits par l'ICD/ITKE ou dans certaines de leurs publications présentant ces principes comme des outils utiles pour d'autres concepteurs dans d'autres contextes. Cela pouvait être aussi constaté dans le cas précédent du *bird's nest* de Herzog et de Meuron (Vitalis, 2020). Ceci corrobore l'idée qu'en raison d'une échelle humaine applicable lors des échelles de modèle naturel, la taille ne soit *généralement* pas une dimension pertinente à reprendre pour la conception architecturale. Le « généralement » tient au fait que l'on pourrait imaginer des organismes suffisamment grands, repris pour concevoir des architectures suffisamment petites pour que ce ne soit pas toujours le cas (en caricaturant : un éléphant pour un abribus).

³¹ En reprenant les deux axes de la mesure définis par Philippe Deshayes (2000), l'absence de taille des principes tirés des oursins apparaît très clairement selon l'axe métonymique (quantitatif) de la mesure. Il faudrait cependant, considérer l'axe métaphorique de la mesure qui peut être illustré par la phrase « ceci est une maison » par laquelle une taille est impliquée, même si elle est approximative ; c'est une taille différente de celle d'une tour, ou d'une niche. Selon cet axe métaphorique, les principes tirés de l'oursin ne semblent pas non plus embrayants.

L'étape de reconnaissance entre architecture et nature

D'autre part, un élément semble important à retenir de cette analyse, c'est l'isomorphisme effectué par la *reconnaissance* dans l'oursin de traits caractéristiques de la construction bois. Ceci tendrait à définir la constitution du modèle, non pas comme s'effectuant uniquement à partir d'un objet qu'est l'organisme naturel, mais, et cela dans une phase initiale, à partir de deux objets que sont, d'une part, l'organisme naturel et, d'autre part, de certaines caractéristiques architecturales prédéfinies. La mise en correspondance des deux objets conduits à identifier une série de traits communs qui constituent un premier modèle. C'est dans un temps ultérieur que l'organisme naturel peut fournir des traits supplémentaires qui seront ensuite ajoutés au modèle architectural ; on passe alors de l'isomorphisme au polymorphisme au sens de Le Moigne (1977/2006, p. 77). Cette remarque nuance le constat concernant le non-embayage des échelles de modèle. Car si les principes sont abstraits, ils sont néanmoins d'abord choisis pour une correspondance avec des principes de la construction bois qui, eux, ont une valeur embrayante (ils impliquent une certaine taille dans l'espace réel).

Retour sur les hypothèses : biomimétisme professionnel vs académique

Les hypothèses mises à l'épreuve par ce travail qui consistent à poser que : (1) les processus de conception biomimétique sont différents lorsqu'ils se déroulent en contexte professionnel et lorsqu'ils se déroulent en contexte académique ; (2.1) ses différences portent sur le fait que les architectes exerçant dans le monde professionnel sont soumis à des contraintes économiques et techniques liées au monde du BTP, alors que le contexte académique serait plus libre vis-à-vis de ces contraintes et que (2.2) le contexte académique permettrait la collaboration effective avec des biologistes et donc l'implication de connaissances biologiques, en amont de la conception, conduisant à des processus de conception biomimétique dits « bottom-up » ou « biology influencing design » (Helms et al., 2009). Une hypothèse plus spécifique concerne le fait que (3.1) la conception biomimétique académique pose de manière arbitraire le recours à un modèle naturel (non pas selon une pertinence pour l'espace architectural, mais seulement une pertinence pour l'espace de conception) et que (3.2) ce modèle naturel intervient sans découpage préalable d'un niveau de conception au sein du projet. Il concerne donc l'entièreté de l'objet architectural qui sert de niveau pour la répétition du modèle naturel. Enfin, une hypothèse implicite (4) pose que les hypothèses (1), (2.1), (2.2), (3.1) et (3.2) sont liées.

L'étude du cas de la série de pavillons bois de l'ICD/ITKE confirme les hypothèses (3.1) et (3.2) : en raison du thème biomimétique de l'exercice du studio de projet, suivi par Oliver David Krieg en 2010-2011, le recours à des organismes naturels est posé a priori et n'a pas de pertinence pour un projet d'architecture particulier. Ces modèles sont appliqués à l'ensemble du projet puisque, le recours à un organisme naturel est posé dès le départ de la conception. Cela confirme une partie de l'hypothèse (2.1), car le modèle naturel peut s'appliquer à l'ensemble du projet architectural en raison de sa complexité limitée : programme extrêmement limité, voire absent, bâtiments sans étages, parfois non étanches. Ainsi, des liens sont établis entre les hypothèses (3.1) et (3.2) et entre les hypothèses (3.2) et (2.1) ce qui confirme une partie des hypothèses (4) et (1).

Toutefois, une partie contenue implicitement par l'hypothèse (2.1) est infirmée par ce cas : la liberté dont jouiraient les concepteurs biomiméticiens en contexte académique ne signifie pas une liberté de conception qui s'affranchirait des contraintes techniques pour explorer une richesse d'espace de références hétérogènes. Dans les pavillons étudiés, l'espace de

conception est majoritairement exploré sous l'impulsion d'un espace de référence technique, selon une pertinence qui vise, sans arrêt, un accroissement des performances de tel ou tel aspect de l'édifice. Certaines échelles fonctionnelles, parcellaires, de visibilité sont à l'œuvre, mais il nous a fallu les inférer des données, car les concepteurs eux-mêmes mettent très peu l'accent sur ces espaces de références, même lorsqu'ils les mobilisent. D'autres espaces de références comme le symbolique, le voisinage ou le socio-culturel ne semblent pas mobilisés. Sans doute, cela n'est pas généralisable, et la présence parmi les collaborateurs des ingénieurs de l'ITKE explique, en partie, cette orientation de la conception, mais aussi le fait que l'ingénierie domine les études biomimétiques au détriment de thématiques plus architecturales, artistiques ou symboliques. En comparaison toutefois, la conception du stade de Pékin d'Herzog et de Meuron mobilise une plus grande richesse d'espaces de référence.

L'hypothèse (2.2) est invalidée : si les biologistes sont bien présents dès le studio de projet de 2010-2011, cela n'a pas engendré un processus de conception qui soit strictement bottom-up. En tout cas, pas en un sens particulier qui impliquerait de partir d'un organisme particulier pour aller vers l'architecture. Ce point nécessite une discussion qui est reportée ci-après (cf. « Top down vs. Bottom up»). Ainsi l'hypothèse (2.2) n'est pas solidaire de l'hypothèse (3.1), car le recours à un organisme naturel est certes posé de manière arbitraire, mais également générale, ce qui a pour conséquence qu'il n'implique aucun organisme particulier. La preuve étant que, malgré la présence de botanistes parmi les encadrants du studio de projet, Oliver David Krieg ne se tourne pas vers les plantes mais vers des organismes du règne animal à squelettes modulaires. L'hypothèse (4) est donc partiellement invalidée.

Biomimétisme top down vs. bottom up

Les chercheurs de l'ICD/ITKE parlent du cas d'étude du pavillon de 2011 et plus particulièrement de l'introduction de l'aboutement bois paramétrique dans le studio de projet dédié à une approche biomimétique comme un paradoxe. Ils considèrent que ce projet introduit une approche top-down (partant de connaissances ou de problèmes architecturaux pour les alimenter ensuite avec des informations biologiques) dans le cadre d'une approche bottom-up (de la biologie à des applications architecturales). Il faut pourtant se demander si c'est un cas si particulier ? Il semble difficile de nier que tout architecte, tout concepteur, arrive dans un projet biomimétique avec sa trajectoire, son bagage culturel, ses connaissances spécifiques et ses centres d'intérêt. Demander au concepteur une neutralité, c'est nier sa personnalité, son style et ses compétences spécifiques. En fait, cette négation est simplement une commodité théorique qui découle du besoin de distinguer, en les opposants, les deux approches bottom-up et top-down.

Une analyse plus fine est donc nécessaire. Pour cela, nous proposons de distinguer des projets biomimétiques généraux, de projets biomimétiques particuliers. Le biomimétisme général correspond à des processus biomimétiques sans modèles naturels déterminés : on sait simplement qu'il y en aura un par la suite, quel qu'il soit. Le biomimétisme particulier correspond à des processus qui travaillent à transposer un organisme naturel déterminé (un oursin, un oiseau, un troupeau, un nid...) et pas un autre. Ces termes qualifient bien évidemment des moments d'un processus de conception. Ainsi, il faut envisager que des processus de conception biomimétiques généraux deviennent des processus biomimétiques particuliers (c'est le cas de la série des pavillons de l'ICD/ITKE étudiée ici). Cependant, il y a aussi des processus de conception qui ne sont pas biomimétiques au départ (ni généraux ni particuliers) et qui deviennent directement des processus biomimétiques particuliers.

D'un point de vue théorique, on peut maintenant décrire l'ensemble des processus qui alternent entre des phases de biomimétisme général et de biomimétisme particulier, mais aussi des phases non biomimétiques, soit en amont, avant le déclenchement d'une idée biomimétique, soit après, par abandon de l'idée biomimétique (cf. Figure 14). On envisage alors des degrés : des processus de conception qui sont plus ou moins bottom-up selon que le recours à l'organisme naturel a lieu plus ou moins tôt dans le processus de conception.

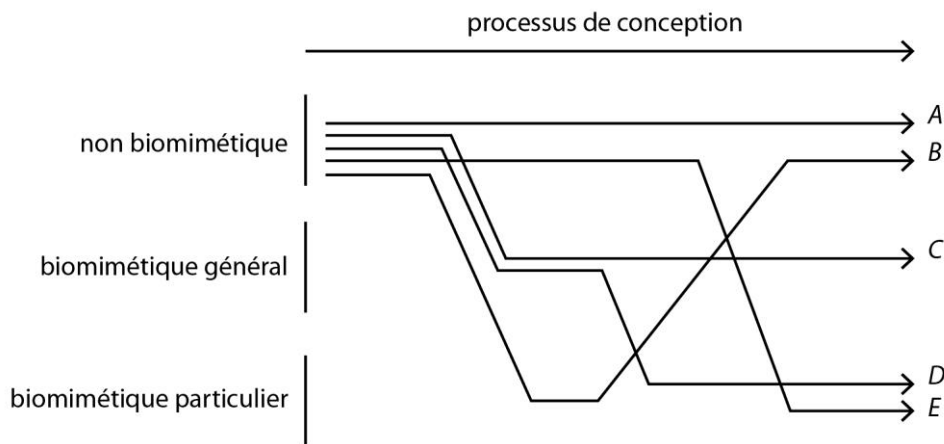


Figure 14 — types de processus biomimétiques général et particulier et leur alternance (schéma L. Vitalis)

A (contrôle négatif) : un processus non biomimétique de bout en bout. Par exemple, le parc de La Villette de Bernard Tschumi.

B : Un processus qui après avoir tenté de transposer un organisme naturel dans le projet architectural, a abandonné l'idée.

C : Un processus qui serait biomimétique sans jamais convoquer d'organismes particuliers. Exemple : un concepteur qui s'appuierait sur un principe d'auto-organisation, perçu comme un caractère spécifique de la vie, mais sans jamais s'intéresser à une forme d'auto-organisation particulière d'une forme de vie déterminée.

D : Un processus qui, après être passé par une phase de biomimétisme général, sélectionnerait un organisme naturel particulier pour continuer. Exemple : la série de pavillons bois de l'ICD/ITKE ici étudiée.

E : Un processus qui passerait directement à la transposition d'un organisme naturel particulier sans passer par une phase biomimétique générale. Exemple : le stade de Pékin conçu par Herzog et de Meuron étudié dans le rapport précédent.

Il est bien entendu possible de critiquer cette limite entre biomimétique et non-biomimétique : toute activité de conception opère à partir de matériaux et de données existantes parmi lesquels certains peuvent être considérés comme relevant de la nature ou non. C'est sur cette base qu'il est possible de distinguer entre des processus biomimétiques et non-biomimétiques. Cependant, cette distinction ne doit pas être comprise comme universelle, elle dépend des concepteurs qui délimitent le domaine du naturel et du non-naturel, chacun à leur manière, et souvent suite à des apprentissages culturels. On voit par exemple qu'Oliver David Krieg en considérant, en tant que modèles naturels, le crâne humain côte à côte avec la carapace de tortue, donne un sens naturel à certains objets humains. Plus radicalement, il est possible également de soutenir, comme le fait Philippe Descola dans un entretien, que « la nature, ça n'existe pas » (Descola & Kempf, 2020). Dans ce cas, aucun processus de conception n'est biomimétique, ou tous les processus de conception sont biomimétiques, ce qui revient au même parce que la distinction n'est plus faisable. Mais, si la

distinction entre biomimétique et non-biomimétique importe, c'est que les concepteurs ont une ontologie implicite dans laquelle ils considèrent que certains groupes d'objets qu'ils nomment « naturels » (peu importe la définition qu'ils en ont, ou s'ils ont raison) possèdent des qualités particulières qui les rendent pertinents comme matériaux pour la conception.

De plus, il faut remarquer que certains principes biomimétiques généraux sont de peu d'effet sur la conception. Ainsi, nous avons passé sous silence, dans l'analyse qui précède, l'idée que mobilisent les concepteurs de l'ICD d'un « morphospace » (Schwinn & Menges, 2015). Il s'agit d'un espace des formes phénotypiques possibles qui est repris à la biologie évolutionniste systématique. En biologie, cette notion permet de décrire des relations phénotypiques entre organismes différents. Dans la démarche de l'ICD, cette notion leur sert à définir un espace des solutions formelles productibles par la fabrication robotique. Pourtant, de même que le concept biologique utilisé ne décrit pas des ontogenèses (au cours duquel des individus sont « conçus »), mais retrace a posteriori l'histoire d'une phylogenèse concernant des familles d'individus... De même pour les pavillons de l'ICD, cette notion sert a posteriori à décrire après-coup différentes formes de pavillons productibles, au moment où leur productibilité est déjà déterminée (et non au moment où elles sont en train d'être conçues). De plus, pour que ce « morphospace » puisse jouer un rôle actif dans la conception et l'orienter de manière déterminée, il aura fallu choisir un espace phénotypique particulier, celui d'une espèce (de certains oursins par exemple), et appliquer les relations des individus de cet espace aux relations entre individus de l'espace des pavillons. Or ce n'est pas ce qui a lieu. En tenant le « morphospace » comme une notion générale, celle-ci ne les oriente d'aucune manière dans leur choix de conception et de détermination des espaces des pavillons. Ainsi, pour généraliser, un biomimétisme général induit difficilement une conception biomimétique particulière, car il ne l'oriente pas.

C'est le même problème que rencontrent également les questions d'auto-organisation (liées au système multi-agents), d'auto-poïèse, ou encore des matériaux auto-nettoyants, auto-réparants etc. que certains biomiméticiens généralisent en parlant d'« auto-quelque chose », *self-X* (Speck et al., 2015) et auxquels ils attribuent alors une qualité écologique. Pourtant, en déplaçant la question du côté de la conception, il est patent que la conception ne s'effectue pas toute seule. Certes, on peut considérer les humains qui conçoivent ces architectures comme faisant partie de la nature, mais pour autant, étudier la conception biomimétique comme un processus naturel avec la biologie serait de peu d'aide (car toute conception, biomimétique ou non, devrait alors être considérée comme « naturelle »). La conception peut utiliser des matériaux ou procédures auto-X via des modèles informatiques, mais si elle est en posture d'inventer des matériaux ou des procédures auto-X alors cette invention n'est pas elle-même auto-X, mais procède d'une externalité.

On rencontre encore cette question dans le principe, qui se veut écologique parce qu'économe, consistant à utiliser « moins de matière » par « plus de forme » que l'ICD/ITKE revendique pour le pavillon BUGA³². Toute la question est de savoir comment, en particulier, s'établit cette relation entre forme et matière. De quelle forme s'agit-il ? À quel organisme cette forme est-elle prise ? Il y a de multiples façons d'établir une relation proportionnelle inverse matière/forme (sans parler de l'ambiguïté de la quantification d'un terme comme « forme »). Aussi, ce principe ne sert que d'objectif très général qui n'oriente pas la conception. On peut toujours suivre cet objectif sans s'inspirer d'aucun organisme naturel.

³² « the biomimetic principle of using "less material" by having "more form" » (cf. www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019 consulté le 15/07/2020)

V. Spécificités et problèmes des analogies « nature : : architecture »

Cette étude permet de soulever plusieurs problèmes qui se posent à l'étude du biomimétisme au moyen du concept d'analogie. Ces difficultés éclairent des questions propres à la théorie des modèles analogiques. La capacité cognitive à établir des analogies entre le domaine de la nature et celui de l'architecture passe pour être une étape clé de l'activité de conception biomimétique³³. Il faut pourtant être plus précis quant au type d'analogie dont il est question et des limites explicatives à l'utilisation du concept d'analogie.

L'importance des propriétés semblables dépend du contexte de la conception

Pour aborder la question tout de go, envisageons l'analogie entre la structure squelettique de l'oursin dollar des sables (son test) et la structure porteuse d'un pavillon de l'ICD/ITKE. Le principe de l'analogie est que d'un objet à l'autre, des propriétés soient similaires malgré la différence entre d'autres propriétés. On peut dresser la liste de ces propriétés de manière générale, en se basant, par exemple, sur l'état du projet au pavillon LAGA. Cela donnerait quelque chose comme :

test du dollar des sables	::	structure porteuse du pavillon
Forme du test (dôme aplati)	≠	Forme structurelle (dôme sphérique)
Formes des plaques du test (penta ou hexagonales avec certains côtés courbes)	≠/≠	Forme des plaques structurelles (penta-, hepta- ou hexagonales avec côtés droits)
Organisation géométrique des plaques (un sommet pour trois plaques)	=	Organisation géométrique des plaques (un sommet pour trois plaques)
Assemblage « abouté » des plaques	=	Assemblage abouté des plaques
Matière du test (stéréome calcaire)	≠	Matières des plaques (bois)
Structure multidirectionnelle du stéréome	≠	Structure directionnelle des fibres du bois
Piliers de soutien intermédiaires	≠	Absence de piliers intermédiaires
Croissance par production de calcite	≠	Découpage de plaques existantes (chutes)
Environnement (pression sous-marine, enterré une couche de sédiments)	≠	Environnement (pression atmosphérique, à l'air libre)
...		...

Cette liste est extensible, il est possible d'ajouter indéfiniment d'autres propriétés. Mais il est remarquable que la liste des différences semble être extensible à l'infini, tandis que la liste des ressemblances est finie. Cela est dû au caractère construit du modèle de l'oursin retenu pour la conception qui diffère du caractère d'objet empirique de l'oursin comme objet d'étude de la biologie. L'étude biologique de l'oursin est susceptible de faire apparaître de nouveaux caractères et l'ensemble des études biologiques sur les oursins ne peut être convoqué pour ce projet. En revanche, les propriétés choisies par les concepteurs s'énoncent dans un discours et possèdent ainsi un caractère fini. C'est un effet normal de la distinction entre l'objet construit (modèle), et l'objet empirique (cf. Vitalis & Chayaamor-Heil, à paraître).

On pourrait néanmoins vouloir introduire des différences de valeurs entre certaines propriétés, en posant que certaines propriétés sont plus importantes que d'autres et donc que certaines similitudes seraient plus importantes que certaines différences. Or, une telle

³³ Voir par exemple (Pohl & Nachtigall, 2015).

différence de valeur reste particulièrement délicate à établir dans une analogie. Mary B. Hesse indique bien qu'il n'y a pas de moyens de sous-peser l'importance des caractères et qu'il n'est donc pas possible de comparer des degrés de similarité : dans les cas pratiques, les analogies sont établies en considérant certaines différences comme non pertinentes donc négligeables. Ce caractère négligeable n'est pas propre aux termes de l'analogie, mais il est constitutif de la capacité à établir une analogie (Hesse, 1966, p. 115-116). Nelson Goodman, pour sa part, avance que la notion d'importance des propriétés partagées est relative au contexte et aux intérêts en jeu (Goodman, 1972/2020, p. 24). Le contexte est celui de la conception, or, la liste des propriétés ci-dessus est établie *a posteriori*, après le processus de conception. Lors de la conception, les enjeux sont posés par les concepteurs, ils ne sont pas absolus, déductibles du produit de la conception. Ainsi, on ne devrait pas juger les analogies biomimétiques sur les produits conçus à moins d'être clairs sur les enjeux et les contextes dans lesquels ces jugements prennent place et de rester conscients que ces contextes diffèrent potentiellement de ceux qui ont présidé à l'établissement de l'analogie.

Les analogies biomimétiques dépendent de la capacité à négliger des propriétés

La notion d'analogie appelle une autre remarque concernant son efficacité ou sa performance. La logique de l'analogie voudrait qu'une relation verticale s'établisse entre les termes de l'analogie, cette relation est une relation de causalité permettant d'atteindre certains buts : si la même relation verticale est réalisée dans chaque domaine de l'analogie alors les mêmes effets devraient être causés dans les deux domaines. Ces effets ou buts recherchés dans le cadre de la conception et des échelles de modèles naturels, sont reflétés par les pertinences attribuées par les concepteurs aux modèles. Dans le cas du dollar des sables, il s'agit d'une visée d'optimisation du rapport poids/résistance, d'une possibilité de variété formelle, ou d'une valeur de développement durable... Mais quelles sont les propriétés qui entrent dans la relation causale ? Cette relation causale serait un moyen de déterminer l'importance des propriétés à prendre en compte dans l'analogie. Pourtant, le fait que ce soit précisément une relation et non des propriétés isolées semble poser problème :

Prenons par exemple un espèce particulière d'oursin, la fève des mers (*Echinocyamus pusillus*) : sa résistance exceptionnelle résulte de la combinaison de la forme de son squelette en relation avec les contreforts internes de son squelette, sa taille (quelques dizaines de millimètres) et sa matière (calcaire). Cette combinaison de caractères est sans doute adaptée à son milieu de vie (enterré dans le substrat). Pris isolément, il est douteux qu'un principe fonctionne aussi bien. Toute la difficulté réside dans le fait que les dimensions du modèle retenues par les concepteurs sont isolées alors qu'elles font systèmes dans la nature. Détachées les unes des autres elles sont traitées de manière indépendante. Cela explique notamment que des contreparties doivent être ajoutées dans l'architecture, comme par exemple l'ancrage au sol du pavillon qui est nécessaire pour éviter les soulèvements au vent dû à la légèreté de la structure. La légèreté de la structure de l'oursin n'est pas, pour l'oursin, un gain dans l'évolution produisant un inconvénient à compenser par ailleurs : si l'on s'en tient aux explications de Seilacher (1979) l'ordre des *Clypeasteroidea* évolue à partir à partir d'oursins réguliers (dont la structure est déjà légère) en raison d'un changement de mode de vie (passant d'une vie sur un substrat solide à une vie sous des sédiments sableux). Ce changement de comportement conduit, entre autres et dans un second temps, la famille des *Mellitidae* à chercher leur nourriture dans les zones houleuses. Pour maintenir une stabilité ils développent une ceinture de lestage en ingérant des grains de magnétite qui sont conservés dans leurs intestins. Mais le principe de la ceinture de lestage des dollars des sables a une raison écologique et évolutive différente de l'ancrage du pavillon de Stuttgart. D'ailleurs les concepteurs ne créent pas l'ancrage en référence à l'analogie.

De plus, le fait que les propriétés soient isolées dans la conception repose sur le fait que les concepteurs séparent ces propriétés en considérant l'organisme naturel. Cette séparation persiste entre des propriétés qui sont pourtant toutes transposées à l'architecture. C'est par exemple le cas lorsque les concepteurs de l'ICD/ITKE pensent de manière séparée l'application de la règle des sommets trivalents de la règle de l'aboutement lors du pavillon de 2011. Cela peut paraître curieux, car, si l'on s'en tient à l'aboutement comme principe biologique, la traduction architecturale signifierait que le pavillon soit formé de plusieurs oursins vissés côtes à côtes. Alors que si l'on s'en tenait à l'agencement en Y, la traduction architecturale signifierait bien le pavillon comme un seul oursin. Mais chez l'oursin, les plaques ne sont pas distinguées des modules. Ainsi, dans le pavillon, si l'on compte le nombre de plaques (planches) qui se rencontrent en un sommet, il y en a beaucoup plus que trois. La règle de trois ne marche que pour une lecture basée sur les modules. Il faut comprendre ici que les principes biologiques sont dissociés et appliqués de manière indépendante.

Ainsi, il semble opportun de revenir à la proposition de Mary B. Hesse concernant l'importance pour les analogies de pouvoir négliger des propriétés. Penser le biomimétisme architectural en termes d'analogies induit une idée trompeuse qui consiste à chercher des propriétés similaires. Or il nous semble que la conception biomimétique repose bien plus sur la capacité à négliger des caractères biologiques et à les dissocier. Cette capacité semble être une opération cognitive clé des concepteurs biomiméticiens.

En suivant cette idée, il est possible de comprendre la part d'interprétation dont dépend l'analogie. Prenons par exemple la géométrie des plaques du test d'un oursin. Cette géométrie peut être sujette à interprétation dans la mesure où les côtés de ces plaques ne sont pas droits et présentent parfois des courbes très marquées. Ces courbes ne se retrouvent pas dans les plaques des pavillons qui sont conçus comme des polygones stricts et non à partir de la forme naturelle des plaques des oursins. Selon le degré de tolérance avec lequel on considère le côté courbe d'une plaque, cette courbe peut être considérée comme un seul segment ou comme plusieurs segments séparés par un sommet supplémentaire se trouvant alors à la jonction de seulement deux plaques, soit un sommet bivalent (cf. Figure 15). La notion de sommet trivalent sur laquelle se base la conception des pavillons est alors elle-même relative à l'interprétation.

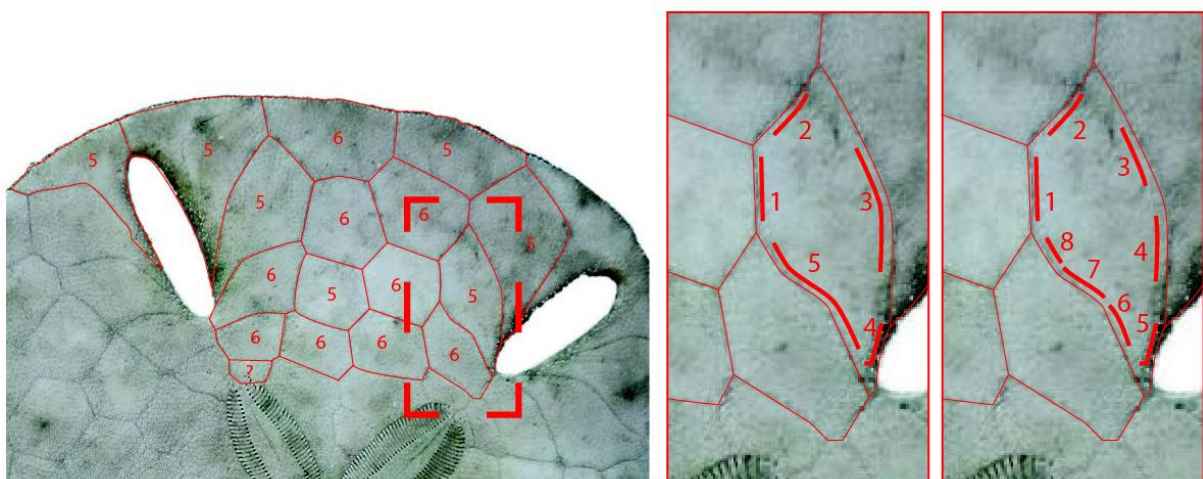


Figure 15 — variabilité des interprétations du nombre de sommets et de côtés des plaques squelettiques d'un oursin (schéma L. Vitalis d'après Grun et al., 2019, fig. 96)

Ainsi, la réalisation dans l'objet conçu des performances qui sont visées par les concepteurs semble moins dépendre de la relation verticale entre des propriétés biologiques qui paraît

difficile à reproduire en architecture, mais plutôt de la capacité à produire une nouvelle relation verticale dans les propriétés de l'objet. Cette nouvelle relation peut constituer une causalité différente pour un effet similaire.

Le flou taxinomique de l'analogie biomimétique

À la lecture des textes des concepteurs, il est difficile de savoir sur quel oursin précisément ils concentrent leurs efforts, plusieurs oursins sont invoqués, parfois mêmes plusieurs familles. Au début du processus de conception, les concepteurs semblent confondre les différents oursins en nommant « dollar des sables » un test de *Phyllacanthus imperialis* appartenant à l'ordre des *Cidaroida*, ayant donc une symétrie radiale que le dollar des sables ne partage pas (Krieg et al., 2011, p. 576).

Il semble difficile, en fin de compte, de croire qu'ils s'attachent à une espèce d'oursin en particulier. Ainsi, plutôt qu'une analogie précise posée par les concepteurs, c'est plutôt une série d'analogies entre lesquels les concepteurs naviguent :

$$\frac{\text{Oursin de l'ordre des } \textit{Clypeasteroidea}}{\text{propriétés de cet oursin}} :: \frac{\text{Oursin de la famille des } \textit{Mellitidae}}{\text{propriétés de cet oursin}}$$

$$:: \frac{\text{Oursin du genre } \textit{Mellita quinquiesperforata}}{\text{propriétés de cet oursin}} :: \dots \frac{\text{pavillon}}{\text{propriétés du pavillon}}$$

Cela signifie que des propriétés sont sélectionnées à différents niveaux taxinomiques lors de l'exploration de l'espace de référence de l'oursin.

Le dollar des sables est pensé pour son caractère exemplaire, c'est pour les concepteurs un animal parfait au sens de Dan Sperber (1975). Ils mettent entre guillemets la logique taxinomique pour la retraiter symboliquement : les défauts accidentels de certains oursins particuliers n'importent pas, c'est une norme statistique qui est invoquée et qui accentue certains traits caractéristiques des oursins pour en faire des oursins idéaux.

La question de la spécificité de la connaissance biologique

Pour la conception des pavillons de l'ICD/ITKE, les oursins ont été considérés comme des structures inertes plus que des êtres vivants. L'oursin n'a de coque que lorsqu'il est mort, autrement il s'agit d'un endosquelette recouvert de tissus vivants. La biologie concernée dans ces travaux est ainsi une paléontologie étudiant des squelettes. Si la paléontologie infère des comportements vivants à partir des squelettes comme le fait Adolf Seilhacher, ce n'est pas ce qu'en retiennent les concepteurs de l'ICD/ITKE dont les biologistes se coupent même du contexte (voir par exemple Grun et al., 2018)

Ainsi, le phénomène de reconnaissance (ou isomorphisme) s'il semble faciliter l'analogie et donc le processus de conception, a pour contrepartie de traiter le terme « naturel » de l'analogie non comme un vivant, mais de manière aussi artificiel que l'architecture. Il faut remarquer que c'est une propriété des analogies que Max Black a décrite dans sa conception interactionniste de la métaphore : les deux analogues sont modifiés par l'analogie. L'analogie transforme les termes (repris dans Hesse, 1966, p. 156-164).

La géométrie, un intermédiaire analogique insuffisant

L'analogie met en relation deux ensembles et peut être comprise comme un rapport de rapport, soit une proportion. L'importance de la géométrie que l'on observe dans le biomimétisme des concepteurs de Stuttgart soutient cette idée. Il faut pourtant remarquer que les rapports de proportionnalités de l'oursin ne sont pas conservés dans l'architecture. L'analyse montre que la mise à l'échelle du modèle naturel dans les pavillons procède à une augmentation non linéaire de la taille de l'oursin : cela est notamment dû au fait, remarqué plus haut, que le modèle naturel que se construisent les concepteurs retient certaines dimensions de manière indépendante alors qu'elles font système dans l'organisme naturel. Prenons l'exemple du pavillon de 2015-16, et des rapports entre le squelette, les plaques du squelette, l'aboutement des plaques et les fibres de l'aboutement. Voici, d'après les informations qui ont pu être récoltées, les tailles approximatives comparées de ces éléments³⁴ :

	Dollar des sables	Pavillon de 2015/16
(A) squelette/coque	env. 10 cm	env. 10 m
(B) plaque/module	env. 1 cm	env. 1 m
(C) aboutement	env. 0.2 mm	env. 5 cm
(D) fibre de l'aboutement	env. 10 µm	env. 10 cm

Ainsi, chez le dollar des sables les rapports de proportionnalités entre ces éléments sont environ :

$$A = B \times 10$$

$$B = C \times 5000$$

$$C = D \times 20$$

Tandis que dans le pavillon de 2015, les rapports sont devenus les suivants :

$$A' = B' \times 10$$

$$B' = C' \times 20$$

$$C' = D' \times 0.5$$

Ainsi, pour passer de l'oursin au pavillon, les rapports proportionnels sont à peu près inchangés pour ce qui est des rapports entre la taille des plaques et la taille de l'ensemble du squelette. Elles sont cependant profondément modifiées pour d'autres rapports :

$$A'/B' \approx A/B$$

$$B'/C' = B/C \times 0.004$$

$$C'/D' = C/D \times 0.025$$

Cela signifie que les transformations de taille opérées entre l'organisme naturel et le pavillon architectural ne sont pas homogènes. Le processus de conception conduit à augmenter la taille des éléments du dollar des sables de manière différentielle :

Dollar des sables	facteur	Pavillon de 2015-16
A taille du squelette	x 100	= A' taille de la coque
B taille d'une plaque du squelette	x 100	= B' taille d'un module de la coque
C taille de l'aboutement	x 250	= C' taille de l'aboutement
D taille d'une fibre de l'aboutement	x 10 000	= D' taille d'une fibre de l'aboutement

³⁴ Il s'agit ici d'ordres de grandeur et non de tailles exactes. Ces ordres de grandeur restent valides dans la mesure où sont considérés leurs rapports et que ces rapports sont grands. L'exactitude est rendue compliquée par le fait que les tailles de ces éléments varient au sein du pavillon lui-même et au sein d'un dollar des sables, mais aussi entre différentes espèces d'oursins. Ainsi, les concepteurs observent les fibres de collagène en reprenant le travail de Telford (1985) portant sur des oursins n'appartenant pas à l'ordre des Clypeasteroidea et montrant que les fibres varient en fonction des espèces. Pour établir ces rapports de grandeur nous nous sommes basés sur un oursin ayant plutôt la taille du *Mellita quinquesperforata* (et non celle du *Echinocyamus pusillus* qui est beaucoup plus petit mais que les biologistes associés à l'ICD/ITKE ont étudiés.

Ces différences dans les transformations des tailles s'expliquent par les opérations d'échelle à l'œuvre. La taille de l'oursin est, par exemple, liée à une échelle de voisinage qui tient compte du sable qui forme son milieu de vie³⁵. Une échelle humaine, presque triviale, est à l'œuvre pour dimensionner le dôme du pavillon de manière habitable. C'est sur ce dôme que le modèle de la coque de l'oursin est appliqué ce qui induit une augmentation de la taille de l'oursin par 100 (il faut pouvoir entrer dans l'oursin). Cette échelle n'explique pas cependant les autres augmentations de tailles agissant sur les plus petits éléments que sont les aboutements et les fibres.

En particulier, on note que le rapport entre les fibres de collagène, qui, chez l'oursin sont situées entre les protrusions formant l'aboutement, se trouve inversé dans le pavillon de 2015 : les lacets se trouvent par-dessus les aboutements et les englobent. Cela est dû au fait de l'échelle technique qui détermine la fixation par laçage à partir des œilletons fixés par une membrane, opération surdéterminée par une autre échelle technique, celle de la couture de la membrane sur la feuille de lamellé-collé : éloigner la couture sur laquelle une tension sera exercée est pertinent pour éviter que la fibre du bois ne se déchire.

Pour revenir à la question des proportions de manière plus générale, il est possible de remarquer que la taille des aboutements est elle-même profondément modifiée pour tous les pavillons en lamellé-collé³⁶. Les proportions sont inversées : chez les oursins les protrusions sont fines et profondes³⁷, dans les pavillons les aboutements sont larges et courts.

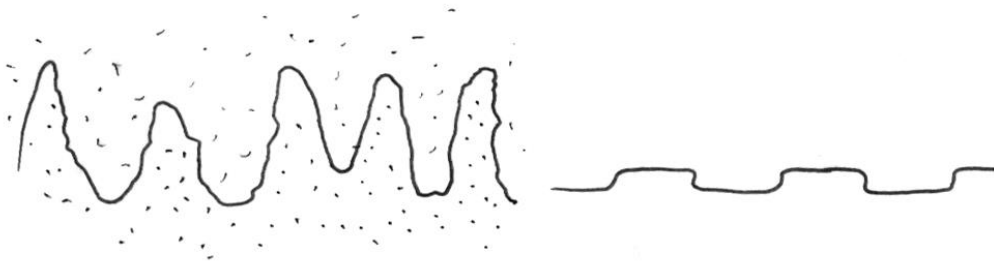


Figure 16 — à gauche : forme des aboutements chez l'oursin / à droite : forme des aboutements dans la plupart des pavillons (2011, LAGA, 2015-16, BUGA) (schéma L. Vitalis d'après Krieg et al., 2014)

À ce sujet, il est intéressant de remarquer que des aboutements avec des doigts beaucoup plus fins que larges (découpés à la scie) ont été conçus par Oliver David Krieg lors de son projet de fin d'études, rendu à l'été 2012³⁸. On peut considérer que ces aboutements qui font quelques millimètres d'épaisseur pour 1 à 2 centimètres de longueur sont en proportion beaucoup plus semblables à ceux du dollar des sables. Pourtant, cette évolution de la forme des aboutements n'est pas due à un retour vers l'oursin après l'expérience du pavillon de 2011, ni à une recherche de meilleure analogie. Elle résulte d'une volonté de créer des arêtes jointives entre plaques qui soient courbes et flexibles. La réduction de l'épaisseur des doigts de l'aboutement permet l'approximation d'une courbe (la courbe est d'autant plus courbe que les segments qui la représentent sont courts) et de l'élasticité à créer (Krieg &

³⁵ Le paléontologue Adolf Seilacher dit des épines du dollar des sables qu'elles sont « sand-size related » (Seilacher, 1979, p. 194-195).

³⁶ Dans le pavillon de 2015/16 les aboutements qui ne sont pas collés, mais laissés libres présente une forme encore différente, en triangle équilatéraux, soit un intermédiaire entre l'oursin et les autres pavillons.

³⁷ La profondeur varie d'ailleurs en fonction des oursins : chez l'espèce *Mellita lata* les protrusions forment des épines très profondes (d'une proportion d'environ 1/10). Les protrusions que montrent les concepteurs de l'ICD/ITKE sont généralement celles de la famille des *Rotulidae* si l'on s'en tient à l'article de Seilacher (1979) dont ils reprennent d'ailleurs les photos.

³⁸ Cf. <https://www.oliverdavidkrieg.com/?p=670> consulté le 22/12/2020.

Vitalis, 2020). Cela montre que c'est par rapport à une réalité concrète, et notamment celle du matériau, que la conception se déploie. Ainsi, l'abstraction géométrique qu'est la notion de proportion semble mal expliquer les développements significatifs de la conception architecturale ; si l'on tient toutefois à continuer d'utiliser la notion d'analogie, il faudrait alors préciser qu'il s'agit d'« analogies non proportionnelles ».

La question de la matérialité n'est donc pas exclue, en principe, des analogies biomimétiques. Mais il faut revenir sur la manière dont ses analogies sont établies au cours d'un processus de conception. Dans le cas des pavillons de l'ICD/ITKE, la matérialité n'est pas un terme de l'analogie établie au départ, ainsi, même si l'analogie se développe au fur et à mesure de la série, l'analogie de départ oriente ce développement : la double structuration qu'opère la reconnaissance de caractères techniques (assemblage bois) dans des caractères naturels (plaque des dollars des sables) va bloquer un degré de liberté concernant la matière. Il s'ensuit que les propriétés matérielles microscopiques de l'oursin constituées d'un stéréome formé par un réseau multidirectionnel de trabeculae (Grun & Nebelsick, 2018b) ne feront jamais partie du modèle à reprendre pour la conception des pavillons en bois dont les propriétés fibreuses sont directionnelles (anistropie)³⁹.

Le choix du bois, posé avant même la mise en œuvre de l'échelle de modèle naturel, est une décision qui peut sembler empêcher le développement d'une analogie plus complète. Pour retrouver la structure matérielle interne de l'oursin, il faudrait que les concepteurs s'autorisent à revenir sur une décision préalable d'utilisation du bois (la fabrication additive par impression 3d par exemple, aurait pu produire des résultats plus analogues à la biominéralisation calcaire de l'oursin). Cependant, cela serait nier le processus de conception en ne jugeant que d'après le résultat conçu, car, au cours de la conception, c'est justement le choix du bois qui permet d'établir l'analogie en reconnaissant des caractères communs entre les deux systèmes.

³⁹ La technique du lamellé collé permet certes d'atténuer l'anisotropie du bois en combinant des couches dans des directions différentes. Il n'en reste pas moins que la structure interne des plaques constituantes des pavillons est fortement directionnelle, même si les directions varient. D'une couche à l'autre du lamellé-collé il se produit un saut discret de direction qui n'existe pas dans le trabeculae.

VI. Pour un scénario d'usage d'une ontologie du biomimétisme

Cette étude s'inscrit dans le projet de recherche BiomimArchD dont l'objectif est de construire une ontologie informatique du biomimétisme à partir d'autres cas. Un tel outil pourrait avoir plusieurs usages dont celui d'assister la conception architecturale biomimétique. Cette partie est dédiée à dégager les enseignements des deux études sur la conception biomimétique (du stade olympique de Pékin et des pavillons bois de l'ICD/ITKE) pour les conditions d'utilisation d'une ontologie informatique comme outil d'aide à la conception.

À quel moment de conception s'adresse-t-on ?

Les trois moments de notre modèle du raisonnement de conception biomimétique impliquent trois situations dans lesquelles les besoins de concepteurs ne sont pas les mêmes.

— Les modèles naturels ne viennent pas de nulle part. L'échelle d'amorçage montre qu'un modèle naturel peut être convoqué pour une raison, par exemple, socioculturelle (ou autre, voir la liste des échelles). Cela affecte donc la pertinence des requêtes qu'un concepteur est susceptible de faire pour interroger l'ontologie. Un exemple de requête pertinente serait une question du type : "Je cherche un animal qui a une valeur culturelle en Italie" (quelle que soit la forme linguistique de cette requête). Cela signifie que les modèles naturels implémentés dans l'ontologie (animaux, micro-organismes, plantes...) doivent être informés par d'autres valeurs. Il faudra aussi pouvoir négliger des valeurs non pertinentes : d'un point de vue géométrique, le nid d'oiseau peut être équivalent au corail *Annella mollis*, mais aussi à un jeu de mikado, en raison de sa forme complexe d'imbrication (cf. stade de Pékin). Du point de vue de l'agencement structurel, l'oursin peut être équivalent à une tortue ou un crâne (cf. pavillon de Stuttgart). Ici, les valeurs symboliques (par exemple) du corail et du nid d'oiseau ne sont d'aucune utilité (ni leur valeur géographique qui peut pourtant être pertinente pour le développement durable). À ce stade initial de la conception, il importe de savoir à quel type de processus l'outil s'adresse. Pour assister le passage d'un processus biomimétique général, ou d'un processus non-biomimétique vers un processus biomimétique particulier (au sens de la Figure 14, p. 33), les enjeux ne seront pas les mêmes. Un outil capable d'assister le premier cas (non-biomimétique > biomimétique particulier) aurait le plus d'effet, il représente un gain le plus significatif. Dans ce cas, ce ne sont que des valeurs extérieures à tout modèle naturel qui comptent : une requête à ce stade ne peut décider entre un animal ou une plante ce qui peut être pertinent.

— À l'étape du modèle lui-même, nous avons montré qu'il pourrait être utile de pouvoir montrer le modèle naturel par des informations visuelles (et pas seulement par des mots). Nous avons vu que l'espace graphique de représentation joue un rôle qui permet de substituer un modèle à un autre au cours du processus de conception. Cela pourrait être un défi pour l'ontologie en raison de la multiplicité des formes graphiques. Plusieurs pistes peuvent être envisagées. En effet, il serait possible d'utiliser les schèmes développés par Dominique Raynaud (1998). Par une analyse parasynonymique, 8000 verbes d'action français sont réduits à une soixantaine de schèmes (Raynaud, 2003, p. 125-126) rendant ainsi la diversité des formes à un ensemble de termes manipulables. Une autre piste serait de ne pas passer par une médiation textuelle de l'image, mais de travailler à une interface directement graphique. C'est sans doute un travail d'envergure, mais des travaux ont déjà été menés au laboratoire MAACC, d'abord sur les types de traces graphiques, appelés « dromies » (Boudon & Pousin, 1988), ensuite sur leur interprétation par des systèmes multi-

agents⁴⁰ et, plus généralement de l'interprétation de perspectives tridimensionnelles⁴¹. Ce besoin de réduire la diversité des formes à une série de caractères pertinents souligne le fait que, parmi la diversité des formes observables dans la nature, certains caractères ne sont d'aucune importance pour les concepteurs. On peut donc imaginer que les informations soient découpées en parties afin que le concepteur, utilisateur de l'ontologie, puisse avoir accès qu'à certaines parties, et non à l'ensemble, ou alors sous forme d'une mise en ordre des parties par degré de pertinence.

— La dernière étape de l'intégration et du développement du modèle naturel dans la conception fait intervenir des échelles qui ajoutent des informations qui ne sont pas biologiques. Il est difficile de prédire quelles échelles seront à mettre en place par les concepteurs sans se suppléer à eux, ce qui n'est pas le but d'un outil d'assistance à la conception. Fournir des informations structurelles liées à la matière des organismes naturels peut être une ressource minimale utile puisque l'échelle technique semble être une constante dans les échelles consécutives. Il est important de garder les choses ouvertes pour le concepteur et d'être clair sur le fait que le modèle naturel n'est pas suffisant.

Dans la suite, nous nous focaliserons sur la première étape. En tant que point d'entrée au cours duquel l'idée d'un modèle naturel apparaît, c'est une étape indispensable pour qu'il y ait une conception biomimétique. Les autres étapes sont conditionnées à ce point d'entrée. Par ailleurs, elles demanderaient d'engager un travail particulièrement ambitieux dépassant le cadre du projet BiomimArchD.

L'empirisme pour accompagner la conception biomimétique ?

Une ontologie informatique décrit un domaine de connaissances. Appliquer cela au biomimétisme pose un problème particulier, car le biomimétisme, tel qu'il est décrit par le mouvement contemporain qui, à la suite de Janine Benyus, utilise ce nom, n'est pas quelque chose de connu, d'acqui. C'est un courant se disant en rupture avec les manières habituelles de concevoir, il se veut une innovation en cours, il se conjugue au futur. Dans ce cas, l'étendue des architectures biomimétiques n'est pas limitée par les cas existants et on ne connaît pas *a priori* les possibles. Cela est valable de manière générale pour la conception, mais c'est lorsque la doctrine du biomimétisme prétend que l'on ne saurait pas même saisir ce qui fait la spécificité du fonctionnement de la conception biomimétique qu'elle prend un engagement particulier.

Pour y remédier, le projet BiomimArchD procède à l'étude de cas de conception biomimétique bien réels, pour ne pas sombrer dans la spéculation⁴². Le cas des pavillons bois de Stuttgart et du stade olympique de Pékin étudiés sous l'angle de la conception dans ce rapport et le précédent en sont tirés. C'est lorsque le prototype d'ontologie est réalisé, à partir de cas d'étude, que la question de l'empirisme doit néanmoins être posée. En tant qu'outil, l'ontologie n'a pas pour but de reproduire une connaissance déjà acquise, elle doit pouvoir assister la conception d'espace qui n'existe pas encore. Et si les cas d'étude choisis peuvent être considérés comme limités, au regard d'un hypothétique biomimétisme plus riche, il faut bien laisser l'usage de l'ontologie ouvert. Cet aspect des choses est

⁴⁰ Cf. <https://www.maacc.archi.fr/maacc/spip.php?article120> consulté le 29/12/2020.

⁴¹ Cf. <https://www.maacc.archi.fr/maacc/spip.php?article119> consulté le 29/12/2020.

⁴² Bien sûr il est toujours possible de considérer que les cas étudiés ne sont pas vraiment biomimétiques, mais pour pouvoir asserter cela il faut bien savoir ce qu'on appelle biomimétique ; c'est ici que la rhétorique futuriste du biomimétisme atteint ses limites. En ce qui concerne les cas des pavillons bois de Stuttgart et du stade olympique de Pékin, le fait qu'une échelle de modèle naturel ait été opérante, bien que circonscrite, atteste d'un certain biomimétisme.

particulièrement important si l'on souhaite voir se développer un biomimétisme authentiquement architectural. En effet, d'après les cas disponibles, le biomimétisme architectural semble aujourd'hui se réduire à un biomimétisme d'ingénierie appliqué à l'architecture. Il en résulte des composants qui sont applicables à différentes architectures sans leur être spécifiques (Chayaamor-Heil & Vitalis, 2020).

L'outil construit à partir de l'ontologie pourrait alors remplir deux fonctions tout à fait différentes : soit il s'en tient aux cas existants et à leur connaissance, soit il se propose d'accompagner les processus de conception de manière ouverte. Une ontologie basée sur des cas existants n'est pas dénuée d'intérêt. Elle peut être utile pour un cours d'histoire du biomimétisme par exemple. Mais la connaissance de l'histoire de ce qui existe déjà est une chose différente de l'outil d'aide à la conception. L'histoire peut avoir quelque utilité pour la conception, de la même manière que des cours d'histoire de l'architecture de la renaissance dispensés en école d'architecture peuvent apporter quelques références dont les architectes peuvent s'emparer occasionnellement au cours d'un projet sans lien avec le cours d'histoire. Les liens sont établis par les concepteurs de manière libre et déconnectée de la situation de conception particulière dans laquelle la référence historique est mobilisée. Ainsi, il n'est pas possible de décider, sans situation de conception particulière, si un cours d'histoire de l'architecture de la renaissance est plus utile qu'un cours d'histoire de l'architecture du moyen-âge.

Ainsi, si l'outil basé sur l'ontologie s'en tient aux cas existants, cela n'empêchera aucunement l'architecte qui l'utilise de s'émanciper de ces cas et de déployer sa conception dans une direction qui n'est pas connue dans la base de connaissances. Dans ce cas, il faut comprendre que l'ontologie n'accompagne en rien le concepteur, puisque le processus dépend de sa liberté et de sa capacité à se dégager des connaissances fournies par l'ontologie.

Comment évaluer la pertinence d'un outil d'aide à la conception biomimétique ?

Une question se pose donc : celle de savoir comment accompagner un processus de conception de manière pertinente, c'est à dire ouverte (sans nier la liberté des concepteurs), mais utile (sans laisser les concepteurs livrés à leur seule liberté). Pour cela, nous proposons un étalon de référence à partir duquel mesurer la pertinence d'un outil d'aide à la conception. Cet étalon est une situation de conception que l'on peut construire par une fiction théorique :

Cas limite 1 : un concepteur ouvre au hasard une encyclopédie de biologie pour trouver un modèle naturel duquel s'inspirer. Il tombe, par exemple, sur une fleur et accède à des connaissances à son sujet. Du point de vue de la conception, c'est un cas plausible : on sait que certains concepteurs se donnent a priori des contraintes ou des règles à suivre et qu'ils tirent de ces contraintes (quand bien même elles semblent absurdes) une certaine créativité. Mais c'est aussi une « méthode » qui fonctionne, car le concepteur trouvera toujours quelques principes, idées ou images dont il pourra, plus ou moins indirectement, faire usage dans sa conception⁴³.

Elle constitue un premier cas limite, le cas où l'outil d'aide à la conception n'est d'aucune aide particulière par rapport à une situation de conception donnée (l'outil est indifférent à la situation). Un outil d'aide à la conception biomimétique devient pertinent dès lors qu'il est

⁴³ Des recherches ont montrés que des schémas inductifs ont une efficacité réelle dans la conception. Michel Conan les nomment « générateurs primaires » (Conan & Daniel-Lacombe, 1993).

plus efficace que ce cas limite, dès lors qu'il tient compte, un tant soit peu, de la situation de conception particulière de l'architecte (« un tant soit peu » devant être supérieur au hasard). Un autre cas inverse peut alors être envisagé :

Cas limite 2 : un concepteur se voit présenter un doublet constitué d'un modèle naturel et d'un exemple d'application architectural de ce modèle. Prenant pour point de départ ce doublet, il peut reproduire l'application et l'insérer dans son projet. Il sait que cette application fonctionne (ou en tout cas dans quelle mesure) et comment la construire.

Cette situation présente un cas limite ou l'outil dit trop, voire tout du biomimétisme et réalise la conception presque à la place du concepteur⁴⁴. Le propos est donc de trouver une voie qui échappe à ces deux cas limites, un processus dans lequel l'ontologie puisse jouer un rôle ouvert, mais jouer un rôle tout de même.

Quelle requête un concepteur peut-il faire pour interroger l'ontologie ?

Que se passe-t-il lorsque l'on envisage d'utiliser l'ontologie construite à partir des cas de BiomimArchD pour assister la conception architecturale de la phase d'amorçage à celle de l'échelle de modèle naturel ?

À ce niveau, il faut comprendre la motivation d'un architecte à recourir à un modèle naturel. Un concepteur cherche à traiter certaines questions particulières, ce sont elles qui le conduisent à utiliser un modèle naturel. La proposition serait alors d'intégrer les motivations dans l'ontologie pour que les requêtes de l'architecte puissent les prendre en compte. La valeur socioculturelle d'un modèle est une des motivations possibles (non nécessaires), c'est une classe de problème que l'architecte cherche à résoudre, les caractéristiques géométriques en sont une autre. Théoriquement, on peut lister 20 classes de problème (cf. les classes de références architecturologiques). À partir de là, on pourrait envisager une requête en deux items, de la forme :

Type de modèle naturel + type de problème architectural

Un exemple serait :

Animal⁴⁵ + Socioculturel + Italie

La valeur socioculturelle d'un modèle naturel dépend des cultures, elle est donc variable, c'est pourquoi il faut intégrer un troisième item de localisation (peu importe comment on le catégorise, que ce soit par pays, par grandes aires géographiques ou autres). Cela demanderait de renseigner pour chaque modèle naturel sa valeur socioculturelle pour différentes cultures. Faire ce travail a priori ne semble pas pertinent car cela reviendrait à anticiper l'ensemble des cas de conception possibles avant même que la conception ait lieu. Parmi l'inventaire des cas possibles, la très grande majorité serait donc inutile. Une piste pour la faisabilité du projet serait d'utiliser des systèmes d'extraction automatique de connaissances. L'idée est, en tout cas, de ne pas entrer l'information manuellement et, si possible, de faire l'extraction au moment où la requête est formulée et non un inventaire exhaustif a priori, ce qui tend à l'impossible.

⁴⁴ Pour la précision, il ne la réalise pas, il fournit simplement le résultat d'une conception déjà réalisée par un autre concepteur.

⁴⁵ Il semble en fait peu probable qu'il soit pertinent de distinguer entre un animal et un végétal à ce stade de la conception, car on ne voit pas comment un architecte pourrait avoir une préférence, si ce n'est par rapport à un type de problème architectural qui se pose à lui.

Quelles données pour quel accompagnement de la conception ?

Étant donné les cas d'étude du projet BiomimArchD, il est possible d'envisager deux types de réponses, deux types de données fournies pour une telle requête. L'ontologie peut donner accès à un item, au minimum, ou une liste de modèles naturels (MN) pertinents. Elle peut aussi donner accès à un couple de deux items reliés : soit un *modèle naturel* (MN) et un *exemple d'application architecturale* (EAA), reliés par le fait que l'application dérive de ce modèle particulier, soit « MN — EAA ». Que les deux options soient possibles ne signifie pas qu'elles soient pertinentes et le plus n'est pas toujours le mieux en matière de conception. Elle engage, en tout cas, deux manières d'envisager et d'accompagner la conception biomimétique.

Commençons par la deuxième option. La question clé est de comprendre quel peut-être l'intérêt pour un architecte en train de concevoir un projet d'accéder (via l'ontologie) à un exemple d'application déjà conçue ? S'il est plus pertinent de donner « MN—EAA » que seulement « MN » c'est que la présence de l'exemple EAA doit avoir un rôle pour assister l'architecte dans son processus de conception. Ce que l'on peut imaginer comme rôle pour la conception architecturale est comparable au rôle que peut jouer un catalogue de fenêtres dans lequel un architecte choisit une fenêtre déjà conçue. C'est un rôle très limité, mais pas inexistant. En particulier, il faut bien comprendre que le choix dans un ensemble fini est une question de décision et que la conception s'en distingue⁴⁶. Le concepteur peut éventuellement transformer l'exemple d'application architecturale biomimétique en l'adaptant à son projet, mais la base principale est une reproduction. C'est une échelle de modèle qui prend pour modèle un autre projet d'architecture et non un organisme naturel. De plus, le modèle naturel n'est pas reconstruit. Par exemple, dans le cas du *Singapour theatre* de Michael Wilford, l'architecte s'inspire de la peau du durion. Un architecte qui utiliserait l'ontologie pourra alors approfondir la connaissance de la peau du durion et découvrir de nouvelles propriétés, mais il n'est pas envisageable qu'il base son application sur le noyau du durion. Bien sûr, il est possible qu'un architecte utilisant l'ontologie se mette à s'inspirer du noyau du durion, mais dans ce cas, il le fait en vertu de sa propre créativité. Il n'est pas aidé par l'ontologie en cela. Si la réponse à ses requêtes est de la forme « MN—EAA », c'est que la présence des deux éléments doit avoir une pertinence. Sinon l'ontologie n'est pas plus utile que l'étalon défini par le cas limite 1.

On peut imaginer que, par ce procédé limité décrit comme la reproduction d'un EAA adapté à une situation différente, les architectes conçoivent et construisent de nouvelles applications architecturales biomimétiques du modèle naturel. Cela peut être schématisé ainsi :

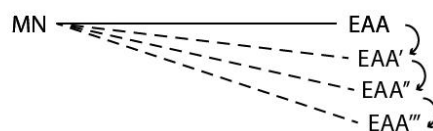


Figure 17 — utilisation de l'ontologie en conception à partir d'exemples d'application architecturale (schéma L. Vitalis)

On peut imaginer que les nouveaux EAA conçus viennent rétroactivement enrichir la base de données de l'ontologie qui peut ainsi être étendue au fur et à mesure. Dans ce cas, n'est-ce pas l'ontologie qui court après la conception pour rester à jour, et non la conception qui est assistée par l'ontologie ?

⁴⁶ Tout le travail de la théorie de la conception C-K, par exemple, a été de montrer qu'il fallait pouvoir étendre l'ensemble des choix possibles pour parler de conception (Hatchuel, 2002).

Il semble cependant que la conception biomimétique, au sens fort, réside avant tout dans l'exploration d'un modèle naturel pour en produire une transposition dans une nouvelle application architecturale. Reproduire un exemple d'application architecturale déjà conçue ressemble à un « architecturo-mimétisme » beaucoup plus qu'à un biomimétisme. Assister la conception architecturale biomimétique devrait permettre à un architecte de s'inspirer du noyau du durion alors que celui-ci n'a pas déjà fait l'objet d'une application architecturale. On aurait alors la production d'EAA très différenciés. Schématiquement :

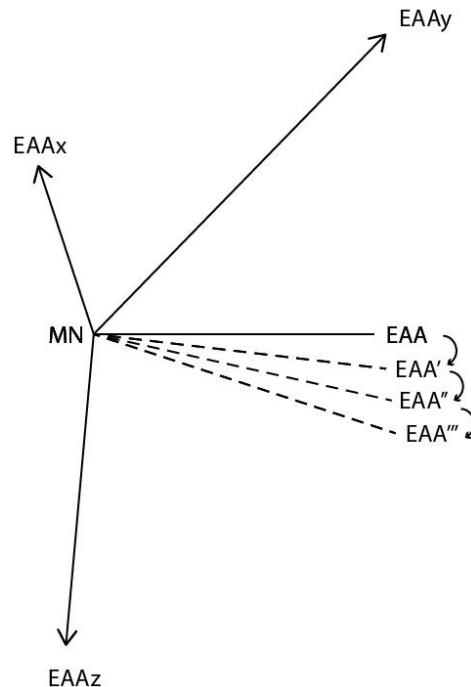


Figure 18 — utilisations comparées de l'ontologie en conception à partir de modèles naturels et à partir d'exemple d'application architecturale (schéma L. Vitalis)

Or, pour que l'ontologie joue un rôle qui échappe aux deux cas limites définis dans le référentiel ci-dessus, il faut imaginer que la réponse à ses requêtes soit de la forme « MN + X ». Où X est une information pertinente pour le processus de conception particulier mené par un architecte utilisant l'ontologie. (Intégrer dans l'arborescence, puis dans l'ontologie, les classes de problèmes cités plus haut, comme celle de la valeur socioculturelle d'un modèle naturel, serait une première tentative pour renseigner cet X).

Indirectement, ce sont deux visions de la base de connaissances implémentée par l'ontologie. Elles reposent sur l'opposition entre le conçu et la conception. En donnant à l'architecte le couple « MN—EAA » on construit une base de connaissances d'architectures biomimétiques déjà conçues. Il serait différent de construire une base de connaissances de la conception architecturale biomimétique. Pour traiter de la conception, il faudrait se concentrer sur le lien entre MN et EAA. Ce lien est en vérité une flèche que l'on peut chercher à connaître indépendamment des objets conçus. Pour cela, il ne suffit pas de s'intéresser au résultat, mais il faut intégrer les paramètres des processus de conception indépendamment de leur résultat. Il faudrait pouvoir accompagner des concepteurs dans des situations différentes de celles des cas étudiés. Ces situations ne sont certes pas connues d'avance, mais elles peuvent être simulées à l'aide du modèle de la conception biomimétique et des concepts architecturologiques, en faisant varier les paramètres.

Dans le cas où le processus de conception que l'ontologie vise à assister est un processus de reproduction d'EAA adapté par la suite, on explore un espace de conception *étroit*. Dans

le cas où le processus que l'on vise à assister est un processus qui repart d'un modèle naturel (pertinent pour la conception) en le transposant pour concevoir une nouvelle application, on explore un espace de conception plus *ouvert*. Ces deux espaces peuvent être schématiquement comparés comme suit :

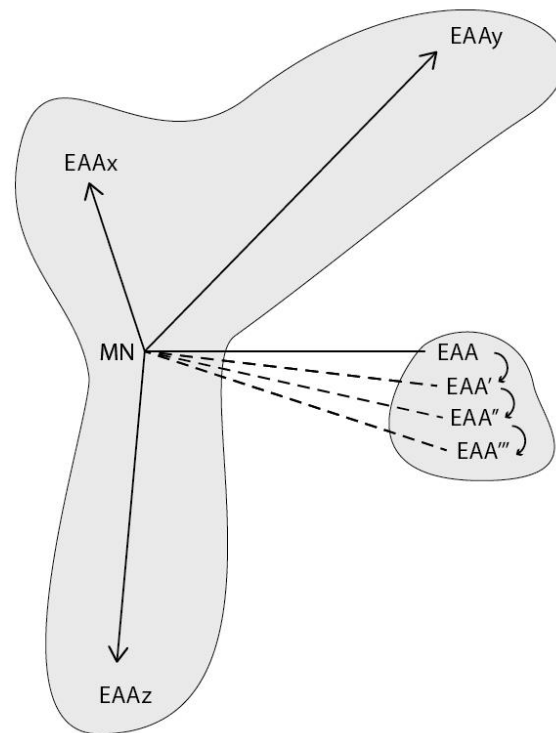


Figure 19 — espaces de conception comparés entre les deux utilisations de l'ontologie en conception (schéma L. Vitalis)

Les deux types de scénarios d'accompagnement peuvent être envisagés. Il s'agit simplement d'avoir les idées claires sur le scénario, de manière à construire l'ontologie et l'outil d'exploitation de l'ontologie en fonction. Avant même de pouvoir lister les dites « *competency questions* » (CQs) pour établir les « compétences » de l'ontologie et ainsi définir les besoins du système par rapport à des utilisateurs, il faut bien décider de quels types d'utilisateurs il s'agit (des architectes professionnels, des étudiants en ingénierie, des enseignants...), et à quel type d'usage l'outil est censé servir (faire un cours d'histoire de l'architecture biomimétique, disposer d'un catalogue d'exemple de réalisation, accompagner la conception de nouvelles transpositions architecturales de modèle naturel...). Selon les utilisateurs et les situations d'utilisation, les CQs seront différentes.

Relations non linguistiques entre architecture et nature ?

Une dernière question semble devoir être posée, en raison de la modalité linguistique par laquelle l'ontologie décrit un domaine de connaissances. C'est en passant par des termes et leurs mises en relation qu'est explicité un domaine de connaissances. Or, la conception architecturale est un savoir-faire plus qu'une connaissance théorique. À ce titre elle est en grande partie tacite et repose sur des connaissances non verbalisées⁴⁷. Et surtout, les objets

⁴⁷ C'est le rôle de sciences de la conception d'explicitier ces savoir-faire dans un langage théorique formalisé, comme le langage de l'architecturologie par exemple.

manipulés au cours de la conception peuvent être des mots, mais ce sont surtout des espaces manipulés par le biais de représentations (dessins, images, maquettes...).

Ainsi, une partie des relations établies entre le domaine naturel et le domaine architectural passe clairement par la langue. Elles sont établies par des termes qui valent dans les deux domaines, ou dont la valeur pour un domaine peut être intuitivement établie dans l'autre domaine. Ces prédicats bivalents, qui s'appliquent à l'architecture et à des organismes naturels et valent pour les deux domaines, ne posent pas problème. Il s'agit par exemple de « thermorégulation », de « résistance structurelle », etc. Cependant, ils ne représentent qu'une modalité de relier deux domaines, c'est pourquoi s'en tenir seulement à ces prédicats bivalents constitue une limitation.

D'une part, ces termes appartiennent souvent à des variables physiques mesurables. Se limiter à ces termes tend ainsi à réduire les problèmes biomimétiques à des questions techniques. Ceci expliquerait d'ailleurs le primat de l'ingénierie dans le biomimétisme. C'est donc un réel enjeu que de réussir à intégrer des questions architecturales non-techniques.

Ainsi, certains concepts valent pour l'architecture mais n'ont pas cours dans le corpus de la biologie. Il s'agit par exemple de la qualité socioculturelle du durion que l'architecte Michael Wilford mobilise pour le *Singapour theatre*, puis de l'échelle optique prenant le relai dans ce même projet et permettant de sélectionner dans le durion une morphologie particulière⁴⁸ : l'orientation des piquants en écaille crée une orientation qui est ensuite traduite via une différenciation de matière (opaque/transparente) en un point de vue directionnel au travers de l'édifice dans un sens déterminé.

Pour envisager une utilisation de l'ontologie pour un processus de conception ouvert, il faut imaginer une situation où un concepteur se poserait des questions optiques. Un tel concepteur, en consultant l'ontologie, pourrait certes avoir accès au modèle du durion, déjà connu par les cas d'étude, mais il serait pertinent également que l'ontologie lui suggère une « pomme de pin » ou un « serpent » : ces modèles présentant une morphologie « en écaille » peuvent servir de modèle intéressant pour générer un point de vue directionnel. À un concepteur qui chercherait à inscrire son projet dans la culture locale de Singapour, il serait pertinent de proposer, en plus de durion, le lion qui est un symbole de la ville ou encore l'« orchidée Papilionanthe Miss Joaquim » qui est un emblème national. Or, ces relations ne sont pas d'ordre linguistique : la relation socioculturelle ne l'est pas parce qu'elle n'est pas un concept propre aux sciences biologiques (il suppose une compréhension de la perception humaine de la nature), et l'optique à plus forte raison, car l'expression « en écaille » est peut-être familière appliquée serpent, mais pas pour la pomme de pin. Ainsi, la dimension linguistique comme modalité relationnelle entre le domaine biologique et architectural représente un potentiel biais limitatif pour un outil d'aide à la conception.

Ces questions de culture ou de visibilité ne font pas parties du corpus de la biologie, mais sont pourtant des domaines de pertinences fondamentaux pour l'architecture. Il faut ici bien distinguer deux plans, d'un côté les organismes vivants et, de l'autre côté, la biologie en tant qu'étude scientifique de ces organismes. Mais la biologie n'est pas la seule étude scientifique des organismes vivants. L'ethnologie ou l'anthropologie culturelle sont, par exemple, susceptibles de nous renseigner utilement sur les valeurs culturelles de différents êtres vivants, dans différentes cultures. Ainsi si une des pistes de continuation du travail de BiomimArchD est celle d'un alignement d'ontologies existantes, il faudrait se demander s'il existe des ontologies non-biologiques du vivant avec lesquelles s'aligner.

⁴⁸ Rappelons qu'il n'y a pas un modèle en soi du durion. Le modèle est constitué par les concepteurs et plusieurs modèles d'un même objet naturel peuvent être constitués.

Bibliographie

- Alvarez, M., Wagner, H. J., Groenewolt, A., Krieg, O. D., Kyjanek, O., Sonntag, D., Bechert, S., Aldinger, L., Menges, A., & Knippers, J. (2019). The BUGA Wood Pavilion – integrative Interdisciplinary Advancements of Digital Timber Architecture. In *Ubiquity & Autonomy—ACADIA 2019* (p. 490-499). Association for Computer Aided Design in Architecture.
- Bechert, S., Groenewolt, A., Krieg, O. D., Menges, A., & Knippers, J. (2018). Structural Performance of Construction Systems for Segmented Timber Shell Structures. In *Créativité in structural design Proceedings of the IASS symposium* (International Association for Shell and Spatial Structures).
- Boudon, P. (1992). *Introduction à l'architecturologie*. Dunod.
- Boudon, P., Deshayes, P., Pousin, F., & Schatz, F. (2000). *Enseigner la conception architecturale. Cours d'architecturologie*. Editions de La Villette. (Original work published 1994)
- Boudon, P., & Pousin, F. (1988). *Figures de la conception architecturale : Manuel de figuration graphique*. Dunod.
- Chayaamor-Heil, N., & Vitalis, L. (2020). Biology and architecture : An ongoing hybridization of scientific knowledge and design practice by six architectural offices in France. *Frontiers of Architectural Research*. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.10.002>
- Conan, M., & Daniel-Lacombe, E. (1993). Le démarrage du projet : Les générateurs primaires. In *Enseigner le projet d'architecture—Actes du séminaire de Bordeaux* (p. 201-211). Direction de l'architecture et de l'urbanisme.
- de Boissieu, A. (2013). *Modélisation paramétrique en conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie* [Thèse]. ENSA - La Villette / Université Paris Est, sous la direction de François Guena et Caroline Lecourtois.
- Descola, P., & Kempf, H. (2020, février 1). Philippe Descola : « La nature, ça n'existe pas »—Entretien. *Reporterre, le quotidien de l'écologie*. <https://reporterre.net/Philippe-Descola-La-nature-ca-n-existe-pas>
- Deshayes, P. (2000). Notes autour de sept figures de pensée & d'action de l'ingénieur et de l'architecte. In *Compétence et langages de la conception chez les professionnels du projet III* (p. 30-112). Laboratoire d'Architecturologie et de recherches épistémologiques sur l'architecture - EAPLV - UMR LOUEST, CNRS 7544.

- Goodman, N. (2020). Sept restrictions regardant la ressemblance (A. Anne-Braun & A. Declos, Trad.). *Philosophia Scientiæ. Travaux d'histoire et de philosophie des sciences*, 24-2, 17-27. <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.2284> (Original work published 1972)
- Grun, T. B. (2018). *Structural mechanics of echinoid skeletons as candidate systems for biomimetic research* [Dissertation, Universität Tübingen]. <https://doi.org/10.15496/publikation-24839>
- Grun, T. B., Koochi Fayegh Dehkordi, L., Schwinn, T., Sonntag, D., von Scheven, M., Bischoff, M., Knippers, J., Menges, A., & Nebelsick, J. H. (2016). The Skeleton of the Sand Dollar as a Biological Role Model for Segmented Shells in Building Construction : A Research Review. In J. Knippers, K. G. Nickel, & T. Speck (Éds.), *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction : Biological Design and Integrative Structures* (p. 217-242). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46374-2_11
- Grun, T. B., & Nebelsick, J. H. (2018a). Structural design of the minute clypeasteroid echinoid *Echinocyamus pusillus*. *Royal Society Open Science*, 5(5), 171323. <https://doi.org/10.1098/rsos.171323>
- Grun, T. B., & Nebelsick, J. H. (2018b). Structural design of the echinoid's trabecular system. *PLOS ONE*, 13(9), e0204432. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204432>
- Grun, T. B., von Scheven, M., Bischoff, M., & Nebelsick, J. H. (2018). Structural stress response of segmented natural shells: A numerical case study on the clypeasteroid echinoid *Echinocyamus pusillus*. *Journal of The Royal Society Interface*, 15(143), 20180164. <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0164>
- Grun, T. B., von Scheven, M., Geiger, F., Schwinn, T., Sonntag, D., Bischoff, M., Knippers, J., Menges, A., & Nebelsick, J. H. (2019). Building principles and structural design of sea urchins : Examples of bio-inspired constructions. In J. Knippers, U. Schmid, & T. Speck, *Biomimetics for Architecture* (p. 104-115). Birkhäuser.
- Hatchuel, A. (2002). Towards Design Theory and Expandable Rationality : The Unfinished Program of Herbert Simon. *Journal of Management and Governance*, 5(3-4), 260-273.
- Helms, M., Vattam, S. S., & Goel, A. K. (2009). Biologically inspired design : Process and products. *Design Studies*, 30(5), 606-622. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.04.003>
- Hesse, M. B. (1966). *Models and Analogies in Science*. University of Notre Dame Press.

- Krieg, O. D., Karola, D., Reichert, S., Schwinn, T., & Menges, A. (2011). Performative Architectural Morphology. Robotically manufactured biomimetic finger-joined plate structures. In *Respecting fragile places: 29th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe* (p. 573-580). eCAADe.
- Krieg, O. D., Schwinn, T., Menges, A., Li, J.-M., Knippers, J., Schmitt, A., & Schwieger, V. (2014). Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells : Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design. In P. Block, J. Knippers, N. J. Mitra, & W. Wang (Éds.), *Advances in Architectural Geometry*. Springer.
- Krieg, O. D., & Vitalis, L. (2020). *Questions à Oliver David Krieg*. inédit.
- La Magna, Ricardo, Waimer, F., & Knippers, J. (2012). Nature-inspired generation scheme for shell structures. In *IASS-APCS 2012 : From Spatial Structures to Space Structures*. Conference: International Association for Shell and Spatial Structures.
- La Magna, Riccardo, Gabler, M., Reichert, S., Schwinn, T., Waimer, F., Menges, A., & Knippers, J. (2013). From Nature to Fabrication : Biomimetic Design Principles for the Production of Complex Spatial Structures: *International Journal of Space Structures*. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/0266-3511.28.1.27>
- Le Moigne, J.-L. (2006). *Théorie du système général. Théorie de la modélisation*. mctxapc. www.mctxapc.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.
- Lecourtois, C. (2014). Conception des formes urbaines : Écoconception, vers une échelle écologique. In P. Pinon, *Formes et Échehelles des compositions urbaines*. Comité des travaux historiques et scientifiques.
- Menges, A. (2015). The New Cyber-Physical Making in Architecture. *Architectural Design*, 85(5), 28-33.
- Menges, A., Schwinn, T., & David Krieg, O. (s. d.). Landesgartenschau Exhibition Hall. In S. Pfeiffer (Éd.), *Interlocking Digital and Material Cultures* (Spurbuch Verlag).
- Nachtigall, W. (2003). *Bau-Bionik : Natur—Analogien—Technik*. Springer-Verlag.

- Philippi, U., & Nachtigall, W. (1996). Functional morphology of regular echinoid tests (Echinodermata, Echinoida): A finite element study. *Zoomorphology*, 116(1), 35-50. <https://doi.org/10.1007/BF02526927>
- Pohl, G., & Nachtigall, W. (2015). *Biomimetics for architecture & design: Nature, analogies, technology*. Springer.
- Raynaud, D. (1998). *Architectures comparées. Essai sur la dynamique des formes*. Parenthèses.
- Raynaud, D. (2003). Le schème, d'un point de vue nominaliste et pragmatiste. In P. Boudon, *Langages singuliers et partagés de l'architecture, Actes du Colloque CNRS UMR 7544* (p. 109-133). L'Harmattan. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00006164/document>
- Schwinn, T., Krieg, O. D., & Menges, A. (2016). Robotic Sewing: A Textile Approach Towards the Computational Design and Fabrication of Lightweight Timber Shells. In *Posthuman Frontiers: Data, Designers, and Cognitive Machines, Proceedings of the 36th Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (p. 224-233). ACADIA.
- Schwinn, T., Krieg, O. D., Menges, A., Boyan, M., & Steffen, R. (2012). Machinic Morphospaces: Biomimetic Design Strategies for the Computational Exploration of Robot Constraint Spaces for Wood Fabrication. In *Synthetic Digital Ecologies, Proceedings of the 32nd Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (p. 157-168). ACADIA.
- Schwinn, T., & Menges, A. (2015). Fabrication Agency. *Architectural Design*, 85(5), 92-99.
- Schwinn, T., Sonntag, D., Grun, T. B., Nebelsick, J. H., Knippers, J., & Menges, A. (2019). Potential applications of segmented shells in architecture. In J. Knippers, U. Schmid, & T. Speck, *Biomimetics for Architecture* (p. 116-125). Birkhäuser.
- Schwinn, T., Vitalis, L., & Chayaamor-Heil, N. (2020). *Entretien avec Tobias Schwinn*. inédit.
- Seilacher, A. (1979). Constructional Morphology of Sand Dollars. *Paleobiology*, 5(3), 191-221. JSTOR.
- Speck, T., Knippers, J., & Speck, O. (2015). Self-X Materials and Structures in Nature and Technology. *Architectural Design*, 85(5), 34-39.
- Sperber, D. (1975). Pourquoi les animaux parfaits, les hybrides et les monstres sont-ils bons à penser symboliquement? *Homme*, 15(2), 5-34. <https://doi.org/10.3406/hom.1975.367550>
- Telford, M. (1985). Domes, arches and urchins: The skeletal architecture of echinoids (Echinodermata). *Zoomorphology*, 105(2), 114-124. <https://doi.org/10.1007/BF00312146>
- Vitalis, L. (2018). Une équation pour les utilisateurs du Parc de la Villette de l'OMA. *DNArchi*, en ligne.

- Vitalis, L. (2020). *De la conception architecturale biomimétique : Essai de modélisation à partir du cas du National Beijing Stadium « Bird's nest » de Herzog & de Meuron* [Research Report]. UMR 3495 MAP CNRS/MC. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02492364>
- Vitalis, L., & Chayaamor-Heil, N. (à paraître). *Forcing biological sciences into architectural design : On conceptual confusions induced by architectural biomimicry.*
- Wester, T. (1987). The Plate-Lattice Dualism. In *Proceedings of the ICSB-IASS Colloquium, Beijing* (p. 321-328). Elsevier.
- Wester, T. (2016). Nature Teaching Structures: *International Journal of Space Structures*. <https://doi.org/10.1260/026635102320321789>