



HAL
open science

Biologie et architecture : des connaissances scientifiques à la rencontre de la conception

Louis Vitalis, Natasha Chayaamor-Heil

► To cite this version:

Louis Vitalis, Natasha Chayaamor-Heil. Biologie et architecture : des connaissances scientifiques à la rencontre de la conception. journée d'étude " Co-concevoir en architecture. Formes de collaboration et hybridations de savoirs ", Laboratoire de l'École nationale supérieure d'architecture de Versailles, Oct 2020, Versailles, France. pp.27-33. hal-04350125

HAL Id: hal-04350125

<https://hal.science/hal-04350125>

Submitted on 20 Dec 2023

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.

Biologie et architecture : des connaissances scientifiques à la rencontre de la conception¹

Louis Vitalis - Natasha Chayaamor-Heil

L'architecture et sa relation aux sciences²

L'architecture est une pratique culturelle complexe et négociée, qui articule de multiples domaines telles l'esthétique, la technique, l'économie ou la sociologie. En cela, l'architecture est partie prenante de la culture, qui fournit de multiples espaces de références à la conception architecturale. D'un certain point de vue, les sciences qui sont aussi parties d'une histoire culturelle sont susceptibles de jouer le rôle de sources d'inspiration. Elles peuvent parfois être la source d'œuvres originales voire d'innovations. Dans ce texte, on s'intéressera en particulier à la biologie qui émerge sur la scène de la culture architecturale contemporaine. D'un autre côté, il faut pourtant reconnaître que la pratique de la conception diffère de la pratique scientifique ; la conception architecturale est créative et singulière, elle n'entretient pas le même rapport à la certitude, à la méthode, ou à la démonstration. La relation entre science et architecture semble donc, de ce point de vue, prise dans une sorte d'opposition.

Cette difficulté peut être interrogée au regard d'un travail précédent qui s'attachait à répondre à la question : que peut-on faire avec des théories scientifiques en architecture ? La réponse à laquelle conduisait la démonstration consistait à dire que les théories scientifiques étaient de peu d'utilité pour la conception à moins de transiger sur le caractère théorique et de les altérer en les transformant par exemple en modèles. En décidant d'utiliser une théorie, il semble que l'architecte ajoute quelque chose qui n'est pas dans la théorie au départ. Ces décisions convertissent les théories en des modèles et des pratiques de modélisation. Nous avons conclu ainsi, en nous appuyant sur la systémique de Jean-Louis Le Moigne³ à trois types modélisations : l'analyse, la simulation, la conception⁴. Les décisions d'utiliser des théories étaient définies comme

¹ Version auteur de l'article paru dans les actes de la journée d'étude « Co-concevoir en architecture. Formes de collaboration et hybridations de savoirs », 2023, pp. 27-33, en ligne : <https://www.versailles.archi.fr/fr/les-publications/co-concevoir-en-architecture-formes-de-collaboration-et-hybridations-de-savoirs>

² Cette recherche s'inscrit dans le cadre du projet BiomimArchD (Construction d'une base de connaissance pour une architecture biomimétique durable) soutenu par la MITI CNRS dans le cadre des défis du biomimétisme 2019. (<https://miti.cnrs.fr/appele-a-projets/biomimetisme>).

³ LE MOIGNE, Jean-Louis, 2006 [1977]. *Théorie du système général. Théorie de la modélisation*. Paris : Presses universitaires de France.

⁴ VITALIS, Louis et GUENA, François, 2019. « Que peut-on faire des théories ? Essai de classification des modélisations en architecture », *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère*, 4. Doi.org/10.4000/craup.1828

le rapport entre une structure, au sens systémique d'une entité relativement stable pour être identifiable, et des finalités qui servent de valeurs de départ, de directive qui oriente l'utilisation de la théorie. Le recours à la théorie sert d'articulation entre les deux tout en leur étant extérieur : c'est un point de référence par rapport auquel on produit une structure dans le réel (non dans le discours) supposée répondre à des finalités (fig. 1).

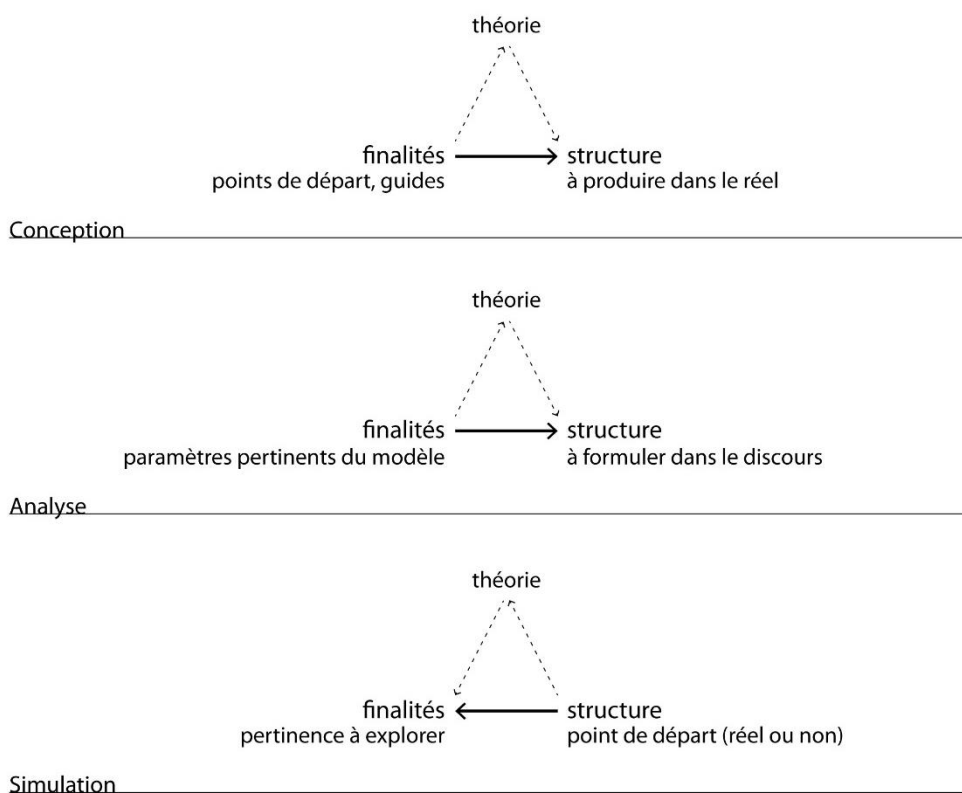


Figure 1 : Trois types d'utilisation d'une théorie en architecture (repris de Louis VITALIS et François GUENA, « Que peut-on faire des théories ?, art. cit.)

La validité de cette typologie était testée avec des théories issues de trois disciplines : une théorie astronomique des sciences naturelles, une théorie sociologique des sciences humaines et une théorie de la conception des sciences de l'artificiel. Le rapport possible de la biologie à la conception architecturale n'était pas étudié. La question reste donc de savoir si l'utilisation de la biologie en architecture, suit ce même schéma.

La question de la relation entre architecture et biologie peut être éclairée également par les travaux de Panos Mantziaras sur les relations entre disciplines et de la place de l'architecture sur la cartographie disciplinaire. Il s'appuie pour cela sur des travaux de

chercheurs qui élaborent ces cartes relationnelles à partir de mesures de citations réciproques entre domaines⁵. Le premier résultat intéressant est de voir que, dans la 1^{ère} carte exhibée, l'architecture n'apparaît pas, tandis que la biologie, trop importante, est découpée en sous-domaines : biologie moléculaire, cellulaire, écologie, microbiologie... Après avoir contacté les cartographes, Panos Mantziaras présente une deuxième carte qui montre la place de l'architecture⁶. En étudiant cette seconde carte, on remarque que l'architecture, trop petite, est regroupée avec les arts afin d'avoir une taille suffisante et qu'elle n'est pas en lien direct avec la biologie. Ce premier constat semble donc assez négatif ; il montre que la biologie et l'architecture sont dans des situations non seulement très différentes, mais aussi sans relation évidente. Il serait alors légitime de se demander pourquoi la conception architecturale devrait collaborer avec la biologie.

Biomimétisme et architecture

Pourtant si la question se pose, c'est en raison du développement récent d'un mouvement appelé « architecture biomimétique »⁷. L'inspiration de la nature n'est certes pas une chose nouvelle pour l'architecture, mais, en contraste avec le constat précédant, le biomimétisme revendique une relation forte entre les sciences biologiques et l'architecture. Et quoi que l'on puisse penser du ton parfois légèrement prophétique des discours sur l'architecture biomimétique à venir, la proposition est justement celle d'utiliser la biologie pour la conception suivant un objectif de développement durable et le souhait de mieux intégrer l'architecture dans la nature.

En cela l'architecture biomimétique est bien une partie du domaine plus large qu'est le biomimétisme général, qui ne concerne pas spécifiquement l'architecture, mais intéresse aussi beaucoup l'ingénierie, les sciences des matériaux ou l'industrie. Selon Janine Benyus, qui passe pour être l'initiatrice de ce mouvement, le biomimétisme est : « *a new science that studies nature's models and then imitates or takes inspiration from*

⁵ ROSVALL, Martin et BERGSTROM, Carl T., 2008. « Maps of random walks on complex networks reveal community structure », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105-4, p. 1118-1123.

⁶ MANTZIARAS, Panos, 2015. « Vers une épistémologie de l'architecture ». In Jean-Louis Cohen (dir.), *L'architecture entre pratique et connaissance scientifique*. Paris : Collège de France. [en ligne] <https://www.college-de-france.fr/site/jean-louis-cohen/symposium-2015-01-16-10h30.htm>, consulté le 20 mars 2020.

⁷ GRUBER, Petra, 2011. *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings*. Wien : Springer ; PAWLYN, Michael, 2011. *Biomimicry in Architecture*. London : RIBA Publishing ; POHL Göran et NACHTIGALL Werner, 2015. *Biomimetics for architecture & design: nature, analogies, technology*. Heidelberg : Springer.

*these designs and processes to solve human problems*⁸ ». Cette vision devrait alors s'appliquer au domaine de l'architecture. L'architecture biomimétique s'affirme comme innovation ; il y a une recherche d'originalité sinon de nouveauté, pour laquelle l'étude de la biologie est un moyen dans l'activité de résolution de problèmes de conception.

L'étude de cas

Il faut remarquer que le biomimétisme tend à une démarche spéculative qui repose sur de grandes idées, mais peu de cas réels, et que ses discours prennent souvent un tour futuriste. Pour pouvoir s'extraire du registre des propositions invérifiables concernant les possibles et questionner la réalité des pratiques, notre méthode était celle des études de cas. Il nous fallait sortir de la spéculation et des discours sur ce que devrait être cette collaboration entre architecture et biologie pour voir comment elle a effectivement lieu. Les critères de choix de ces cas consistaient donc à s'intéresser à :

- Des pratiques de conception qui mobilisent effectivement des connaissances biologiques (au sens d'un logos, d'une science biologique et non d'un savoir personnel), indépendamment du fait qu'elles se reconnaissent ou non comme « biomimétiques »
- Eventuellement des collaborations avec des biologistes ou, à tout le moins, le fait que des questions de compétences des acteurs soient en jeu.
- Des agences qui construisent des projets relativement complexes (programmes différenciés, étages superposés, variété de matériaux...) et sont donc en prise avec la lourdeur du métier et du BTP, (à la différence de projets expérimentaux ou universitaires, seulement exposés en galeries ou provisoires), le but étant de s'extraire le plus possible de la spéculation hors-sol et traiter de cas en prise avec une réalité commune de l'architecture
- Des agences situées en France, par commodité d'accès aux données et aux personnes.

Une liste de six cas d'étude a été ainsi arrêtée et un projet a été chaque fois retenu pour être approfondi. Ce n'est pas une liste fermée, elle pourrait bien évidemment être étendue. Il s'agit des cas suivants :

- l'agence Chartier Dalix Architectes avec le pavillon Faire à Paris,
- IN SITU Architecture et du projet de quartier Ordener à Senlis,

⁸ BENYUS Janine, 2002. *Biomimicry : Innovation Inspired by Nature*. New York : Harper Collins Publishers, p. 16.

- Art & Build Architects et du projet d'institut de recherche IARC mettant en œuvre les panneaux BILAME à Lyon,
- Philippe Rahm Architects et du projet Central Park à Taiwan,
- Tangram Architects et de leur projet des tours Parramatta à Sydney et
- Bechu & Associés et leur projet district 11 au sein d'un centre d'innovation à Skolkovo.

Dans ces cas, l'influence de la biologie s'observe dans le fait que l'utilisation des sciences biologiques est revendiquée et qu'elle a des effets sur les acteurs : soit que de nouveaux acteurs (écologues, naturalistes, microbiologistes, etc.) arrivent dans le processus de projet, soit que les compétences des architectes eux-mêmes se déplacent (parce qu'ils suivent des formations en biologie par exemple). Ce sont des collaborations interdisciplinaires qui sont observées, mais aussi des sources d'idées différentes pour la conception.

Voici, dans les grandes lignes⁹, le type de transposition biologie/architecture à l'œuvre : le travail de Chartier Dalix sur la biodiversité les conduit à imaginer une façade habitée, censée accueillir toute une faune et une flore en son sein. Plutôt que de se couper des « mauvaises herbes », considérées habituellement comme des facteurs de dégradation du bâti, l'architecture intègre un écosystème local d'espèces. Un biologiste au parcours singulier, Philippe Clergeaut intervient dans ces processus. Délaissant quelque peu l'attitude d'observation de la science classique adoptée dans la première partie de sa carrière, ce naturaliste investit un domaine où la recherche se confond avec l'action en devenant consultant en urbanisme. L'agence IN SITU présente le cas d'une collaboration entre un architecte et son frère, botaniste, autour de la phyllotaxie (la disposition des feuilles dans la croissance des plantes qui peut être décrite géométriquement). L'idée que certaines phyllotaxies permettent aux feuilles supérieures de projeter moins d'ombre sur les feuilles inférieures et ainsi capter plus soleil est réutilisée à Senlis, dans un schéma urbain visant à optimiser les apports solaires des logements. L'agence développe à cette occasion un algorithme inspiré de la phyllotaxie, en collaboration avec un institut de transition énergétique NOBATEK en particulier pour les enjeux énergétiques. L'agence Art & Build s'intéresse aux nasties des fleurs : ces multiples mouvements développés par les végétaux qui meuvent leurs organes selon

⁹ Pour plus de détails, voir : CHAYAAMOR-HEIL, Natasha, VITALIS, Louis, 2021. « Biology and architecture: An ongoing hybridization of scientific knowledge and design practice by six architectural offices in France ». *Frontiers of Architectural Research*, 10-2, p.240-262, [en ligne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263520300704>.

des cycles jour/nuit par exemple. Les concepteurs dessinent des panneaux dotés d'un système d'ombrage qui s'adapte pour protéger la façade du soleil sans recours à une énergie extérieure. Philippe Rahm s'intéresse en autodidacte à la physiologie humaine et aux sciences du climat, cherche à lier le champ de l'architecture à celui de la météorologie en créant des relations synergiques entre climat, architecture et habitant. Il prétend, à l'aide de ces connaissances, faire passer l'architecture d'une notion d'objet solide à une composition d'atmosphères invisibles. Pour le parc de Taichung, Philippe Rahm a recours, avec l'aide des ingénieurs allemands du bureau Transsolar, à des modèles de la dynamique des fluides pour gérer les qualités d'air, d'humidité et de fraîcheur contrastées. L'agence Tangram va puiser dans la bactériologie des savoirs sur la bioluminescence pour imaginer des systèmes d'éclairage sans énergies fossiles. Pour cela, les architectes collaborent avec l'Institut méditerranéen d'océanologie et accueillent une doctorante dans leur équipe. L'intérêt des architectes de Béchu et associés pour les comportements sociaux des pingouins qui se regroupent pour se tenir chaud les amène à dessiner un schéma urbain d'un quartier de 90 logements en Russie. Le plan et la disposition du groupe de logements s'inspirent d'une organisation sociale du manchot empereur pour protéger les habitants du froid extrême, et créer des micro-communautés organisées autour d'un espace central favorisant le lien social entre les habitants.

L'espace de conception accueillant les connaissances biologiques

Le cadre d'analyse des utilisations théoriques présenté précédemment fournit un outil conceptuel pour comprendre l'implication des sciences biologiques dans ces cas d'études. Ici il est utilisé seulement pour sa modélisation de la conception. Il permet de faire une analyse en deux temps : d'abord d'observer ce qui se passe autour des théories biologiques, donc à l'espace de conception au travers duquel elle est utilisée pour répondre à des finalités et produire des structures spatiales ; ensuite, observer l'espace des connaissances biologiques qui sont convoquées.

D'une part, les résultats montrent que les motifs qui suscitent le recours à la biologie ajoutent des finalités qui ne lui sont pas propres (fig. 2). Il s'agit en particulier de la durabilité, d'idées fonctionnelles concernant le confort des usagers, de certaines esthétiques, mais aussi, et bien que moins fortement présents, d'une dimension pédagogique, d'une inversion des valeurs à la manière de la « *subnature* » de David

Gissen¹⁰, ou d'intérêts économiques. La biologie se voit ainsi surchargée ou enrichie de nouvelles valeurs à l'aune desquelles elle devient pertinente comme espace de référence de la conception architecturale. Par ailleurs, ces recours à la biologie tendent à produire des structures qui sont soit des composants d'architecture, des panneaux de façade par exemple, soit des schémas urbains. Cela soulève la question de savoir si ces projets ne passent pas à côté d'une spécificité de l'architecture, puisque les composants peuvent être utilisés pour des architectures différentes et que différentes architectures peuvent remplir les schémas urbains. Cette importance des composants qui sont faits pour être utilisés sur différents projets n'est pas sans rapport avec le fait que le domaine du biomimétisme est dominé par des travaux d'ingénierie et de technologie. Mais il faudrait encore comprendre ce qui se joue dans ce rapport : est-ce l'architecture qui résiste ou est plus difficile à intégrer dans le biomimétisme ? ou est-ce que les projets d'ingénierie biomimétiques existants exercent une influence qui empêche d'imaginer d'authentiques architectures biomimétiques ? (fig.2)

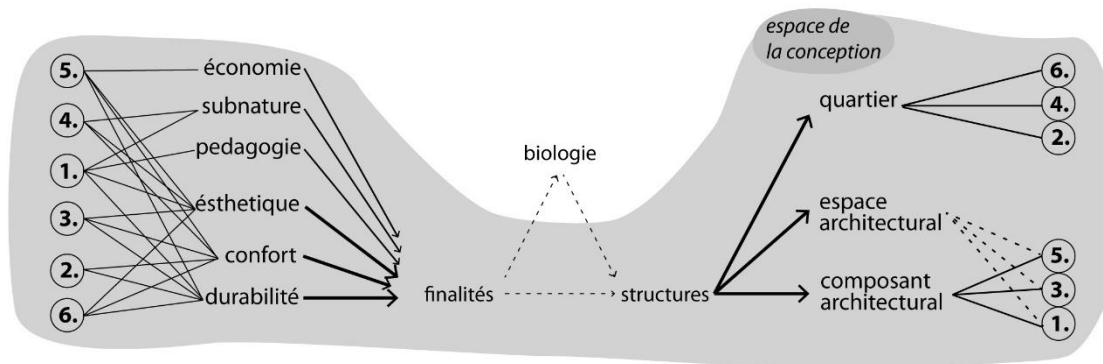


Figure 2 : Structure de l'espace de conception des six cas d'étude lors du recours à la biologie (schéma L. Vitalis.)

Prenons pour exemple de cette analyse le cas n°1 : la biologie est mobilisée au regard des valeurs de durabilité, d'esthétique, de pédagogie et de *subnature*, pour produire un composant de façade qui pourra ultérieurement être utilisé dans différentes architectures encore à concevoir. Le cas n°2, pour des finalités touchant au confort solaire et à la durabilité des apports énergétiques, mobilise la phyllotaxie pour élaborer une structure qui est de l'ordre du schéma urbain, de la composition d'un quartier.

L'espace des connaissances biologiques mobilisé dans la conception

D'autre part, pour ce qui concerne le champ des connaissances scientifiques et

¹⁰ GISSEN, David, 2009. *Subnature : Architecture's Other Environments*. New York : Princeton Architectural Press.

biologiques en jeu, on observe qu'en plus de la biologie, nombre d'autres sciences sont mobilisées, associées à la biologie (fig. 3). Il est bien entendu délicat de tracer une limite entre le biologique et le non-biologique. La biologie est en relation, comme toute science, avec d'autres disciplines. Il s'agit néanmoins de champs de savoirs qui ne sont pas directement en lien avec la spécificité des sciences biologiques et de l'étude du vivant. Les concepteurs mobilisent ces savoirs sans toujours intentionnellement s'écarter de la biologie. Ces domaines apparaissent aussi par le truchement des modèles manipulés, comme celui de l'héliodon qui repose implicitement sur les savoirs de la mécanique céleste : lorsqu'on ne l'applique plus aux plantes, mais à l'urbain, que reste-t-il de la biologie ? Ainsi, la physique les mathématiques et la géométrie sont notamment mobilisées par l'entremise de la biologie qui servent de pivot entre les finalités et les structures.

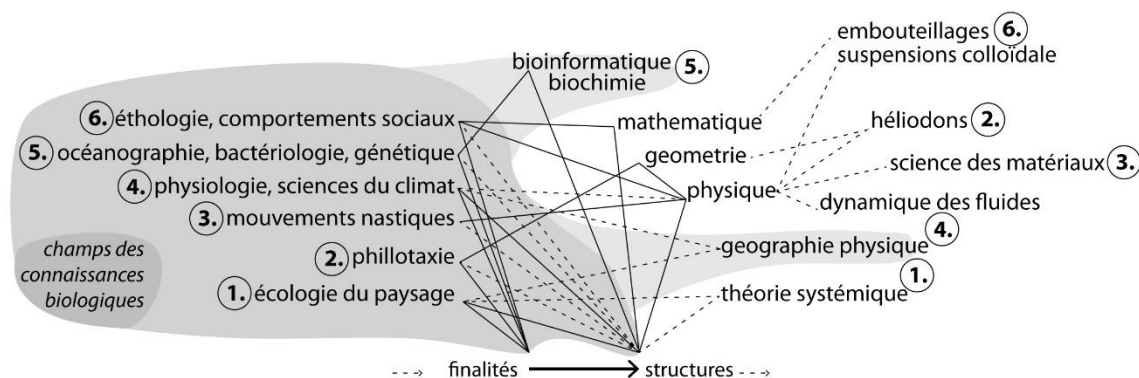


Figure 3 : Structure de l'espace des connaissances scientifiques mobilisées par les six cas d'étude (schéma L. Vitalis.)

Prenons pour exemple de cette analyse le cas n°2 : ce qui dans la phyllotaxie va intéresser les concepteurs, porte sur la géométrisation de l'arrangement des plantes (et non les facteurs génétiques et évolutionnistes menant à ces phyllotaxies, ni le rôle d'hormones comme l'auxine importante pour la croissance des plantes). Ce travail géométrique aboutit *in fine* au recours à un modèle physique, l'héliodon, pour calculer des angles solaires en fonction de moments de la journée et de l'année. Donc la simulation en jeu dans la conception architecturale est celle de la course du soleil, et non de la croissance des plantes. Dans le cas n°6, en s'intéressant aux comportements des pingouins, les architectes sont conduits à lire des articles de physique colloïdale (traitant des dispersions homogènes de particules en suspension dans un liquide et constituant un système à deux phases), qui analysent le mouvement des pingouins

comme des particules en mouvement¹¹. En poussant plus loin, ils ont recours à des travaux mathématiques qui modélisent les attroupements de pingouins comme des embouteillages automobiles et postulent notamment pour l'occasion que les entités avancent dans une seule direction comme des voitures (mais pas comme des pingouins)¹². Il peut paraître ainsi étonnant au regard de la valeur de développement durable, de s'appuyer sur des embouteillages. Mais au-delà de ce type de critique qui reste à affiner (car le dégagement de CO₂ ne fait non plus pas partie du modèle mathématique d'embouteillage), c'est la relation entre architecture et biologie qui apparaît plus indirecte, plus distendue.

Cela nous amène à deux autres types de résultats. D'abord, le fait que les connaissances biologiques ne semblent pas être d'ordre théorique au sens épistémologique strict. Certains biologistes engagés dans les projets écrivent des manifestes et s'engagent ainsi sur le terrain des architectes et des politiques¹³. Ensuite, il semble que la connaissance biologique soit d'ordre général, voire approximatif. Ce sont certains des biologiques interrogés qui nous ont mis sur cette piste en nous indiquant les modèles biologiques n'étaient pas tant importés tels quels dans la conception architecturale, mais qu'ils étaient transposés, réinterprétés à partir des grands principes sur lesquels ils étaient fondés¹⁴. Le cas du modèle des comportements des groupes de pingouins est clairement à comprendre de cette manière, car les maisons qui découlent de cette inspiration ne bougent pas. Mais c'est le cas aussi des nasties qui deviennent des panneaux de façade dont le mouvement des occultants est basé sur des alliages de bimétaux ayant une sensibilité à la chaleur¹⁵. La conception écarte d'autres paramètres comme l'humidité, la lumière ou la croissance cellulaire, pertinents pour les plantes¹⁶. Dans cette perspective, de nouvelles questions émergent, car les sciences biologiques sont des champs très prolifiques et en évolution constante. Soit une architecture inspirée par des résultats scientifiques qui seraient plus tard, avec la progression des savoirs, démontrés faux : cette architecture doit-elle rétroactivement perdre son statut « biomimétique » ?

¹¹ ZITTERBART, Daniel P. (*et al.*), 2011. « Coordinated Movements Prevent Jamming in an Emperor Penguin Huddle », *PLOS ONE*, 6-6, p. e20260.

¹² GERUM, Richard Carl (*et al.*), 2013. « The origin of traveling waves in an emperor penguin huddle ». *New Journal of Physics*.15-12, p. 125022.

¹³ CLERGEAU, Philippe, 2015. *Manifeste pour la ville biodiversitaire*. Rennes : APOGEE.

¹⁴ En particulier Teva Vernoux, chercheur botaniste au CNRS, collaborant avec l'agence IN SITU sur les questions touchant à la phyllotaxie.

¹⁵ ART & BUILD Architectes, 2017. *Hors-série #29*. Paris : ArchiSTORM, p. 84-87.

¹⁶ VAN DOORN, G. Wouter, VAN MEETEREN Uulke, 2003. « Flower opening and closure: a review », *Journal of Experimental Botany*. 54-389, p. 1801-1812.

Conclusions

L'étude de cas montre ainsi des pratiques hybrides qui mêlent des connaissances biologiques à la conception architecturale. Pourtant ces connaissances scientifiques semblent en même temps transformées, réinterprétées, voire partielles. Il faut y voir l'effet du double mouvement propre à l'hybridation : si la conception architecturale est affectée par la biologie, la biologie est elle-même revisitée par l'architecture.

Ces résultats peuvent sembler en un sens affaiblir les prétentions d'une architecture biomimétique à se servir de la biologie. Ils nous semblent plutôt indiquer la spécificité des conditions de collaborations interdisciplinaires dans des pratiques architecturales réelles plutôt qu'idéales. Pour pouvoir comprendre ce qui se joue dans l'utilisation des sciences biologiques pour la conception architecturale, il semble nécessaire d'acter et de partir de ce caractère indirect des relations biologie/architecture et de chercher à élucider le fonctionnement des approximations s'établissant lors des transpositions d'un domaine à l'autre¹⁷. Le travail présenté ici reste néanmoins limité quantitativement et qualitativement. D'une part, il faudrait pouvoir comparer à plus grande échelle pour vérifier si ces résultats sont partagés. D'autre part, le nombre de cas ne permettait pas non plus d'entrer dans une analyse plus fine de la conception de chacun. Pour y remédier, un travail a été réalisé pour étudier plus précisément des processus de conception : avec le cas du stade dit « nid d'oiseau » d'Herzog et de Meuron, comparé ensuite à une conception se déroulant dans un contexte académique avec le cas des pavillons développés à l'Université de Stuttgart¹⁸.

*

Bibliographie

ART & BUILD, Architectes, 2017. *ArchiSTORM. Hors-série #29*, p. 84-87.

BENYUS, Janine, 2002. *Biomimicry : Innovation Inspired by Nature*. New York : Harper Collins Publishers.

¹⁷ Pour aller plus loin sur ces questions épistémologiques, voir : VITALIS, Louis, CHAYAAMOR-HEIL, Natasha, 2022. « Forcing biological sciences into architectural design: On conceptual confusions in the field of biomimetic architecture », *Frontiers of Architectural Research*, 11-2, p.179-190. [en ligne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263521000753> .

¹⁸ Cf. VITALIS, Louis, CHAYAAMOR-HEIL, Natasha, 2023. *Architecture et sciences du vivant. Études critiques*. Paris : Hermann, chap. 1 et 2 .

CHAYAAMOR-HEIL, Natasha, VITALIS Louis, 2021. « Biology and architecture: An ongoing hybridization of scientific knowledge and design practice by six architectural offices in France ». *Frontiers of Architectural Research*, 10-2, p.240-262. [en ligne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263520300704>

CLERGEAU, Philippe, 2015. *Manifeste pour la ville biodiversitaire*. Rennes : APOGEE.

GERUM Richard Carl (et al.), 2013. « The origin of traveling waves in an emperor penguin huddle ». *New Journal of Physics*, 10.1088/1367-2630/15/12/125022

GISSSEN, David, 2009. *Subnature: Architecture's Other Environments*. New York : Princeton Architectural Press.

GRUBER, Petra, 2011. *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings*. Wien : Springer.

LE MOIGNE, Jean-Louis, 2006 [1977]. *Théorie du système général. Théorie de la modélisation*. Paris : Presses universitaires de France.

MANTZIARAS, Panos, 2015. « Vers une épistémologie de l'architecture ». In COHEN Jean-Louis (dir.). *L'architecture entre pratique et connaissance scientifique*. [en ligne] <https://www.college-de-france.fr/site/jean-louis-cohen/symposium-2015-01-16-10h30.htm>, consulté le 20 mars 2020.

PAWLYN, Michael, 2011. *Biomimicry in Architecture*. London : RIBA Publishing.

POHL, Göran et NACHTIGALL, Werner, 2015. *Biomimetics for architecture & design: nature, analogies, technology*. Heidelberg : Springer.

ROSVALL, Martin, BERGSTROM, Carl T., 2008. « Maps of random walks on complex networks reveal community structure ». In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105-4, p. 1118-1123.

VAN DOORN, Wouter G., VAN MEETEREN, Uulke, 2003. « Flower opening and closure: a review ». *Journal of Experimental Botany*. 54-389, p. 1801-1812.

VITALIS, Louis, CHAYAAMOR-HEIL, Natasha, 2023. *Architecture et sciences du vivant. Études critiques*. Paris : Hermann

VITALIS, Louis, CHAYAAMOR-HEIL, Natasha, 2022. « Forcing biological sciences into architectural design: On conceptual confusions in the field of biomimetic architecture », *Frontiers of Architectural Research*, 11-2, p.179-190. [en ligne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263521000753>

VITALIS, Louis, GUENA, François, 2019. « Que peut-on faire des théories ? Essai de classification des modélisations en architecture ». *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère*, 4, <https://doi.org/10.4000/craup.1828>

ZITTERBART, Daniel P. (et al.), 2011. « Coordinated Movements Prevent Jamming in an Emperor Penguin Huddle », *PLOS ONE*, 6-6, DOI: 10.1371/journal.pone.0020260