

Mémoire de master 2023/2024



# Le biomimétisme et le paramétrisme

Exploration des points d'intersection entre le biomimétisme et les outils paramétriques à travers une analyse comparative des projets étudiants de l'ENSAPLV

**ROH Song**



Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris La Villette  
CCA-S912 Savoirs des Activités de Projet Instrumentées (SAPI)  
Enseignants encadrants : François GUENA, Joaquim SILVESTRE, Anne TUSCHER

**Publication :**

Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris La Villette (ENSAPLV)

Séminaire : CCA-S912 Savoirs des Activités de Projet Instrumentées (SAPI)

**Encadrement :**

François GUENA

Joaquim SILVESTRE

Anne Tuscher

**Date de publication :**

06 janvier 2025

# AVANT PROPOS

Les éléments de la nature m'ont toujours entouré. Ayant grandi dans un petit village de l'île de Jeju où il n'y avait pas plus d'une centaine d'habitants, mes yeux étaient davantage attirés par la toile de fond verte et la terre brune que par les bâtiments construits par l'homme. Étudiant du secondaire me préparant à entrer à l'école d'art, je me suis alors mis à la peinture plus sérieusement, inspiré par des objets naturels. J'ai approfondi mon intérêt formel et esthétique pour les éléments naturels en étudiant, en déconstruisant et en assemblant leur développement. Après avoir obtenu mon diplôme d'école d'art et étudié l'architecture, j'ai continué à explorer différentes manières d'utiliser les objets naturels et, au cours de ma première année de master, j'ai découvert la notion de « biomimétisme ». Le concept de biomimétisme a représenté une bouffée d'air frais dans un monde où mes projets étaient dominés par les idées biophiliques et biomorphologiques. Il s'agit d'une nouvelle façon de voir les objets naturels, qui, je l'espère, m'aidera à développer une perspective différente sur l'architecture.

J'ai toujours aimé expérimenter différentes formes atypiques, plutôt que les formes architecturales rectangulaires standards, et j'ai toujours été intéressé par la recherche du logiciel le plus adapté à la réalisation de ces différentes formes. Cela a naturellement conduit à l'idée de se saisir de l'outil paramétrique Grasshopper pour travailler les formes architecturales, et, à travers ce processus, j'ai découvert le lien étroit entre Grasshopper et le biomimétisme.

Grasshopper permet de programmer des algorithmes complexes de manière visuelle (GUI, Graphical User Interface). Les paramètres de l'algorithme permettent d'explorer des idées plus flexibles en matière d'analyse logique et de modèles biologiques. Cependant, pour de nombreux étudiants, dont moi-même, le biomimétisme et les outils paramétriques ne sont pas très accessibles. Lors de mon cours de premier cycle à l'ENSA Nantes, je n'ai vu qu'environ 5 étudiants sur 131 utiliser des outils paramétriques, et la notion de biomimétisme n'était pas familière à la plupart d'entre eux. Cependant, dans certaines écoles d'architecture, la notion fait l'objet d'une recherche et d'un enseignement continus. Cette évolution est

---

également motivée par l'Accord de Paris et la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), qui se préoccupent de plus en plus de réduire les pertes d'énergie et d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en utilisant des éléments fonctionnels du bâtiment. Cela peut être un facteur qui encourage le biomimétisme à s'intégrer au travail de l'architecture. L'architecture est une discipline très proactive lorsqu'il s'agit de collaborer avec d'autres domaines, et ces collaborations donnent des résultats significatifs.

Lorsque l'on mélange ces deux notions peu familières, est-il possible d'obtenir une réponse claire ? : dans quelle mesure et dans quels domaines les outils paramétriques peuvent-ils intervenir dans la compréhension des étudiants ? Les outils paramétriques sont-ils même essentiels pour les projets biomimétiques ? Comment la compréhension du biomimétisme par les étudiants affecte-t-elle la réalisation de projets architecturaux biomimétiques réels ? Sur la base de projets biomimétiques exécutés à l'École Nationale Supérieure d'Architecture Paris La Villette (ENSAPLV) entre 2018 et 2024, je souhaiterais analyser l'approche des étudiants vis-à-vis des modèles biologiques, la manière dont ils les complètent avec des outils paramétriques et leurs réalisations.

---

# RÉSUMÉ

L'objectif de cette recherche est d'explorer la relation entre les principes biomimétiques et les outils de conception paramétrique pour les étudiants. Elle analysera la nature de l'approche biomimétique de la conception architecturale et son application en architecture. Elle examinera également la contribution de l'outil paramétrique Grasshopper aux projets de biomimétisme, ainsi que des modèles de composants spécifiques capables de réaliser des formes et des fonctions complexes.

En analysant 37 projets biomimétiques d'étudiants, j'étudierai la pertinence de l'utilisation d'outils paramétriques dans la conception biomimétique, les parties du projet auxquelles ils ont été appliqués, et si la compréhension des deux notions par les étudiants influence le résultat de leurs projets. J'analyserai également les problèmes auxquels les étudiants ont été confrontés et les solutions qui ont été trouvées.

Enfin, je comparerai l'impact de la compréhension des outils paramétriques par les étudiants et de leur capacité à les utiliser sur leurs résultats de conception, en analysant leur rôle dans la satisfaction des exigences expressives et fonctionnelles de la conception biomimétique. J'étudierai également si l'utilisation des outils paramétriques conduit à de meilleurs résultats en matière de biomimétisme.

**Mots-Clés :** Biomimétisme, paramétricisme, Grasshopper, Rhino3D, forme, stratégie de design, projets des étudiants ENSAPLV, Voronoi, Square, analyse de données, niveau écosystème, niveau comportement, niveau organisme, intervention paramétrique, bio-morphologie, biophilie, numérique, algorithmes.

---

# REMERCIEMENT

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de master. Sans leur soutien et leurs encouragements, ce travail n'aurait pas été possible.

Tout d'abord, je souhaite remercier mes encadrants de mémoire, Monsieur SILVESTRE Joaquim, Madame TUSCHER Anne et M. GUENA François pour leur patience, leur conseils avisés et leur soutien inébranlable tout au long de cette recherche. Leur expertise et leurs suggestions ont été inestimables pour l'avancement de ce travail.

Je tiens également à remercier chaleureusement le Dr Natasha CHAYAAMOR-HEIL. Elle m'a beaucoup aidé à comprendre les notions de base du biomimétisme et à surmonter les difficultés de mon mémoire.

Je voudrais aussi remercier mes amis français qui ont toujours été là pour me soutenir et me comprendre. Rédiger mon mémoire en français a représenté un grand défi pour moi, étant donné que je ne parle pas couramment cette langue. Je suis donc très reconnaissant envers mes amis et connaissances françaises pour leur aide linguistique.

Enfin, je remercie toutes les personnes ayant participé, de près ou de loin, à ce projet, par leurs suggestions, leur disponibilité et leur aide précieuse.

À toutes et à tous, merci infiniment.

---

# SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	1
1. INTRODUCTION.....	3
2. PLAN.....	6
3. ETAT DE L'ART .....	7
A. Biomimétisme .....	7
I. Aperçu de l'approche.....	12
II. Approche biomimétisme.....	13
III. Des obstacles réalistes.....	15
IV. Approche à trois niveaux du biomimétisme.....	16
V. Exemples d'architecture biomimétisme.....	17
B. Paramétrisme.....	20
I. Outils paramétriques .....	23
II. Mécanismes de l'outil paramétrique, « Grasshopper » .....	27
C. État de l'éducation .....	29
D. Lacunes dans notre compréhension du biomimétisme.....	33
I. Manque de collaboration .....	33
II. Reconnaître les problèmes fondés sur des pratiques de biomimétisme inappropriées .....	34
4. Enonciation de la problématique.....	36
5. METHODE.....	38
I. Orientations de la recherche .....	38
II. 6 étapes pour les expériences .....	39
6. EXPERIENCES.....	44
A. Classification initiale et information fine des projets étudiants de l'ENSAPLV .....	44
I. Données des projets étudiants de l'ENSAPLV .....	44
II. Analyse Anonyme .....	48
III. Absence de titre _ lié au modèle biologique.....	48

---

---

## SOMMAIRE

ROH Song

IV. Script Grasshopper .....	48
V. Niveau principal .....	49
B. Analyse comparative du Modèle biologique.....	49
I. Environnements de formation pour l'exécution des projets.....	49
II. L'importance du choix d'un modèle biologique.....	50
III. Classification basée sur trois niveaux de biomimétisme .....	51
IV. Choix des étudiants.....	51
V. La plupart des projets : Organisme .....	54
VI. Comportement .....	57
VII. Ecosystème .....	58
C. Analyse paramétrique de Réalisations et de composants avec Grasshopper .....	59
I. Principaux composants utilisés .....	59
II. Éléments clés d'Ecosystème et Comportement : Relations .....	63
III. Utilisation universelle : Voronoï.....	66
D. Identification des projets non biomimétiques.....	71
I. Composants Paramétriques dans les projets étudiants.....	71
II. Projets non biomimétiques.....	72
III. L'attention des étudiants sur la forme.....	74
IV. Intervention de composants paramétriques: focus sur les éléments morphologiques dans l'architecture biomimétisme.....	75
E. Classification des projets de biomimétisme réussis et analyse de la conformité des outils paramétriques.....	76
I. Le rôle des outils paramétriques dans les projets de biomimétisme.....	77
II. L'intervention d'outils paramétriques est-elle nécessaire ? .....	79
III. L'utilisation d'outils paramétriques fortement recommandée.....	81
7. CONCLUSION .....	83
8. ANNEXES .....	88
9. BIBLIOGRAPHIE.....	106

---

# 1. INTRODUCTION

## **Branche de l'architecture : biomimétisme et paramétrique**

Au fil du temps, l'architecture a connu de nombreuses évolutions. Les outils paramétriques orientent différemment la conception architecturale. Ils suggèrent différentes approches de l'architecture, et ces directions repoussent les limites de l'analyse académique et pratique.

Le biomimétisme est l'une des branches de cette recherche, et de nombreuses recherches sont actuellement menées en pratique et en laboratoire pour interpréter le domaine architectural. Cette approche biomimétique des systèmes, connue sous le nom de « Biomimétisme », est une innovation notable en architecture. Observer et reproduire les structures et les systèmes complexes de la nature est une tâche difficile, mais la réalisation de l'architecture biomimétique à l'aide d'outils paramétriques peut façonner les limites de la recherche architecturale.

## **Paramétricisme**

Parmi ses différents développements, l'architecture déconstructiviste se distingue comme un aspect du postmodernisme qui met l'accent sur l'innovation formelle. Elle prend en compte divers contextes philosophiques et littéraires pour présenter des structures monumentales qui s'opposent au rationalisme et au fonctionnalisme. Cette approche nécessite une conception complexe et peut être améliorée en combinant les technologies informatiques contemporaines pour optimiser l'environnement bâti et les processus du projet. <sup>1</sup>Un développement notable dans ce contexte est le « Paramétricisme », mentionné pour la première fois par Patrick Schumacher, qui rend les formes non conventionnelles facilement

---

<sup>1</sup> Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design, Patric Schumacher, 2008

accessibles grâce à des calculs mathématiques et des composants spécifiques, augmentant ainsi considérablement l'efficacité des processus architecturaux et des algorithmes adaptés à l'architecture.

Il permet aux architectes d'exploiter la puissance du paramétrisme pour explorer des solutions structurelles innovantes, s'inspirant de la géométrie complexe et de la nature. Cela permet ainsi à l'architecture d'être plus fonctionnelle et évolutive.

### **Contexte et justification**

Le paramétrique, une solution pour réaliser une architecture contemporaine répondant à une variété de besoins contemporains, et le biomimétisme, une approche visant à résoudre les problèmes environnementaux, coexistent et interagissent pour résoudre des défis architecturaux tels que l'efficacité énergétique des bâtiments et la rencontre de diverses idées/intentions d'idées différentes. Ces enjeux se rejoignent dans la conception biomimétique à l'aide d'outils paramétriques, qui a prouvé son efficacité dans de nombreux projets et qui émerge comme une nouvelle tendance architecturale. La conjonction des deux thématiques - biomimétisme et paramétrisme - peut conduire à des techniques architecturales qui renforcent la diversité formelle et la systématisation de l'architecture.

### **Limite**

Malgré ce potentiel, trouver des moyens concrets de le réaliser, en particulier dans le domaine de l'éducation, reste un défi majeur. Le biomimétisme est très prisé dans les domaines de la chimie et de la médecine. Par conséquent, étudier comment ces deux contextes peuvent être appliqués efficacement à l'architecture pourrait offrir aux étudiants en architecture davantage d'options en matière de diversité architecturale.

### **Objectif de la recherche**

Cette étude vise à déterminer si l'application des principes du biomimétisme aux projets architecturaux à l'aide de la paramétrie est appropriée et réalisable pour les

---

étudiants en master. Elle analyse les avantages et les défis de cette approche, et comment les étudiants peuvent utiliser les outils paramétriques pour intégrer correctement des systèmes naturels complexes dans leurs conceptions, et si la fusion des deux concepts a des implications architecturales.

Ces concepts peuvent servir de recommandation pour utiliser le potentiel des outils paramétriques dans l'enseignement afin de développer des solutions architecturales plus diversifiées. Cette exploration vise à ouvrir la voie à l'application de ces concepts dans la recherche et la pratique architecturales futures. Les résultats sont proposés pour accroître l'applicabilité du biomimétisme et l'utilité des outils paramétriques dans un contexte éducatif.

## 2. PLAN

La section 'État de l'art' de cette étude explore le concept de la technologie du biomimétisme, son importance dans l'architecture et ses applications. Elle fournit une analyse concise du préfixe « bio » et des termes associés au biomimétisme.

Je décris ensuite les paramétriques souvent utilisés en architecture, et explique ce que font les outils paramétriques et comment les utiliser. Je décris également le processus actuel de mise en œuvre du biomimétisme en établissant le lien entre les avantages de l'utilisation des outils paramétriques et le biomimétisme.

L'ENSAPLV propose aux étudiants de master un cours basé sur un projet qui combine ces deux notions. Les étudiants utilisent l'outil paramétrique Grasshopper pour les aider avec la notion de biomimétisme, développant ainsi leur compréhension du biomimétisme ainsi que leur réflexion critique sur l'analyse architecturale.

Dans ce contexte, la section 'expériences' identifie la conformité des outils paramétriques dans l'analyse des projets biomimétiques : en suivant un total de sept étapes dans le processus décrit dans la section 'Méthode', j'identifie des projets qui respectent les principes du biomimétisme et analyse en détail la conformité des outils paramétriques dans ces projets.

Dans la conclusion, je résume mes résultats, souligne leurs implications et suggère des limites et des orientations de recherche futures.

## 3. ETAT DE L'ART

### A. Biomimétisme

---

« *L'originalité n'est rien d'autre qu'une imitation judicieuse* »

Voltaire

---

#### Biomimétisme, loin de nous ?

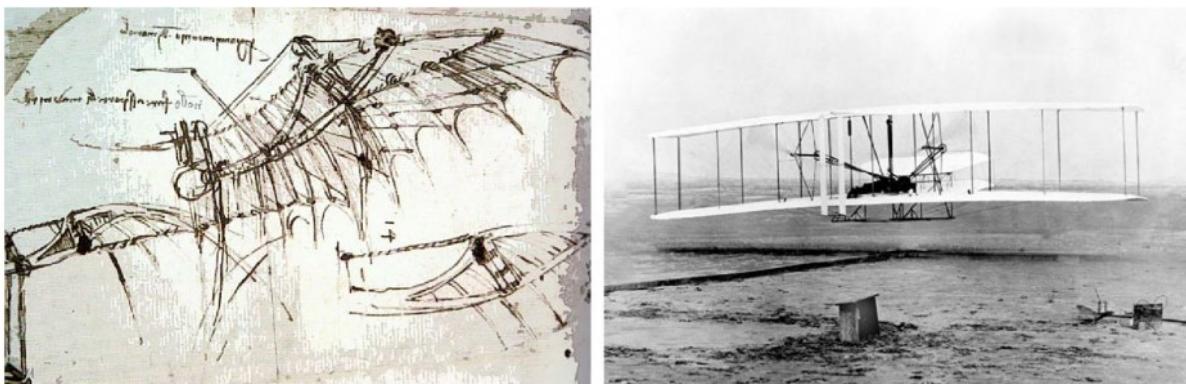


Figure 1 \_ Plan de l'avion de Léonard de Vinci (1015-1506) et de l'avion des frères Wright (1903)

<sup>2</sup>Le premier avion a été conçu par les frères Wright aux États-Unis, inspirés par le mécanisme de vol de l'aigle à tête blanche (Figure 1). Rien n'est vraiment nouveau, car si quelque chose nous apparaît comme nouveau, c'est qu'il a été réimaginé. Les produits que nous appelons design ergonomique ou design innovant ont-ils été entièrement inventés dans nos têtes ? Malheureusement, probablement pas.

Nous avons déjà expérimenté le concept de biomimétisme, mais la méconnaissance du mot et notre perception intuitive de quelque chose de

---

<sup>2</sup> Le pinceau du requin : le biomimétisme et comment la nature inspire l'innovation, Jay Harman, 2013

nouvellement construit (matériau, forme, apparence, etc.) nous empêchent de le reconnaître.

Par exemple, nous connaissons tous la fonction et le mécanisme du Velcro. Son mécanisme a été inspiré par le *Xanthium strumarium*, une plante annuelle dont les bords forment des crochets et des trous pour créer une adhésion instantanée (Figure 2). Il s'agit probablement de l'exemple le plus proche de biomimétisme que nous expérimentons au quotidien.



Figure 2 \_ Mécanisme de vélcro et *Xanthium strumarium* (modèle biologique)

### Définition du biomimétisme

Dérivé des mots grecs « bios », qui signifie « vie », et « mimesis », qui signifie « reproduction » ou « imitation », le biomimétisme vise à résoudre des problèmes existants en étudiant et en imitant les structures et les systèmes de conception des organismes présents dans la nature. Selon le Ceebios (Centre d'Études et d'Expertise en Biomimétisme), « Le biomimétisme est une coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines d'innovation dans le but de résoudre des problèmes pratiques par le biais de l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques, de leur abstraction en modèles ainsi que le transfert et l'application de ces modèles à la solution ». En anglais, on parle aussi de « biomimicry » ou de « biomimetic », deux mots qui sont actuellement utilisés de manière presque interchangeable, bien qu'ils aient des

significations différentes : imiter la nature d'une manière spécifique et trouver dans la nature l'inspiration pour des solutions techniques.

La notion de biomimétisme remonte aux philosophes grecs de l'Antiquité. Pour des philosophes comme Démocrite, la « mimesis » (notion définie par Platon) signifiait l'imitation de la nature par la technologie. À la même époque, Aristote s'est intéressé au biomimétisme, qui se définit aujourd'hui comme la recherche des propriétés mécaniques des organismes.

Aristote est devenu le précurseur des chercheurs qui s'intéressent aux mécanismes à l'œuvre dans les organismes qui nous entourent et à leurs applications technologiques potentielles. Ils ont contribué sans le savoir à l'histoire du biomimétisme.

Dans les années 1950, le chercheur américain Otto Schumit introduit le terme « biomimétisme », et en 1958 apparaît le terme « bionique », qui désigne officiellement une approche scientifique de la recherche et du développement. À cette époque, les deux notions ont un contexte similaire, puisqu'elles sont principalement utilisées dans les domaines de la science, de la médecine et de l'ingénierie.

Schumit a inventé ce terme pour décrire le processus de transfert des principes observés dans les systèmes biologiques vers le domaine de la technologie, jetant ainsi les bases de la nouvelle discipline du « biomimétisme ». Au cours des 50 années suivantes, l'approche biomimétique a donné naissance à un certain nombre de dispositifs et de notions innovants, mais son application est restée largement expérimentale.

Le terme « bionique » a donné lieu à des fantasmes de science-fiction, comme dans la série télévisée « The Six Million Dollar Man », qui met en scène un homme bionique doté de pouvoirs extraordinaires.

Contrairement à ces considérations fictives, le biomimétisme a aujourd'hui une forte composante appliquée et industrielle qui répond à des besoins concrets et s'inscrit dans le discours de l'économie de la connaissance, d'autant plus que notre

conscience de ce que la vie peut nous offrir et de ses possibilités s'étend au-delà de ses ressources physiques immédiates.

<sup>3</sup> En 1997, la biologiste américaine Janin Benyus a apporté une contribution majeure au biomimétisme en étendant l'inspiration biologique au développement d'innovations écologiques efficaces et durables. Bien que le mot « Biomimétisme » ait été utilisé auparavant par Otto Schumit, l'intérêt du public pour le mot a été initié par Janin Benyus. Elle a publié six livres sur le sujet et continue de contribuer au biomimétisme à ce jour en fondant « Biomimétisme 3.8 ».

Dans son livre « Biomimicry : Innovation Inspired by Nature », elle propose d'utiliser la nature comme modèle, mesure ou mentor.

- I. La nature comme modèle : La biomimétique recherche des modèles dans la nature, puis les imite ou s'inspire de leurs caractéristiques pour résoudre des problèmes humains.
- II. La nature comme mesure : Le biomimétisme propose d'utiliser des critères écologiques pour juger de la « pertinence » des innovations. Après 3,8 milliards d'années d'évolution, la nature a appris ce qui fonctionne, ce qui est approprié et ce qui dure.
- III. La nature comme mentor : Plutôt que de considérer la nature comme une ressource, nous la voyons comme un professeur dont nous pouvons apprendre. Cela signifie qu'il faut respecter la sagesse et l'expérience de la nature et s'inspirer de ses façons d'innover.

Avec la publication de son livre, la notion de biomimétisme est devenue une notion fréquemment référencée dans d'autres domaines que la science. Aujourd'hui, des experts dans une grande variété de domaines travaillent sur le biomimétisme en

---

<sup>3</sup> L'entreprise qui a été fondée en 1998 par Janine Banyus. Elle propose des services de certification basés sur les principes de conception de la nature et offre aux entreprises des solutions innovantes grâce au biomimétisme.

se basant sur son livre, et celui-ci a été un catalyseur pour le développement progressif et substantiel du domaine.

Rédigé du point de vue d'un biologiste, le livre de Benyus s'attache à présenter les diverses applications potentielles de la technologie du biomimétisme. Il présente toutefois une limite, à savoir qu'il ne propose pas de solutions techniques spécifiques dans chaque domaine.

En architecture, la plupart des projets sont encore en phase de recherche, mais quelques bâtiments ont été construits selon les principes du biomimétisme et ont montré des signes prometteurs de fonctionnalité.

Ces bâtiments ont apporté des améliorations significatives en termes d'efficacité énergétique et de caractéristiques de conception, et ont contribué à des changements économiques, paradigmatiques et technologiques dans l'industrie de la construction. Cependant, ces avancées soulèvent également d'importantes questions quant à la possibilité de réaliser adéquatement la notion d'architecture biomimétique avec la technologie d'aujourd'hui. Cette question met en évidence les différents défis techniques et économiques inhérents à la réalisation d'un bâtiment biomimétique, et constitue une question clé qui orientera les recherches futures dans ce domaine.

Grâce à ses écrits, le mot et la notion de biomimétisme ont été largement reconnus et ont servi de catalyseur au biomimétisme contemporain pour explorer différentes directions. Mais comment ce catalyseur a-t-il influencé l'architecture ?

## I. Aperçu de l'approche

---

« *L'architecte du futur construira en imitant la nature, parce que c'est la plus rationnelle, durable et économique des méthodes* ».

*Antoni Gaudi*

---

<sup>4</sup> L'architecture est présentée comme l'une des applications efficaces qui peut croiser un large éventail de sujets, et de nouvelles activités de conception architecturale qui peuvent tirer parti du biomimétisme actuel sont rapportées. En effet, les espèces animales et végétales savent s'adapter à leur environnement et au changement en mettant en œuvre des stratégies qui permettent de créer des écosystèmes durables. Il s'agit d'une variation naturelle dans le processus d'évolution. Les avancées technologiques en matière d'observation à très petite échelle nous permettent d'acquérir des connaissances sur le fonctionnement de la nature et fournissent de nouvelles connaissances et inspirations pour l'architecture.

Certes, l'architecture s'est inspirée de la nature, c'est indéniable, et à l'avenir nous continuerons à créer par imitation.

Patricia Ricard, directrice de l'Institut océanographique Paul-Ricard, porte un regard multiple sur l'état du biomimétisme. Pour elle, le biomimétisme est une réponse aux problématiques architecturales. Il peut notamment se décliner en trois disciplines : la forme, la structure et les matériaux. En particulier, la forme peut s'inspirer explicitement et visuellement.

<sup>5</sup> Les pratiques architecturales biomimétiques génèrent de nouvelles formes fonctionnellement efficaces et uniques en termes de qualité esthétique, mais ne tiennent pas compte des principes de la nature ou du développement durable. Certes, en termes de qualité esthétique, le biomimétisme peut représenter un

---

<sup>4</sup> Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement, Patricia Ricard, 2015

<sup>5</sup> Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils, Natasha Chayaamor-Heil, François Guéna, 2018

changement remarquable dans l'architecture. Cependant, le biomimétisme ne doit pas être considéré comme un concept étroit limité à la qualité esthétique. Dans ce cas, la « bio-morphologie » pourrait être un concept plus proche que le biomimétisme.

## II. Approche biomimétisme

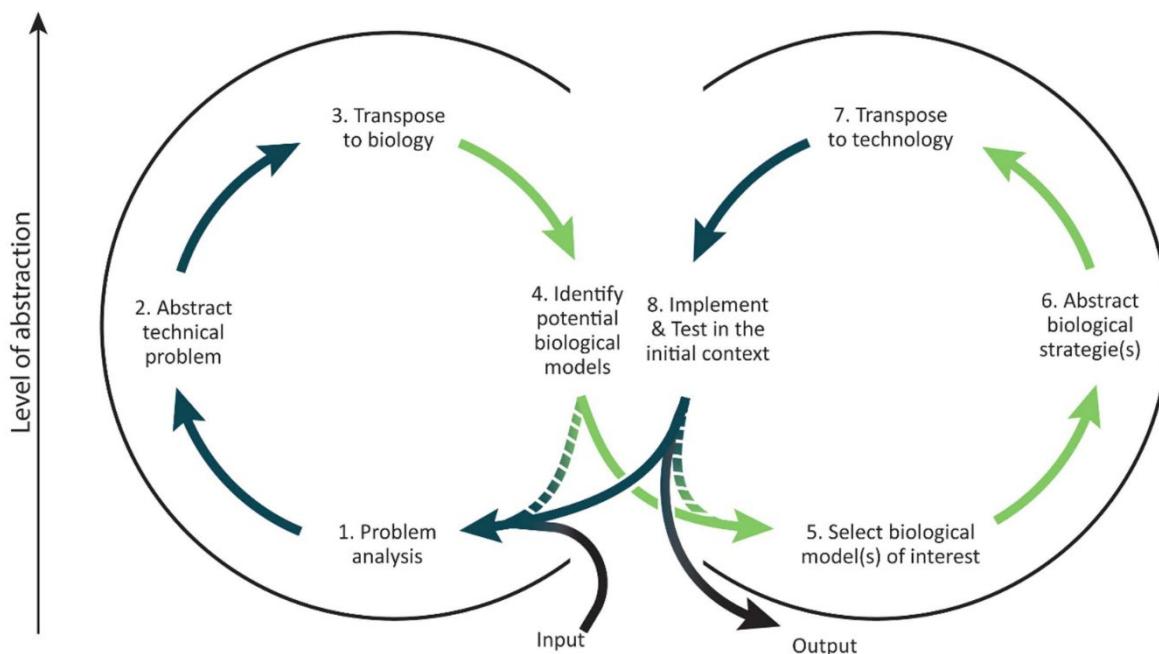


Figure 3 \_ Le processus biomimétique unifié piloté par les problèmes, Fayemi

Le processus de biomimétisme suit deux approches : l'une est initiée par des découvertes biologiques et l'autre utilise le biomimétisme comme processus de résolution de problèmes.<sup>6</sup> En fait, comme toutes les théories de conception innovante, le biomimétisme avait besoin d'un cadre méthodologique pour traduire des idées théoriques d'inspiration biologique en réalités très complexes (Figure 3).

- I. Première approche : répondre à un besoin humain ou à un problème de conception, puis étudier comment les organismes ou les écosystèmes naturels le résolvent. Il s'agit d'une approche orientée vers le problème (de la conception à la biologie), qui identifie les objectifs initiaux et les

<sup>6</sup> Comité technique : ISO/TC 266 Biomimétique. ISO/TC266 18458:2015 : Biomimétique - Terminologie, concepts et méthodologie ; ISO : Genève, Suisse, 2015.

paramètres de conception, puis recherche des solutions dans les systèmes végétaux ou animaux.

- II. Deuxième approche : l'idée consiste à identifier une caractéristique, un comportement ou une fonction spécifique d'un organisme ou d'un écosystème, puis à étudier le problème de conception qu'il pourrait résoudre. Il s'agit d'une approche orientée vers la solution (la biologie informe la conception). Elle consiste à utiliser les connaissances en biologie pour informer la conception humaine. Elle est menée par des personnes ayant des connaissances scientifiques sur la nature, qui recherchent des applications possibles utiles pour la conception.

<sup>7</sup>La recherche de ces processus biomimétiques a rapidement fait apparaître le besoin de nouveaux outils. En effet, le manque de connaissances biologiques a rendu les ingénieurs inactifs dans ce processus : par exemple, le problème de la façon de trouver, d'extraire et de transférer des modèles biologiques.

<sup>8</sup>Par exemple, le programme SAPPhIRE (State, Action, Part, Phenomenon, Input, oRgan, Effect) ou BIOTRIZ a été critiqué pour son efficacité à aider les ingénieurs à se familiariser avec les notions et découvertes biologiques, mais pas du point de vue des biologistes. Pour cette raison, il n'est pas surprenant qu'il y ait un fossé entre les perspectives de la biologie et de l'ingénierie.

---

<sup>7</sup> Wanieck, K. ; Fayemi, P.-E. ; Maranzana, N. ; Zollfrank, C. ; Jacobs, S.R. Biomimetics and its tools Bioinspir. Biomim. Nanobiomater. 2017

<sup>8</sup> Chakrabarti, A. ; Sarkar, P. ; Leelavathamma, B. ; Nataraju, B.S. A functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas Artif. Intell. Eng. Des. Anal. Manuf. AIEDAM 2005, 19

### III. Des obstacles réalistes

<sup>9</sup>La déconnexion entre ces deux domaines (biologie et ingénierie) constitue un obstacle aux approches biomimétiques. <sup>10</sup>En fait, les obstacles pratiques peuvent être grossièrement divisés en trois catégories.

1. Le premier obstacle : La découverbarilité des modèles biologiques. Cela correspond à sa capacité de l'équipe à trouver un modèle biologique qui corresponde au problème technique résumé à l'étape 4 du processus de référence mentionné ci-dessus (figure 3). Cette difficulté est due à un certain nombre de facteurs, car l'équipe de conception doit déterminer ce qu'il faut chercher, où le chercher et comment le chercher.
2. Deuxième obstacle : La difficulté pour l'équipe de conception à déterminer la pertinence du modèle. La cognition, qui est principalement associée à l'étape 5 du processus, est également un facteur clé de l'étape 4 du processus.
3. Troisième obstacle : la question la plus transversale est celle de l'intelligibilité des données biologiques. Il s'agit de la capacité de l'équipe à interpréter les données biologiques en informations cohérentes. Cet aspect a un impact important lors de l'abstraction des données biologiques à l'étape 6, mais il semble fondamental pour toutes les étapes axées sur la biologie. Sans connaissance de la biologie, il peut être très difficile d'identifier les informations, les sites web, les mots-clés ou les demandes pertinents. Sans une compréhension claire des données fournies, les choix effectués au cours de la phase de recherche et de sélection peuvent être basés sur des critères non pertinents, des stéréotypes ou simplement un

---

<sup>9</sup> Vattam, S.S.; Goel, A.K. Seeking bioinspiration online: A descriptive account. In Proceedings of the International Conference on Engineering Design, Seoul, Corée du Sud, 19-22 August 2013.

<sup>10</sup> Pratiques et champs biologiques, pièces manquantes du puzzle méthodologique de la biomimétique, Eliot Graeff, Nicolas Maranzana, 2020

« bon sentiment », ce qui peut conduire l'équipe à commettre des erreurs au cours du processus de conception.

#### IV. Approche à trois niveaux du biomimétisme

En général, le biomimétisme peut être grossièrement classé selon trois classifications. Il s'agit d'une classification générale utilisée dans toutes les analyses de biomimétisme, y compris en architecture. Sur cette base, les projets sont systématiquement classés et analysés en fonction de l'échelle et de la complexité du modèle biologique choisi. Cette approche permet de structurer et d'orienter clairement le processus de recherche et de développement et fournit un indicateur approximatif pour déterminer la portée d'un projet de biomimétisme (Figure 4).

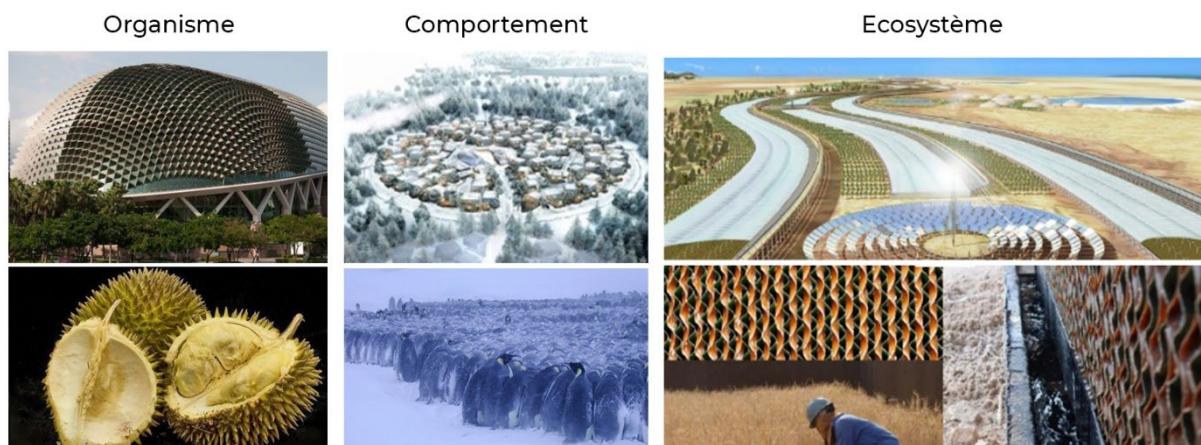


Figure 4 \_ Similitude de l'imitation constatée entre le modèle biologique et le projet d'architecture à chaque niveau du biomimétisme

- Niveau de l'organisme : une stratégie d'imitation qui se concentre sur la structure ou la fonction spécifique d'un organisme individuel. Par exemple, la conception d'un panneau solaire qui imite la structure d'une feuille de plante ou la conception d'un maillot de bain qui utilise les propriétés de la peau de requin (Figure 4).
- Niveau comportemental : imite les schémas comportementaux ou les stratégies d'adaptation d'un organisme. Les exemples incluent l'application des algorithmes de recherche d'itinéraires efficaces des colonies de fourmis aux systèmes de transport urbain, ou l'utilisation des schémas de vol des

oiseaux migrateurs pour concevoir des avions économies en énergie (Figure 4).

- Niveau de l'écosystème : concevoir des systèmes complexes en tenant compte des interactions et des équilibres d'un écosystème entier. Il peut s'agir de construire un système de gestion des déchets qui imite les cycles des écosystèmes naturels, ou de planifier une ville qui imite la diversité et la résilience d'un écosystème de récifs coralliens (Figure 4).

## V. Exemples d'architecture biomimétisme



Figure 6 \_ Pavillon de filaments Elytra, ICD-ITKE Université de Stuttgart, 2016

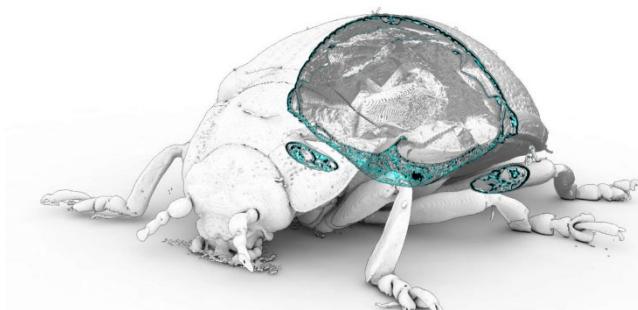


Figure 5 \_ Structures fibreuses des ailes antérieures des coléoptères volants, appelées élytres

Le « Elytra Filament Pavilion » de l'université de Stuttgart, en Allemagne, est un pavillon qui répond à ce besoin : il s'inspire de la structure fibreuse du coléoptère Elytra et possède des propriétés biomimétiques (Figure 6). La structure est à la fois robuste

et légère (Figure 7) : elle pèse environ 9 kg/m<sup>2</sup>, ce qui correspond à une surface totale de 200 m<sup>2</sup> et à un poids d'environ 2,5 tonnes (le bois nécessiterait 5 tonnes, le béton 24 tonnes et la brique 18 tonnes).

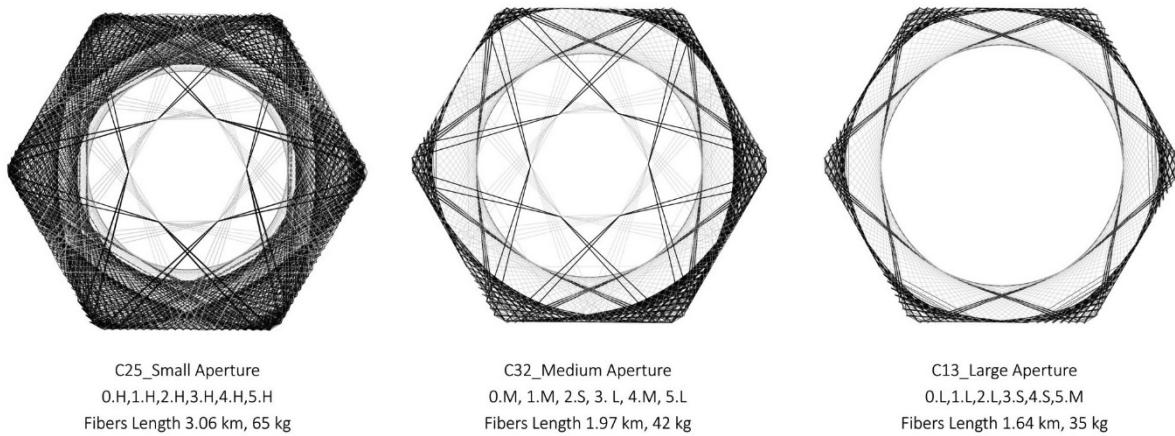


Figure 7 \_ Éléments de construction différenciés en fibres composites, l'université de Stuttgart

Achim Menges, professeur et architecte à l'université de Stuttgart, a mis au point, grâce à la conception assistée par ordinateur, une technique de fabrication robotisée appelée « méthode d'enroulement », qui permet d'extraire les fibres de carbone des matériaux composites. Il est ainsi possible d'utiliser ces matériaux pour produire localement et augmenter la production au fil du temps.

#### (A avancer plus)



Figure 8 \_ Pavillon de l'Allemagne, Frei Otto, 1967

Le « Pavillon allemand, 1967 » (Figure 8) de Frei Otto en est un deuxième exemple : inspiré par l'élasticité et la structure d'une toile d'araignée, le bâtiment est constitué de câbles fins et d'une membrane en tissu de polyester qui recouvre l'espace entre eux. La conception tire parti des propriétés des toiles d'araignée en les remplaçant par des mailles métalliques. Celles-ci présentent l'avantage d'être facilement construites sans avoir besoin d'un cadre de soutien, comme le ferait une toile d'araignée, et les mailles sont préassemblées mécaniquement à intervalles réguliers pour être montées sur place, ce qui les rend faciles à assembler et à transporter.

En imitant ou en transformant les formes complexes de la nature et en les appliquant aux bâtiments, il est possible d'améliorer à la fois la fonctionnalité et la valeur esthétique d'une structure. L'œuvre d'Otto, en revanche, n'a pas été inspirée par le biomimétisme, mais plutôt par la découverte aventureuse de la forme parallèlement aux expériences d'ingénierie de l'époque. Elle a finalement été conçue pour démontrer la force de son point de vue d'ingénieur, qui constitue sa limite. Cependant, le processus qu'il démontre conduit certainement à des idées proches du biomimétisme.

Dans l'ère contemporaine, ces expériences de biomimétisme se sont étendues à des domaines plus variés de l'architecture, et un intérêt croissant s'est manifesté pour l'émergence des outils nécessaires à ces expériences, dont l'un a été la réalisation du biomimétisme avec des outils paramétriques. La section suivante, « Paramétrisme », donne un aperçu du paramétrisme et un bref historique de ses mécanismes, et fournit en particulier des informations plus détaillées sur « Grasshopper », une plateforme algorithmique basée sur une interface utilisateur graphique (GUI).

## B. Paramétrisme

<sup>11</sup> Le paramétrisme est un terme créé au début des années 1990 comme un mouvement de design d'avant-garde fondé sur la théorie. Les premiers praticiens tels que Reg Lynn, Jesse Reiser, Lars Spuybroek, Kas Oosterhuis et bien d'autres ont utilisé et adapté les nouveaux logiciels d'animation numérique de l'époque et d'autres processus informatiques avancés. Bien que ces technologies aient été introduites dans l'architecture plus tôt par des pionniers tels que John Frazer et Paul Coates, ce n'est qu'au cours des 10 à 15 dernières années qu'elles ont commencé à influencer le domaine de l'architecture d'avant-garde.

Patrik Schumacher, directeur de Zaha Hadid Architects, estime que le travail de Frei Otto (1925-2015) a été un précurseur du paramétrisme : « Plutôt que de dessiner des formes, il les a « découvertes », en utilisant des processus physiques comme moteurs de simulation et de conception. La légitimité de ces processus physiques a créé une combinaison de complexité, de rigueur et d'élégance qui ne pouvait être obtenue daucune autre manière. La puissance et la beauté de cette approche étaient très impressionnantes. »



Figure 9 \_ Musée Guggenheim Bilbao (1997)

Patrik Schumacher évoque le rôle de la conception paramétrique dans la recherche architecturale <sup>12</sup>. Il souligne ainsi le potentiel de la conception paramétrique à révolutionner la pratique et l'esthétique architecturales.

La notion à laquelle il se réfère peut être considérée comme

<sup>11</sup> Paramétrage, 建築百科事典, 2021

<sup>12</sup> Un nouveau style mondial, Patrik Schumacher, 2008

une extension du déconstructionnisme en architecture. Au début de l'année 1991, le musée Guggenheim de Bilbao (Figure 9), conçu par Frank Gehry, était un symbole de l'architecture déconstructionniste. Il symbolise le lien entre l'orientation postmoderne et l'architecture contemporaine. Il peut être considéré comme une architecture paramétrique qui prend en compte le contexte culturel, environnemental et régional, plutôt que comme une simple variation formelle.

La conception paramétrique implique l'utilisation d'algorithmes et de paramètres mathématiques pour générer et manipuler des formes architecturales. Schumacher affirme que ce type de conception permet de créer des structures plus complexes et adaptables qui transcendent les contraintes géométriques traditionnelles. En substance, l'utilisation de la conception paramétrique implique de considérer la conception d'une manière différente des méthodes classiques traditionnelles, en utilisant des calculs mathématiques ou les propriétés des composants pour décomposer des formes plus complexes, avec des différences notables en fonction de l'application.

Selon Patrik Schumacher, l'un des principaux aspects de la conception paramétrique est la capacité d'intégrer de multiples considérations de conception. Grâce aux outils de modélisation paramétrique, les architectes peuvent optimiser simultanément les conceptions sur la base de critères multiples afin de trouver des solutions plus efficaces.

Sur cette base, Robert Woodbury explique les principes de la conception paramétrique et son fonctionnement. Comme indiqué précédemment, la modélisation paramétrique présente une différence significative par rapport à la modélisation classique (modélisation par subdivision). Par conséquent, une approche différente est nécessaire lors de l'utilisation d'outils paramétriques. Cette approche est la suivante :

1. La première étape consiste à identifier les paramètres qui définiront votre projet : dimensions géométriques, propriétés des matériaux, conditions environnementales, etc. Dans une conception architecturale, les

paramètres peuvent être la hauteur du bâtiment, la surface au sol, l'orientation, etc.

2. Relations entre les paramètres : une fois les paramètres identifiés, il convient d'établir leurs relations. Il s'agit de définir comment la modification d'un paramètre affecte les autres paramètres ou la conception dans son ensemble. Ces relations peuvent être exprimées sous forme d'équations mathématiques ou d'algorithmes. Par exemple, dans la conception d'un bâtiment, la modification du paramètre de la surface au sol peut automatiquement ajuster la hauteur pour maintenir une certaine proportion.
3. Exploration de la conception : après avoir défini les paramètres et leurs relations, les concepteurs peuvent explorer différentes possibilités de conception en modifiant les paramètres dans des fourchettes spécifiées. Cela peut se faire manuellement en ajustant les valeurs des paramètres, ou le processus d'exploration peut être automatisé à l'aide de méthodes informatiques.
4. Évaluation et optimisation : au fur et à mesure que les différentes alternatives de conception sont générées, leur pertinence est remise en question sur la base de divers critères tels que la performance, l'esthétique et le coût. Sur la base de ces critères, des techniques d'optimisation peuvent être appliquées pour trouver la solution de conception optimale. Par exemple, dans la conception structurelle, des méthodes paramétriques peuvent être utilisées pour optimiser la répartition des matériaux des composants afin de minimiser le poids tout en maintenant l'intégrité structurelle.
5. Itération et perfectionnement : Le processus de conception implique généralement plusieurs itérations afin d'améliorer la conception sur la base du retour d'information et de l'analyse. Vous pouvez ajuster de manière itérative les paramètres et les relations entre les paramètres afin d'améliorer votre solution de conception.

Globalement, les méthodes paramétriques constituent une approche systématique de l'exploration et de l'optimisation de la conception. Elles permettent à un concepteur ou à un architecte de générer et d'évaluer efficacement différentes alternatives de conception. La méthode souligne l'importance de la définition des paramètres et de leurs relations pour faciliter l'exploration de l'espace.

Patrik Schumacher suggère également que la conception paramétrique peut favoriser une relation plus dynamique entre l'architecture et son contexte. Au lieu de considérer les bâtiments comme des objets statiques, il affirme que les structures conçues de manière paramétrique peuvent s'adapter en ajustant leur forme et leur fonction selon l'évolution de l'environnement. Cela permet non seulement d'améliorer l'expérience de l'utilisateur, mais aussi de contribuer à une intégration plus étroite du bâtiment et de ses conditions.

Il souligne également l'importance de la paramétrisation dans l'architecture contemporaine et son évolution au fil du temps, avec une utilisation et une application croissante dans divers domaines. Dans ce contexte diversifié, l'architecture biomimétisme ne peut se passer de l'aide des outils paramétriques. L'imitation des systèmes naturels met également en évidence les caractéristiques de la paramétrique, telles que le calcul mathématique et la visualisation des processus du système.

---

## I. Outils paramétriques

Cette section poursuit la description des différents outils paramétriques par une présentation des outils paramétriques universels actuellement utilisés en architecture. Cela montrera quels sont les outils universellement utilisés par les étudiants et les praticiens, et prouvera également que l'outil paramétrique universellement utilisé dans la partie « État de l'éducation » et la partie « Expériences » est « Grasshopper ».

La conception paramétrique est un processus de construction d'un « système ouvert » dans lequel le résultat de la conception change en fonction des modifications des paramètres, des données et de la structure logique.<sup>13</sup> Les principaux outils utilisés sont des langages de programmation tels que Python, C# et Java, ou des plateformes algorithmiques basées sur une interface utilisateur graphique (GUI) telles que Grasshopper, Visual Programming Language and Environment, Dynamo et Generative Components.



Generative Components  
(Stand-alone)



Grasshopper  
(RHINO3D)



Dynamo  
(REVIT)



Digital project  
(CATIA)

Figure 10 \_ Outils paramétriques souvent utilisés

Les programmes paramétriques sont utilisés à des fins et dans des disciplines différentes, en fonction des caractéristiques de chaque outil et du principal programme associé (Figure 10). Mais, dans l'architecture contemporaine, une utilisation partielle des langages de programmation, Grasshopper est principalement privilégiée pour les raisons suivantes.

Tout d'abord, Grasshopper est un plugin gratuit pour Rhino3D, l'outil de conception le plus utilisé dans les domaines du paysage et de l'architecture contemporains. Rhino3D est devenu le logiciel de conception tridimensionnelle le plus populaire grâce à son interface et ses commandes, assez similaires à celles d'AutoCAD, ainsi qu'à sa capacité à travailler avec des figures précises, à dessiner facilement et à faciliter la conception atypique.<sup>14</sup> Bien que Rhino3D soit basé sur les NURBS et

---

<sup>13</sup> Analyse de cas et examen de l'applicabilité de la conception paramétrique dans la conception architecturale du paysage, Sungjin Na, 2021

<sup>14</sup> Overseas-parametric design III, Korean Architects Journal, Sung, W, 2015

présente une bonne synergie avec la modélisation paramétrique, il manquait initialement de capacités paramétriques par rapport à d'autres logiciels tels que 3ds MAX, Maya et Catia. Pour compenser ce manque, un plug-in appelé « Explicit History » a été développé, qui a ensuite été renommé « Grasshopper » et qui a été largement utilisé par un large éventail d'utilisateurs. Il s'est développé à pas de géant depuis 2008.

Le Dynamo, comparé à d'autres logiciels majeurs, est un programme paramétrique basé sur Autodesk et est souvent utilisé en conjonction avec Revit, Maya et Civil 3D de la même société. Dans la phase de conception, Rhino3D est encore très utilisé, Grasshopper étant l'outil de conception préféré, tandis que Dynamo tend à être utilisé en conjonction avec Revit pendant les phases de conception détaillée et de construction.

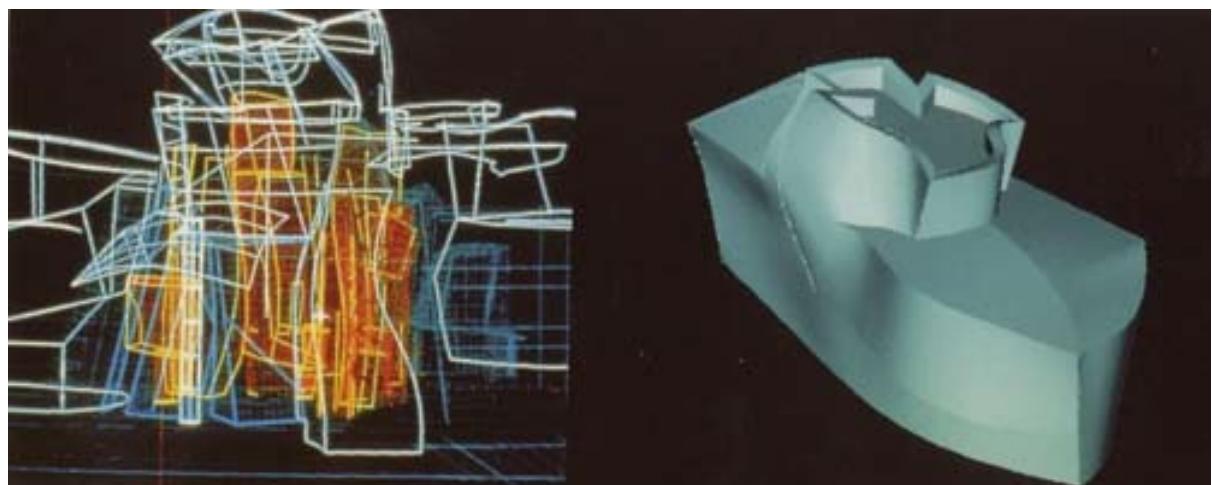


Figure 11 \_ Musée Guggenheim Bilbao, logiciel « Catia »

En outre, « Digital Project » est un logiciel paramétrique basé sur « Catia », célèbre pour la modélisation architecturale de Frank Gehry (Figure 11), mais en raison de sa licence coûteuse et de sa faible base d'utilisateurs dans le domaine de l'architecture, il n'est pas aussi universel que Grasshopper ou Dynamo et est utilisé moins fréquemment.

Deuxièmement, Grasshopper est un outil de conception plus efficace. Contrairement à la programmation générale, où les algorithmes sont élaborés au fil du temps, la conception de paysages et d'architectures implique souvent des

« scripts » variables en fonction du type de projet ou de média utilisé. Par conséquent, l'approche de Grasshopper, qui consiste à construire des réseaux de conception visuelle en connectant des composants sur la base de commandes graphiques, est plus efficace en tant qu'outil de conception que les programmes basés sur le langage, qui nécessitent une saisie directe du langage informatique et l'écriture de nouveaux algorithmes à chaque fois.<sup>15</sup> En outre, ces logiciels paramétriques graphiques proposent des interfaces relativement faciles à prendre en main et ne nécessitent pas d'expertise en programmation,<sup>16</sup> de sorte qu'ils ne soient pas trop difficiles à prendre en main pour un architecte paysagiste ou moyen. Par conséquent, les logiciels paramétriques graphiques tels que Grasshopper, Dynamo et Generative Components ont contribué à abaisser les barrières à l'entrée de la conception algorithmique dans la communauté architecturale et ont su s'imposer comme le principal moyen de conception par rapport à d'autres plateformes.

Tableau 1 \_ Comparaison de logiciels de conception paramétrique

Logiciel paramétrique	Plate-forme CAO	Scripting	Multi-usage	Compatibilité	Prix	Total
Sauterelle	Rhino3D	Base graphique	Bon	Bon	Gratuit	Bon
Dynamo	Revit, Maya	Base graphique	Moyenne	Bon	Gratuit	Bon
Composants génératifs	Autonome	Base graphique	Bon	Moyenne	Gratuit	Moyenne
3Ds Max	Autonome	Base de piles	Bon	Moyenne	Cher	Moyenne
Solid Works	Autonome	Histoire associative	Moyenne	Bon	Cher	Moyenne
Projet numérique	Catia	Histoire associative	Bon	Moyenne	Cher	Mauvais

Source: Case Analysis and Applicability Review of Parametric Design in Landscape Architectural Design, Sungjin Na, 2021

<sup>15</sup> (2017b) Les mathématiques s'élèvent : What matters in the education of the design computing. Architectes coréens, Kim, S, 2017

<sup>16</sup> Codify : Parametric and Computational Design in Landscape Architecture, Bradley Cantrell et Adam Mekies, 2018

Troisièmement, il s'avère très extensible dans toutes les disciplines de conception. Comme indiqué précédemment, Grasshopper est basé sur Rhino3D, un outil de conception populaire, et il peut être librement connecté à une multitude d'autres logiciels, y compris des langages de programmation informatique, des plugins open source et des SIG. Cette extensibilité a conduit au développement de nouveaux plugins qui s'exécutent sur Grasshopper. Ceux-ci permettent désormais de saisir un large éventail de données, y compris des sources locales et en ligne et des informations provenant de capteurs, afin de créer des réseaux de conception ciblés pour répondre à une variété de problèmes dans les villes contemporaines<sup>14</sup>. Si l'on compare Grasshopper à d'autres logiciels paramétriques tels que Generative components, 3ds Max, Solid Works, Digital Project et d'autres, on constate que Grasshopper est supérieur en termes de polyvalence, de compatibilité et de prix (Tableau 11 ).

La conception paramétrique, telle que décrite ci-dessus, est une méthodologie de conception dans la conception computationnelle contemporaine qui utilise divers programmes informatiques pour trouver des solutions rationnelles et constructives basées sur des paramètres et des algorithmes. Le logiciel utilisé varie en fonction de l'étape de conception, de l'objectif et de la plate-forme de programmation principale, mais dans le processus de conception, nous utilisons principalement Grasshopper, qui est très efficace et universellement utilisé, et nous connectons divers plug-ins selon les besoins.

## II. Mécanismes de l'outil paramétrique, « Grasshopper »

<sup>17</sup>Comme indiqué précédemment, Grasshopper est un plug-in qui fonctionne sur Rhino 3D, un logiciel de modélisation 3D basé sur la méthode NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline). Il s'agit d'un outil et d'un environnement de

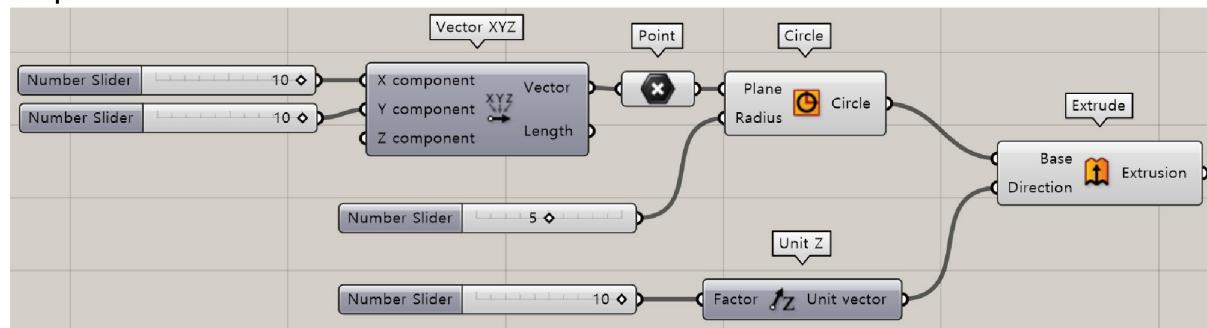
---

<sup>17</sup> La modélisation NURBS permet de créer des modèles de formes curvilignes, qui sont composés de points, de lignes et de faces avec des valeurs calculées, et de les visualiser.

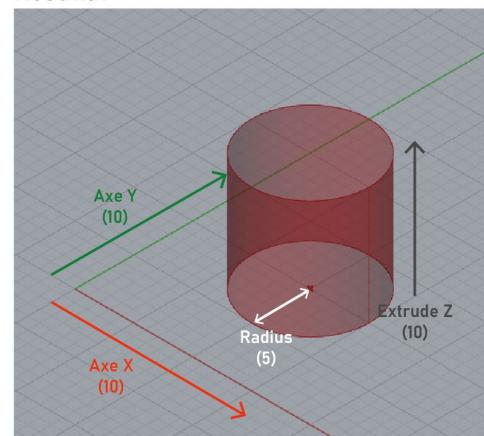
développement qui permet de mettre au point des extensions supplémentaires pour Rhino 3D.

Une définition Grasshopper se compose de boîtes, appelées composants, et de fils, qui sont les lignes qui les relient. Un composant est une sorte de sous-fonction qui effectue une opération spécifique, tandis qu'un fil représente le flux de matériel entre les composants. Les données circulent de gauche à droite à travers les fils, et un composant reçoit des données des fils connectés aux terminaux de gauche et effectue une opération spécifique, puis envoie les données résultantes aux fils connectés aux terminaux de droite (Figure 12).

### Script



### Résultat



**Vector XYZ :** Ce composant définit les coordonnées XYZ par rapport à une position existante dans Rhino3D (0,0,0) pour définir le centre de la position du cylindre à créer.

**Circle :** Il crée un cercle basé sur le point créé et définit un paramètre pour le rayon du cercle afin de définir la taille du cylindre.

**Extrude :** En fonction de la forme créée, ce composant envoie des commandes d'extrusion sur les axes X, Y et Z. Il met également en place un composant directionnel pour lui indiquer la partie à extruder.

Figure 12 \_ Les mécanismes de base de Grasshopper

Alors que les langages de programmation textuels ordonnent les opérations de manière séquentielle ou en fonction du flux de contrôle, Grasshopper ordonne les

opérations en fonction du flux de données.<sup>18</sup>Ce paradigme de programmation est appelé « paradigme de flux de données » et la plupart des langages de programmation visuels, y compris Grasshopper, sont basés sur le « paradigme de flux de données », à l'instar du langage de programmation visuel de Microsoft (MVPL).

Dans la conception paramétrique, il est important d'utiliser correctement les variables déclarées et d'en expliquer la signification à l'utilisateur. Par conséquent, le respect de la conception paramétrique est l'une des exigences d'une bonne définition de Grasshopper.<sup>19</sup> Lorsque l'on travaille avec des objets de forme arbitraire en utilisant des techniques de modélisation paramétrique, la manière dont on définit les variables et les contraintes que l'on impose à celles-ci est importante pour les opérations variables ultérieures. En d'autres termes, la conception paramétrique signifie que lorsque la valeur d'un paramètre change dans les limites des contraintes qu'on a fixées, l'objet adapte la valeur du paramètre tout en maintenant les contraintes. Les notions les plus fondamentales de la modélisation paramétrique sont la clarté, l'efficacité, l'entrée, la sortie et la finitude dans le processus de résolution du problème, ainsi que l'exécution de chaque étape de l'opération d'une manière qu'un ordinateur peut comprendre<sup>13</sup>.

## C. État de l'éducation

Comme mentionné dans « l'Introduction », le biomimétisme n'est pas encore très présent dans l'architecture, c'est pourquoi de nombreux chercheurs, même d'un point de vue éducatif, visent à former les architectes aux concepts du biomimétisme.

---

<sup>18</sup>Advances in Dataflow Programming Lan - guages, ACM Computing Surveys, Johnston, W.M., Hanna, J.R.P. et Millar, R.J., 2004.

<sup>19</sup> Techniques de modélisation paramétrique dans le cadre de BIM (Building Information Modelling), Seungmin Jeon, 2013

Alawad, A. et Mahgoub, Y., architectes, ont étudié l'impact de l'enseignement du biomimétisme comme outil d'amélioration des capacités de réflexion des étudiants dans l'enseignement artistique. Ils ont étudié 30 étudiants de troisième année à l'université de Khartoum en 2012/2013. Leurs recherches montrent que le biomimétisme présente un certain nombre d'avantages majeurs. Il mentionne qu'il « fournit un développement spirituel en offrant des opportunités de médiation et d'appréciation de la création de Dieu.<sup>20</sup> Il éveille la conscience de la nature chez les étudiants, leur faisant réaliser que tout dans la nature a un but et une fonction ». Compte tenu de ses commentaires, il est possible qu'il s'agisse moins de l'application d'aspects fonctionnels que d'un soin et d'un respect plus profonds de la nature.

<sup>21</sup>Tavsan, S. et Tavsan, F. ont étudié la conception et la nature dans le cadre de l'enseignement de la conception architecturale. Ils ont proposé un cours de conception architecturale aux étudiants de deuxième année de l'université technique de Karadeniz en Turquie, dans le cadre du concept de biomimétisme. Ils ont souligné que l'analogie suscite l'intérêt et l'émerveillement, et augmente la motivation. Les étudiants ont développé des compétences analytiques et ont appris que de nombreux problèmes peuvent trouver des solutions dans la nature.

<sup>22</sup> Pankina, M. et Zakharova, S. de l'Université nationale russe d'enseignement professionnel ont noté que les principes du biomimétisme nous aideront à concevoir plus intelligemment et à relier notre travail à l'environnement naturel. Ils ont également déclaré que la conception biomimétique deviendra de plus en plus populaire dans le domaine de l'architecture. Ils ont également affirmé que l'application des principes du biomimétisme et des stratégies d'adaptation des

---

<sup>20</sup> Approche biomimétiquedans l'enseignement de l'architecture : étude de cas du cours "Biomimicry in Architecture", Nihal Amer, 2019

<sup>21</sup> Le biomimétisme dans l'enseignement de la conception architecturale, C. Tavzan, F. Tavzan, E. Sonmez, 2015

<sup>22</sup> La nécessité d'une écologisation de l'enseignement de la conception

organismes naturels améliorera le comportement adaptatif des enveloppes des bâtiments.

L'une des similitudes de leurs méthodologies est l'évitement de la conception ou de l'architecture conventionnelle et classique des bâtiments.<sup>23</sup> Nihal Amer, architecte et ingénieur local égyptien, appelle cela le « syndrome du bâtiment malade » et préconise des conceptions plus humaines et plus proches des systèmes naturels.

Sa recherche a démontré une approche du biomimétisme utilisant des outils paramétriques (Grasshopper) en particulier. Le projet de l'étudiant portait sur un défi de conception majeur, inspiré par les fleurs pour la lumière naturelle dans l'enveloppe du bâtiment, et il a présenté une méthodologie utilisant Grasshopper comme solution pour générer ou itérer des formes complexes, ce qui a fonctionné conformément à ses attentes (Figure 13).

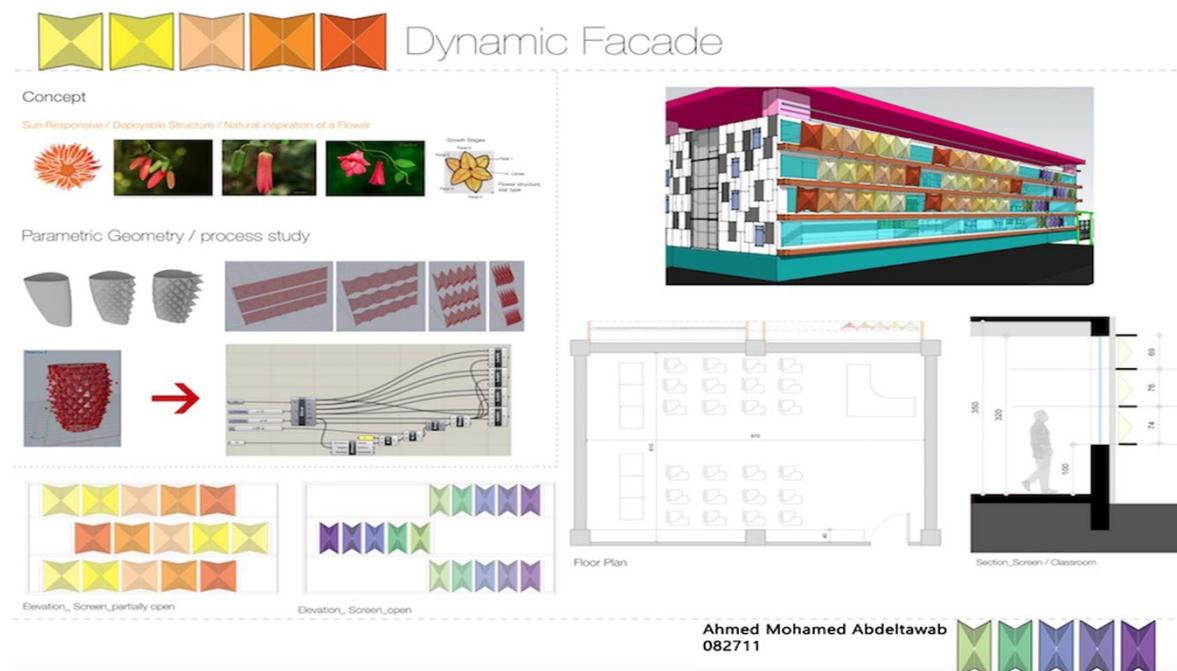


Figure 13 – Projet utilisant le modèle biologique dans la recherche de Nihal Amer

<sup>23</sup> Le syndrome des bâtiments malsains (SBS) est reconnu par l'Organisation mondiale de la santé comme un groupe de symptômes qui n'ont pas d'étiologie claire et qui sont causés par l'exposition aux variables du bâtiment (qualité de l'air intérieur, éclairage, bruit, effets psychologiques).

Ce qui est également remarquable dans cette étude, ce sont les résultats concernant l'intérêt des étudiants : à la fin du projet, ils ont choisi « Comment les plantes inspirent l'apparence » comme sujet le plus intéressant. Environ 50 % d'entre eux ont adopté et se sont concentrés sur l'approche de l'apparence et de la conception. Seulement 25 % d'entre eux se sont intéressés au processus d'imitation architecturale de leur système, ce qui met en évidence le fait que l'intérêt morphologique est plus visuellement ciblé pour les étudiants que l'analyse du système et l'imitation architecturale.

L'intégration du biomimétisme et de l'architecture peut fournir aux étudiants et aux chercheurs de nouvelles orientations pour les éléments biologiques. L'objectif est de populariser la notion de biomimétisme dans l'architecture et d'encourager les architectes qui y sont sensibles.

Il a également été discuté de la façon dont l'architecture biomimétique peut être réalisée à l'aide de Grasshopper, qui favorise la programmation visuelle et la conception générative. Cependant, Nihal Amer a noté le manque de sensibilisation à l'approche du biomimétisme et la difficulté de traiter avec Grasshopper. Par conséquent, le manque de maîtrise des outils paramétriques et le manque de sensibilisation au biomimétisme soulèvent ensemble des questions sur l'adéquation des deux notions lorsqu'elles sont fusionnées. Comme mentionné précédemment, dans la partie « Paramétrisme », il a été observé que Grasshopper est utilisé dans la plupart des cours.

Il n'a pas non plus précisé le pourcentage de projets d'étudiants qui mettaient fidèlement en œuvre le concept de biomimétisme. Il ressort clairement de l'enquête qu'environ 50 % des étudiants se sont concentrés sur une approche centrée sur l'apparence et la conception, et il est tout à fait possible que cela les ait conduits à une conformité pour laquelle un mot avec un préfixe bio autre que biomimétisme serait plus approprié. Par conséquent, il serait difficile de déterminer si les projets des étudiants utilisaient correctement les outils paramétriques avec une orientation biomimétisme.

---

## D. Lacunes dans notre compréhension du biomimétisme

### I. Manque de collaboration

La notion de biomimétisme et son évolution sont intrinsèquement liées au développement de la science et de la technologie contemporaines. Le terme « biomimétisme » est apparu au milieu du XXe siècle et désigne une approche innovante qui consiste à appliquer les solutions ingénieuses de la nature à la technologie et à la conception humaines. Dans les années 1960 et 1970, les tentatives d'application des principes naturels à la technologie et à la conception se sont multipliées, apportant un nouveau paradigme à la science et à l'industrie. Dans les années 1990, cette tendance s'est intensifiée et le biomimétisme est devenu une approche importante pour apporter des solutions dans divers domaines, notamment l'ingénierie, la médecine, l'architecture et les sciences de l'environnement.

Une analyse approfondie utilisant la méthode TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving), une approche russe de la résolution créative de problèmes, a révélé qu'il n'existe que 12 % de similitudes entre les principes de résolution de problèmes de la biologie et de la technologie. Ce résultat met en évidence les différences fondamentales entre les approches des deux domaines et souligne les complexités et les défis inhérents à la recherche en biomimétisme.

Le domaine technologique tend à résoudre les problèmes principalement par la manipulation de l'énergie et la transformation physique, alors que les systèmes biologiques privilégient l'utilisation de l'information et de la structure. Cette différence fondamentale n'a pas suffisamment été prise en compte dans le domaine technique et a été identifiée comme l'une des principales limitations des applications biomimétiques. Cette prise de conscience a considérablement modifié l'orientation de la recherche en biomimétisme.

Par conséquent, la mise en pratique des technologies du biomimétisme se heurte encore à des difficultés importantes. Ces limitations découlent principalement de

la complexité inhérente aux systèmes biologiques et de la difficulté de les reproduire techniquelement.

En outre, une grande quantité d'informations peut être perdue ou modifiée au cours de la conversion des solutions naturelles en technologies humaines. Pour libérer tout le potentiel des technologies biomimétiques, une recherche interdisciplinaire approfondie et une collaboration étroite sont essentielles. Cela signifie que des experts de diverses disciplines (biologistes, ingénieurs, concepteurs, spécialistes des matériaux, environnementalistes, etc...) doivent travailler ensemble pour explorer comment appliquer la sagesse de la nature à la technologie. Cette approche collaborative est reconnue comme un facteur clé pour ouvrir de nouvelles perspectives dans la recherche sur le biomimétisme.

## **II. Reconnaître les problèmes fondés sur des pratiques de biomimétisme inappropriées**

Nous devons reconnaître que le biomimétisme ne se limite pas à l'imitation des formes dans la nature, mais que celles-ci sont le résultat d'une adaptation technologique à l'environnement humain. La notion la plus fondamentale que nous pouvons avoir en reconnaissant cette notion est que les formes dans la nature sont fidèles à leur fonction, ce qui conduit au mécanisme de la forme. Il est très difficile de formuler la notion de biomimétisme sans comprendre les fonctions et les processus qui émergent de la forme.

Néanmoins, il existe actuellement de nombreux obstacles à la réalisation du biomimétisme dans une grande partie du monde. La plupart des documents ou articles présentent de nombreuses informations sur le biomimétisme. Cependant, certaines informations peuvent être trompeuses ou nous mener dans la mauvaise direction. Cela peut entraîner une grande confusion dans la compréhension du biomimétisme.

Parce que l'aspect design de l'utilisation de la notion de biomimétisme est fortement ressenti, de nombreux documents et articles mettent actuellement l'accent sur des processus de conception basés sur la forme. Il est vrai qu'il y a un

manque d'information sur les fonctions et les processus des modèles biologiques sélectionnés. Étant donné que les aspects morphologiques et esthétiques sont mis en avant, une compréhension précise de ces aspects est nécessaire pour pouvoir parler de leur adéquation avec l'architecture biomimétique. Comme mentionné dans la section « État de l'éducation », la mise en évidence de ce manque d'information par les recherches des étudiants peut éveiller leur intérêt pour la morphologie du biomimétisme.

## 4. Enonciation de la problématique

La corrélation entre le biomimétisme et les outils paramétriques est très profonde, et ces derniers sont fortement recommandés pour l'architecture biomimétique, car celle-ci présente une organicité dans la forme et le processus, comme nous avons pu le percevoir dans la partie « État de l'art ». Ce sont deux concepts très éloignés l'un de l'autre, mais nous observons de nombreuses possibilités d'échange entre les deux disciplines, qui se rapprochent de plus en plus au fil du temps.

Cependant, j'ai également constaté que la collaboration interdisciplinaire fait encore défaut. Il s'agit de la première étape de l'application du biomimétisme à l'architecture, mais c'est aussi la plus difficile : trouver des connexions entre les idées biologiques et les processus architecturaux prend du temps, et la sélection et la compréhension des modèles biologiques constituent également une priorité.

Du côté de l'éducation, de nombreuses expériences sont déjà accumulées : dans de nombreux établissements d'enseignement à travers le monde, le biomimétisme et l'architecture sont étudiés et enseignés comme une extension des notions que l'architecture peut embrasser. Cependant, là encore, la majorité des cours sur les projets architecturaux est dispensée dans les départements ou les écoles d'architecture, et l'on peut s'interroger sur le niveau de compréhension du biomimétisme parmi les étudiants de ces classes.

Ces différences dans le niveau de compréhension du biomimétisme affectent-elles l'utilisation d'outils paramétriques pour réaliser une architecture biomimétique ? Les outils paramétriques peuvent-ils fournir une compréhension adéquate pour les projets de biomimétisme des étudiants ? Si oui, dans quelles parties du projet voyons-nous une plus grande pénétration des outils paramétriques ?

Ces questions nécessitent une compréhension fondamentale du biomimétisme tout au long du projet. En outre, elles conduisent à se questionner sur la manière dont la fonctionnalité des modèles biologiques peut être réalisée et perfectionnée dans les projets. À cette fin, ce mémoire analyse le processus de compréhension

du biomimétisme dans les projets ainsi que le rôle joué par les outils paramétriques dans ce processus.

Dans le processus de réalisation en architecture, ces réflexions peuvent conduire à des questions telles que

**Puis-je démontrer la pertinence de l'utilisation d'outils paramétriques dans le processus de projet de biomimétisme au niveau de l'étudiant ?**

Si je peux répondre à cette question, je pourrai mieux justifier l'implication du paramètre dans les projets d'architecture biomimétique. Elle pourra également servir de base de référence pour identifier et combler les lacunes des programmes éducatifs sur le biomimétisme.

Dans la partie « Expériences » du mémoire, je m'intéresse aux étudiants qui ont participé à un projet d'architecture durant leur master à l'École nationale supérieure d'architecture de Paris-La Villette (ENSAPLV). Je répondrai à cette question en me basant sur leurs matériaux finaux et leurs travaux intermédiaires. Une explication plus détaillée sera fournie dans la partie suivante, la partie « Méthode ».

## 5. METHODE

### I. Orientations de la recherche

La recherche sera menée pour déterminer si les étudiants sont capables de comprendre et de mettre en pratique de manière adéquate la partie théorique. Elle pourra également s'avérer utile aux chercheurs qui explorent les possibilités offertes par la technologie du biomimétisme dans le domaine de la conception architecturale et des matériaux.

Dans cet article, l'approche du point de vue de l'ingénierie architecturale est limitée. Cependant, elle peut aider à combler le fossé entre la compréhension théorique de l'architecture biomimétique et sa mise en œuvre pratique. J'espère ainsi fournir des lignes directrices concrètes aux étudiants et aux chercheurs pour appliquer la théorie à des projets du monde réel.

Les outils de conception paramétrique, tels que Grasshopper, nous permettent de concevoir des formes complexes qui imitent les courbes et les motifs de la nature. Cependant, comme mentionné précédemment, malgré l'utilisation répandue de ces outils, l'application correcte des processus et des caractéristiques du biomimétisme nécessite une réflexion approfondie et une discussion avec un expert. Il est important que les étudiants en architecture comprennent parfaitement les notions théoriques du biomimétisme et sachent les appliquer efficacement. Cette étude vise à combler les lacunes de la recherche sur la capacité des étudiants à réaliser des projets de biomimétisme appropriés.

Cette section présente un aperçu stratégique de l'orientation de la partie « Expériences » de l'étude. Après une brève description de chaque composante, les sections suivantes approfondissent l'étude sur la base de données plus détaillées. Cette vue d'ensemble a pour but de vous donner une vision globale du cadre de la recherche et de vous fournir les bases pour comprendre des sujets spécifiques.

Les informations détaillées omises ici seront principalement développées dans la section « Expériences », qui contient une discussion approfondie des procédures

expérimentales, des résultats et des analyses. Cette structure a pour but de clarifier le processus de recherche et de souligner les points clés de chaque étape. Je la divise en deux parties : « Paramétrisme » et « Biomimétisme ».

## II. 6 étapes pour les expériences

### 1. Classification initiale et détails des projets étudiants à l'ENSAPLV

Dans cette première étape, je vais catégoriser chaque projet. Au total, 37 projets ont été sélectionnés, chacun intégrant des idées de biomimétisme et utilisant au moins une fois l'outil paramétrique Grasshopper. Ils ont été réalisés en première et deuxième année de master à l'ENSAPLV entre 2018 et 2024.

Les projets qui n'utilisaient pas d'outil paramétrique (Grasshopper) ou qui n'adoptaient pas d'idées biomimétiques ont été exclus. En excluant les projets qui n'incluent pas ces deux notions simultanément, je peux analyser correctement le paramétrisme et le biomimétisme.

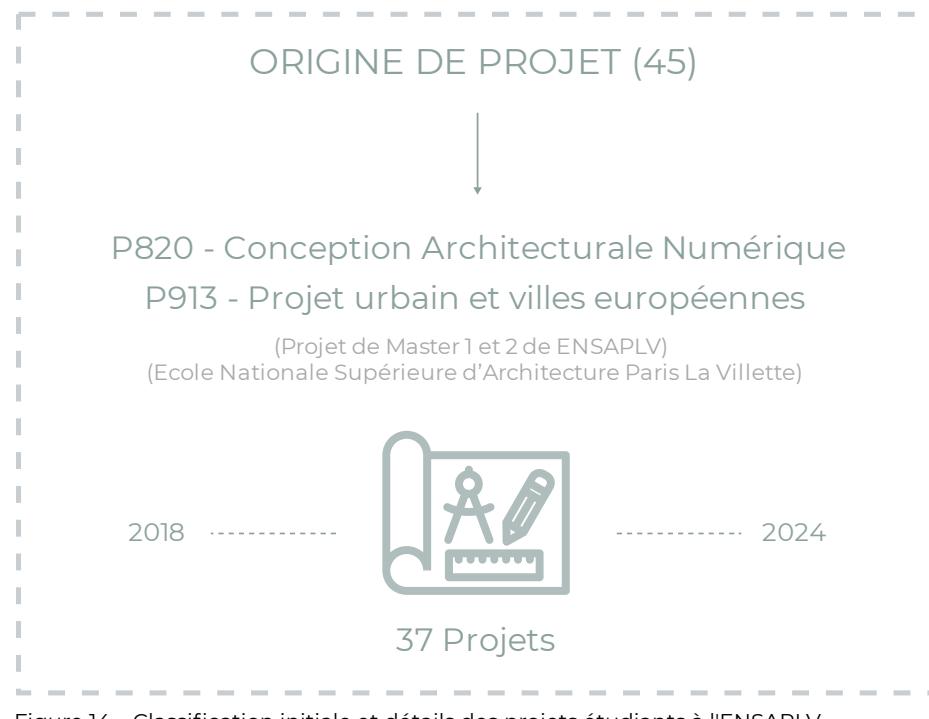


Figure 14 \_ Classification initiale et détails des projets étudiants à l'ENSAPLV

## 2. Analyse comparative des modèles biologiques

Chaque projet utilise un ou plusieurs modèles biologiques, qui sont cruciaux pour le processus de biomimétisme. Le diagramme présenté dans « The unified problem-driven process of biomimetics, Biomimetics : process, tools and practice, 2017 » fournit une explication détaillée de ce sujet. Chaque projet utilise des modèles biologiques pour proposer des éléments naturels pouvant servir de

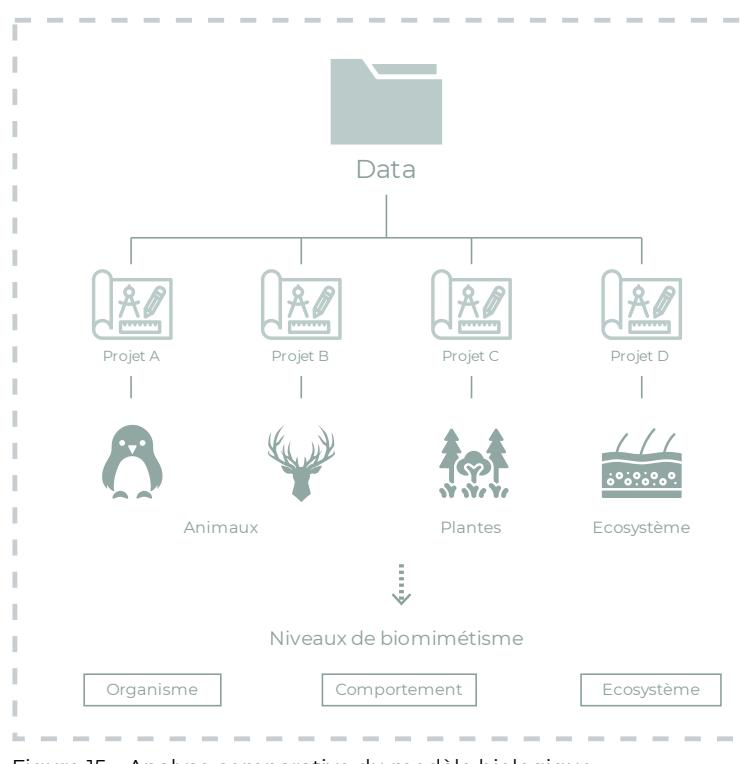


Figure 15 – Analyse comparative du modèle biologique

modèles biomimétiques, puis analyse la manière dont ces approches biomimétiques peuvent être appliquées à chaque site. Les modèles biologiques peuvent être classés en sous-catégories telles que les organismes, les comportements et les écosystèmes. Cette catégorisation est essentielle pour évaluer l'échelle des modèles biologiques.

### 3. Appliquer aux outils paramétriques

Comme mentionné précédemment, chaque projet a utilisé des outils paramétriques pour analyser ou réaliser son projet biomimétique. L'utilisation d'outils paramétriques dans le biomimétisme peut être divisée en trois catégories : la compréhension, le processus et la réalisation. Cela montre que les outils paramétriques peuvent être utilisés dans différents aspects de la mise en œuvre de l'architecture biomimétique. En examinant les différentes façons d'intégrer les technologies biomimétiques à l'aide d'outils paramétriques, nous pouvons discuter des domaines dans lesquels ces outils sont souvent utilisés, afin de préparer la quatrième section.

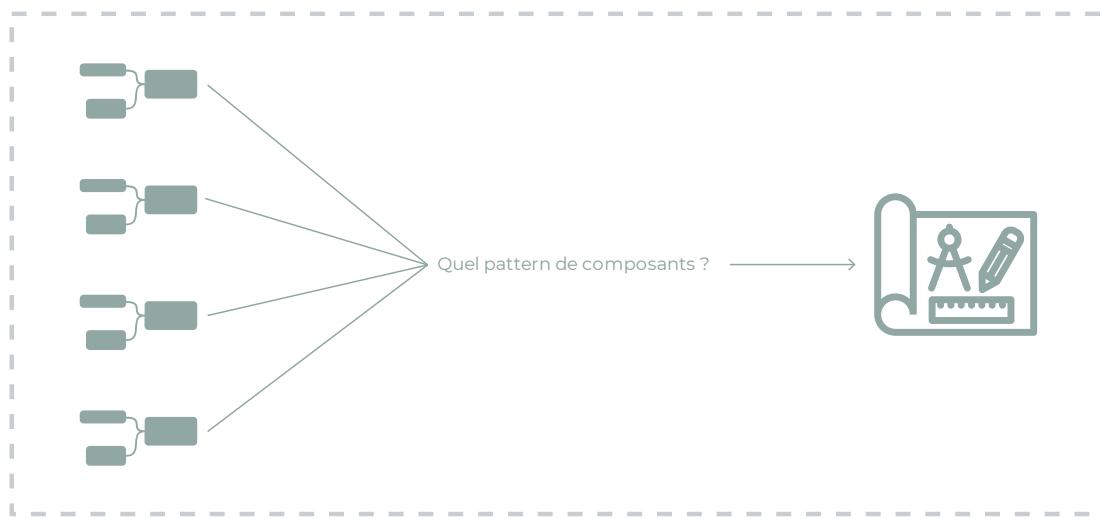


Figure 16 \_ Identifier les modèles de composants Grasshopper

### 4. Analyse de projets avec des composants paramétriques

Les trois sections précédentes montrent comment les outils paramétriques ont été utilisés pour chaque projet (dans le processus de réalisation du projet ou dans sa réalisation). Pour rendre cette analyse plus précise, j'examine quels composants paramétriques spécifiques ont été utilisés dans chaque projet. Je pense que 37 projets ne fournissent pas suffisamment de données pour que la classification paramétrique soit précise. Ce que je souhaite comprendre de chaque projet, ce sont les composants sous-jacents et les résultats qu'ils produisent.

Cependant, à ce stade, il est nécessaire d'identifier le niveau de biomimétisme du projet. Dans les étapes « Classification initiale et détails des projets étudiants à l'ENSAPLV » et « Analyse comparative du modèle biologique », je n'ai effectué qu'une classification de base. Il est donc important de vérifier si le projet est conforme.

## **5. Identifier les projets non biomimétiques**

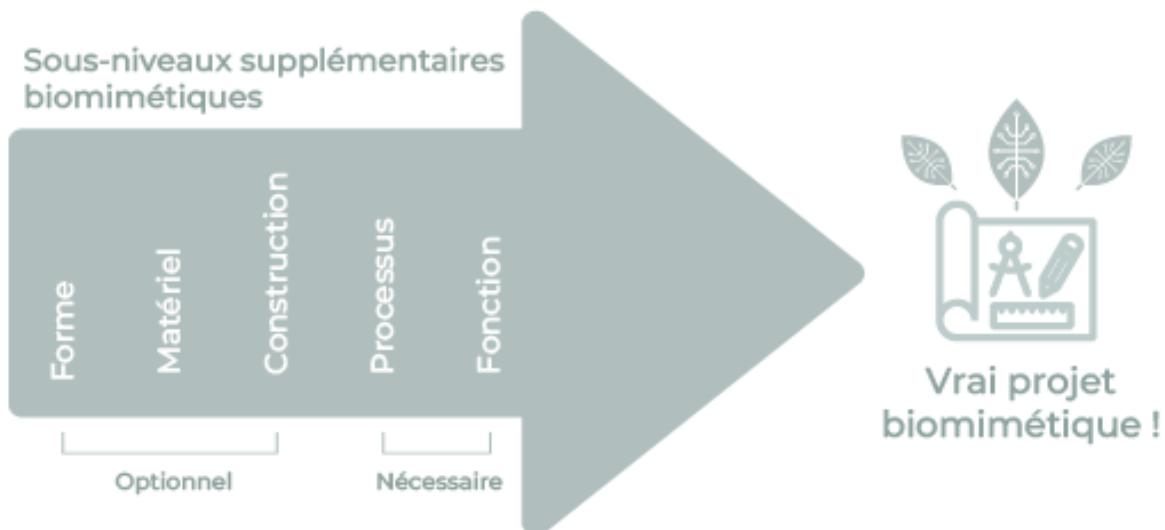


Figure 17 \_ sous-niveaux supplémentaires biomimétique proposés par Maibritt Pedersen Zari

Pour identifier les projets de biomimétisme, je décompose en catégories plus spécifiques d'« organisme », de « comportement » et d'« écosystème » afin de distinguer à quel niveau se situent les projets des étudiants. Cette granularité permet de proposer une méthodologie plus fine pour analyser le biomimétisme, que nous appelons « sous-niveaux supplémentaires de biomimétisme » (Figure 17). Cette notion peut fournir des indicateurs permettant de savoir si un projet échoue ou réussit dans sa prise en compte du concept de biomimétisme, ou de reconnaître s'il s'agit d'un projet qui pourrait être une approximation proche du concept de biomimétisme.

Ces sous-niveaux servent d'indicateurs d'une architecture biomimétique telle que définie par Maibritt Pedersen Zari. Le cadre de Zari fournit une orientation approximative pour la conception d'une architecture biomimétique et suggère

qu'il n'est pas nécessaire de suivre les cinq éléments suggérés. Toutefois, parmi ces éléments, « le processus » et la « fonction » sont essentiels.

## **6. Réévaluation des niveaux de performance du biomimétisme**

L'étape « Identification des projets non biomimétiques » a permis de réévaluer chaque projet en décomposant chaque modèle biologique. Cet examen permet de déterminer dans quelle mesure chaque projet imite de manière adéquate le modèle biologique en termes de « processus » et de « fonction ». L'objectif ici n'est pas de juger du détail ou de la qualité du projet lui-même, mais plutôt de catégoriser le niveau de biomimétisme de chaque projet en termes de conformité.

Les projets sont classés selon le système de classification par étapes « Identification des projets non biomimétiques ». Les projets qui remplissent les critères sont identifiés comme des projets biomimétiques. Cette classification permet également de déterminer si le projet relève du domaine du biomimétisme seul ou s'il recoupe d'autres domaines tels que la bio-morphologie ou la biophilie.

Cette étape vous permettra de passer à la dernière étape de la définition d'un projet qui met correctement en œuvre les principes du paramétrage et du biomimétisme.

## **7. Classification des projets de biomimétisme réussis et analyse de la pertinence des outils paramétriques.**

Sur la base des résultats des étapes précédentes, je classerai les projets dans lesquels le biomimétisme a été correctement mis en œuvre et je rédigerai mes conclusions sur l'utilisation appropriée de l'outil paramétrique. J'identifierai également la fréquence des projets dans lesquels le biomimétisme était approprié ou inapproprié et je fournirai des conclusions à ce sujet. En particulier, je me concentrerai sur les conclusions relatives à la formation de relations entre les différentes parties pour expliquer pourquoi cela a été le cas.

## 6. EXPERIENCES

### A. Classification initiale et information fine des projets étudiants de l'ENSAPLV

#### I. Données des projets étudiants de l'ENSAPLV

<sup>24</sup>Cette recherche s'appuie sur 45 projets d'étudiants fournis par le professeur Joaquim SILVESTRE. <sup>25</sup>De 2018 à 2024, celui-ci a piloté le projet de biomimétisme pour les étudiants de master de l'ENSAPLV. Le programme a évolué d'année en année, bénéficiant parfois de l'intervention d'experts en biomimétisme ou de formations aux outils paramétriques dispensées par des professeurs du laboratoire MAAC.

Sur les 45 projets, 37 ont été retenus pour étude. Alors que tous introduisaient le concept de biomimétisme, huit projets ont été éliminés en raison d'une utilisation peu claire d'outils paramétriques : algorithmes simples ne nécessitant pas d'outils paramétriques, approches paramétriques inappropriées ou processus insuffisamment détaillés.

Inversement, j'ai également inclus des projets qui mentionnaient explicitement l'utilisation d'outils paramétriques ou qui suggéraient une approche paramétrique dans leur processus. J'ai considéré ces exemples comme des applications du paramétrique dans un contexte biomimétique, même si la forme ou le processus final n'était pas explicitement paramétrique.

L'analyse s'est basée uniquement sur les données fournies par le professeur SILVESTRE. Afin de garantir l'objectivité et l'impartialité de la recherche, aucune

---

<sup>24</sup> Il est directeur du laboratoire MAP-MAACC, rattaché à l'ENSAPLV, où il a organisé des projets de biomimétisme pour le master de 2018 à 2024.

<sup>25</sup> Les projets s'intitulent " Projet urbain et villes européennes " et " Conception architecturale numérique " et sont distingués en tant que classes de projet dans le cadre du master de l'ENSAPLV.

information supplémentaire n'a été demandée aux étudiants participants. Cette approche a pour but de minimiser les biais et d'augmenter la fiabilité des résultats.

Cette méthodologie présente toutefois des limites. Il est possible qu'elle n'ait pas permis de saisir certains aspects détaillés des projets ou des intentions des étudiants, tels que les défis spécifiques auxquels ils ont été confrontés, leurs motivations pour certaines décisions de conception ou leurs interprétations personnelles du biomimétisme. Cependant, cette étude part du principe que les documents soumis au professeur SILVESTRE contiennent tous les éléments essentiels des projets.

Cette hypothèse repose sur l'idée que les étudiants ont fourni des informations et des documents représentant le mieux leur travail. J'ai donc décidé que ces documents étaient suffisants pour comprendre et analyser les principaux concepts, le processus de conception et les résultats finaux de chaque projet. Cette approche vise à garantir que l'analyse est aussi complète et approfondie que possible, tout en maintenant la cohérence de l'étude (Tableau 2).

Tableau 2 \_ Tableau des étudiants d'ENSAPLV participé au projet biomimétique

<b>Numéro</b>	<b>Titre de projet</b>	<b>Script Grasshopper</b>	<b>Année</b>	<b>Semestre</b>
1		○	2021 - 2022	P913
2		X	2021 - 2022	P913
3		○	2021 - 2022	P913
4	Ecosystème du sol forestier	X	2021 - 2022	P913
5		X	2021 - 2022	P913
6	Écosystème _ Des bois morts qui regorgeant de vie	○	2021 - 2022	P913
7		X	2021 - 2022	P913
8		X	2021 - 2022	P913
9	Ronce Commune	○	2021 - 2022	P913
10		X	2019 - 2020	P913
11	L'abeille dans sa ruche	X	2023 - 2024	P700
12	Traces de bancs de poissons	X	2023 - 2024	P700
13	Butterfly sports center	X	2022 - 2023	P700
14	Forêt de la Courneuve	○	2022 - 2023	P700
15		X	2022 - 2023	P700
16		X	2019 - 2020	P820
17		X	2021 - 2022	P913

18	TOUNDRA Classification de Köppen : "ET"	O	2019 - 2020	P820
19			2019 - 2020	P820
20	Climat Continental		2019 - 2020	P913
21			2019 - 2020	P913
22	Plumage du manchot empereur		2019 - 2020	P913
23			2021 - 2022	P913
24	Cloudy City		2018 -2019	P913
25	Cactus Centre commercial et marché couvert		2018 -2019	P913
26			2018 -2019	P913
27			2018 -2019	P700
28	Pavillon des arts: L'Antre culturelle vivre l'art au coeur de la communauté		2023 - 2024	P700
29	Centre de recherche des fonds marins		2023 - 2024	P700
30	Speed park		2023 - 2024	P700
31	Le musée aux bulles		2023 - 2024	P700
32	Biomimétisme - Nurse log/ Tronc-Nurserie		2023 - 2024	P700
33			2023 - 2024	P700
34	Musée dans le quartier de Bondy		2023 - 2024	P700
35	UN MARCHE sous L'OMBRELLE		2023 - 2024	P700
36	Le repère des arts		2023 - 2024	P700
37	Jardin Couvert le long du canal de l'OURCQ		2023 - 2024	P700

## **II. Analyse Anonyme**

Les analyses de projets sont anonymes. La compréhension du biomimétisme et de la paramétrierie dépendent de différences culturelles et expérientielles entre les individus, ce qui peut conduire à des différences nuancées dans l'analyse et la réalisation des projets. À cet égard, le succès d'un projet semble davantage dépendre du niveau de compréhension du biomimétisme que de la capacité à manipuler des outils paramétriques. Un manque de compréhension du biomimétisme peut également brouiller l'orientation des outils paramétriques, et étant donné que la plupart des étudiants ne sont pas familiers avec le biomimétisme, je peux supposer qu'ils commencent tous à un niveau similaire. En d'autres termes, au même moment, je suppose qu'ils auront tous accumulé des informations sur le biomimétisme.

## **III. Absence de titre \_ lié au modèle biologique.**

Les informations fournies par chaque projet sont très limitées et il est probable que certaines données soient manquantes. La majorité des informations collectées qui ne sont pas fournies concerne le titre du projet et la partie du script Grasshopper. Le titre est un indicateur important pour comprendre le modèle biologique ou le processus biomimétique que les étudiants ont utilisé. Cependant, de nombreux projets n'ont pas de titre, et le modèle biologique peut donc être identifié à partir de la documentation de l'analyse biomimétique que les étudiants soumettent à leurs professeurs. L'identification du modèle biologique se fait dans la section « Analyse comparative du modèle biologique ».

## **IV. Script Grasshopper**

Sur 37 projets, seuls 11 projets ont fourni au professeur SILVESTRE des scripts Grasshopper, ce qui suggère que de nombreux projets en sont dépourvus. Dans ces cas, il détectera la présence de Grasshopper dans la documentation de l'analyse biomimétique ou déduira la pertinence des outils paramétriques à partir de références à des formes paramétriques. Par exemple, la génération de motifs de Voronoï ou de Delaunay peut être calculée à l'aide d'une modélisation classique ou de programmes basés sur la 2D. Cependant, étant donné que leur réalisation à

l'aide de Grasshopper est courante et simple à créer avec moins de composants, je pense qu'il existe une implication paramétrique. Vous trouverez une analyse détaillée de l'implication paramétrique dans la section « Analyse des projets utilisant des composants paramétriques ».

## V. Niveau principal

Le tableau met également en évidence les années et les parcours des étudiants impliqués. Cette option de projet a été conçue pour les étudiants qui ont choisi cette option entre 2018 et 2024. Elle a été proposée aux étudiants de master 1 et de master 2, sans distinction de niveau.

En général, un plus grand nombre d'années d'études indique une plus grande accumulation de connaissances architecturales lors de l'analyse des projets. Bien qu'il existe des différences individuelles, il est généralement admis que les étudiants de niveau supérieur ont une compréhension architecturale plus profonde. Nous pourrons discuter dans la conclusion de l'impact significatif de cette compréhension architecturale sur la réalisation de projets d'architecture biomimétique.

## B. Analyse comparative du Modèle biologique

### I. Environnements de formation pour l'exécution des projets

Une formation de base sur le biomimétisme a été dispensée chaque semestre. Celle-ci comprenait un aperçu du biomimétisme, le choix de modèles biologiques pour donner aux étudiants une compréhension approximative du biomimétisme, et la sélection de modèles biologiques. En particulier, le projet du 7<sup>e</sup> semestre 2024 s'est concentré sur le biomimétisme au niveau de l'organisme, en utilisant des modules carrés standardisés comme base pour la mise en œuvre de diverses notions de biomimétisme.

Le Dr Natasha Chayaamor Heil, experte en architecture biomimétique à l'Institut MAAC, a participé au cours (2018-2019) et a contribué à l'enseignement de la théorie

biomimétique. Sur la base de ses connaissances, des conseils ont été donnés sur la manière d'intégrer efficacement les principes biomimétiques dans la conception architecturale. Néanmoins, ses observations ont révélé un écart entre la compréhension théorique du biomimétisme par les étudiants et leur capacité à appliquer concrètement la théorie dans des projets architecturaux. Par conséquent, les difficultés et les lacunes susmentionnées dans la compréhension du biomimétisme par les étudiants sont mises en évidence. Cette constatation souligne la nécessité d'explorer des stratégies permettant de combler le fossé entre la théorie et la réalisation effective des projets.

Le Dr Chayaamor Heil a souligné l'importance d'une compréhension approfondie du biomimétisme dans les cours de conception architecturale. Elle s'est toutefois inquiétée de la tendance des étudiants à se concentrer uniquement sur les aspects visuels et esthétiques du biomimétisme, au détriment de ses éléments fonctionnels et processuels intrinsèques. Cette observation suggère que le potentiel intrinsèque du biomimétisme n'est pas pleinement exploité.

## **II. L'importance du choix d'un modèle biologique**

Chaque projet étudiant sélectionne un ou plusieurs modèles biologiques fondamentaux pour le processus de biomimétisme. La sélection du modèle biologique est la première étape dans la compréhension du biomimétisme : les étudiants choisissent un objet ou un système qui existe dans la nature et l'analysent dans un premier temps.

Ce secteur est important car il constitue un tremplin vers le suivant. Tout d'abord, la compréhension des systèmes naturels complexes peut conduire à réfléchir à des mécanismes spécifiques dans la nature, puis, sur la base du matériel que nous comprenons, nous devons développer des idées sur le biomimétisme. Il existe beaucoup de matériel pour l'analyse des modèles biologiques, mais leur intégration dans l'architecture présente clairement des défis structurels, matériels et morphologiques. Par conséquent, nous avons besoin d'une taxonomie plus

détaillée pour analyser les modèles biologiques dans cette partie. Fondamentalement, dans la recherche en biomimétisme (recherche en biologie en général, et non en architecture), les modèles biologiques peuvent être classés selon trois grandes taxonomies.

### **III. Classification basée sur trois niveaux de biomimétisme**

Sur la base de « l'Approche à trois niveaux du biomimétisme » présentée dans la partie 3.2 de L'état de l'art, je classe chaque modèle biologique en organisme, comportement ou écosystème. Les étudiants peuvent également comprendre la taxonomie du modèle biologique qu'ils ont choisi et la rendre plus accessible. Par exemple, de nombreux processus et systèmes sont impliqués dans un modèle biologique, et le choix de l'un d'entre eux conduit à se questionner sur les connaissances à détailler. Il se peut qu'on ne sache pas quelles parties étudier plus en détail, ou que l'on soit mal orienté dans la progression sur des points clés.

Par conséquent, la compréhension et l'applicabilité des modèles biologiques par les étudiants peuvent être remises en question. Ces contraintes peuvent limiter le nombre de projets qui permettent de démontrer de manière suffisante la validité des modèles et des structures biologiques.

Avant de choisir un modèle, les étudiants peuvent identifier ces trois niveaux et avoir une idée de l'échelle et des idées avec lesquelles ils veulent travailler, de sorte que leurs choix soient un peu plus assurés. En d'autres termes, plutôt que d'aborder un modèle biologique sans aucune information, le processus de recherche d'un modèle peut être rendu plus naturel en utilisant les trois niveaux pour guider la recherche. Étant donné qu'il y a trois lignes directrices, chaque étudiant prendra ces bifurcations au cours de l'exécution de cette étape.

### **IV. Choix des étudiants**

Les étudiants classent le « modèle biologique » utilisé dans leur projet selon les trois niveaux de biomimétisme. Chaque étudiant choisit un objet ou un système de modèle biologique et l'analyse en conséquence. - un modèle biologique (Tableau 3).

Tableau 3 \_ Nombre de projets classés par le « niveau du biomimétisme »

ORGANISME	COMPORTEMENT	ECOSYSTEME
<b>25</b>	<b>4</b>	<b>8</b>
Peau des caméléons		
Ailes de libellule & Sarracénie		
Fourrure d'ours polaire		
Cactus (2)		
Intestin		
Fourrure d'ours polaire		
Lynx boréal		
Pomme de Pin		Mouche spongieuse
Moloch horridus		Récifs d'éponges siliceuses
Plume de pingouin	Commune de Ronce	Lagunes côtières d'eau salée
Stomates	Ensemble de pingouins	Forêt
Peau des caméléons	Abeilles	Mont hydrothermal
Paroi cellulaire	Bancs de poissons	Arbres morts
Cladiella Suezensis		Laisse de la mer
Physarum		Termitière
Crabe		
Limace de mer		
Haworthia		
Tronc d'arbre		
Carapace de tortue		
Peau des caméléons		
Méduse lunaire		
Colonne vertébrale du serpent		
Bernard l'Hermite		

### Critères de classification

Je classe les niveaux de modèles biologiques utilisés dans chaque projet en fonction des trois niveaux de biomimétisme (organisme, comportement, écosystème). Chaque étudiant présente aux professeurs, chaque semestre, un exposé dans lequel il identifie et analyse un modèle biologique de son choix. En

me basant sur les descriptions des présentations remises, je reconnaiss l'orientation des analyses des étudiants.

Par exemple, la « mouche spongieuse » utilisée dans le projet 1 pourrait être classée comme « organisme » parce qu'il s'agit d'un animal. Cependant, l'étudiant explique également comment le cycle biologique de l'organisme affecte l'écosystème sous-marin. Il ne s'agit pas d'une analyse de la mouche spongieuse individuelle, mais d'une analyse de l'écosystème sous-marin par le biais de la mouche spongieuse. Par conséquent, ce travail relève de la classification « écosystème ».

Certains étudiants commencent par avoir une idée claire de la direction qu'ils veulent prendre avec les trois niveaux de biomimétisme. Cependant, la plupart des étudiants semblent choisir un modèle biologique, en faire une analyse approximative, puis analyser plus en détail les trois niveaux de biomimétisme. Cela peut s'expliquer par le fait que, comme mentionné précédemment, le projet de chaque année se concentre sur un niveau spécifique de biomimétisme.

### **Analyse des projets par année**

Les modèles biologiques choisis par les étudiants étaient très divers, la majorité des méthodes étant basées sur les organismes : j'ai identifié un total de 25 niveaux d'organismes, 4 niveaux de comportements et 8 niveaux d'écosystèmes.

Le professeur SILVESTRE note que dans la pratique, le programme d'études est orienté vers le niveau de l'écosystème ou de l'organisme. En effet, sur la base des données de l'année académique 2021-2022, huit projets étaient orientés vers l'écosystème, un projet concernait le comportement et un seul projet était axé sur l'organisme. Pour l'année académique 2019-2020, on constate que six projets se situent au niveau de l'organisme et un seul au niveau du comportement (les années académiques 2023-2024, 2022-2023 et 2018-2019 présentent un schéma similaire).

En outre, comme mentionné précédemment, le semestre de début 2018 à début 2019 a été marqué par la présence de l'intervention du Dr Chayaamor Heil (son intervention a peut-être facilité une compréhension plus approfondie du

---

biomimétisme et une approche architecturale du biomimétisme), de sorte qu'il est difficile de considérer la fréquence du choix des étudiants comme une indication absolue de la méthode préférée des étudiants. Enfin, le modèle biologique choisi par les étudiants peut être influencé par l'orientation de l'enseignement de l'enseignant.

## V. La plupart des projets : Organisme

L'orientation principale de ses classes de 2018 à 2024 (sauf 2021-2022) reste au niveau de « l'organisme ». Cela se traduit naturellement par une offre plus importante de projets au niveau des bâtiments. Comme nous pouvons le voir dans la section « Organisme, comportement et écosystème », les trois niveaux sont d'abord choisis en fonction de l'échelle de l'analyse. Les projets qui concernent « l'organisme » montrent donc naturellement des projets au niveau du bâtiment. Pour les projets les plus récents, 2023-2024, les étudiants ont essentiellement reçu un grand site à côté de la Seine et ont été invités à appliquer le concept de biomimétisme à une masse rectangulaire (Figure 17). Seize projets polyvalents ont été placés le long du canal, chacun séparé par un passage de 10 mètres. Pour faciliter l'intégration, les étudiants devaient intégrer les projets dans un

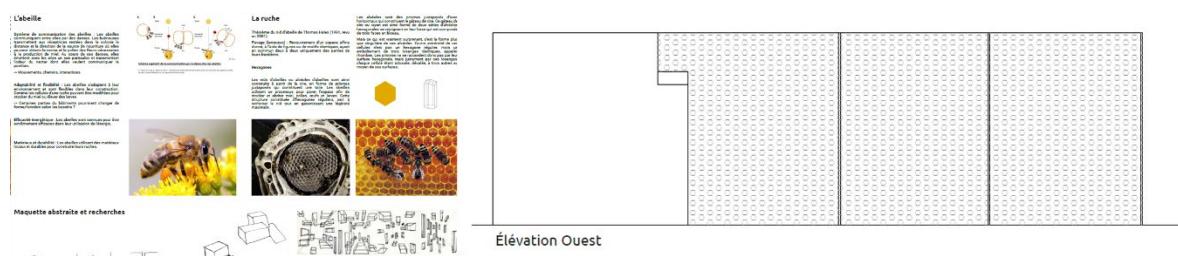


Figure 17 \_ Appliquer une enveloppe en utilisant la structure d'un nid d'abeille

parallélépipède de 50x15x15m. Avec cette contrainte, la notion d'organisme et de comportement est relativement plus facile à introduire que celle d'écosystème.

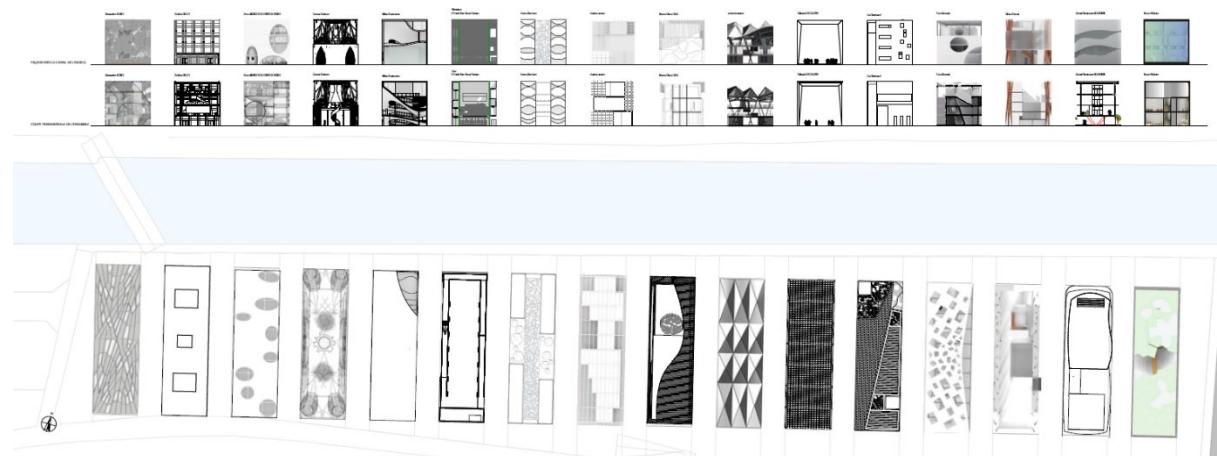


Figure 18 \_ 16 projets en 2023-2024

Deuxièmement, les projets en matière d'organisme ont montré relativement plus de signes de préoccupations formelles, en particulier dans l'application de modèles biologiques à l'enveloppe du bâtiment. Au niveau de l'organisme, les 25 projets ont adopté une application morphologique du concept de biomimétisme à l'enveloppe du bâtiment, ce qui laisse la possibilité de reléguer le modèle biologique à la partie morphologique. Dans la partie « D. Identification des projets non biomimétiques », je procéderai à une distinction plus détaillée entre le modèle biologique choisi par chaque étudiant et la notion biomimétique. Je présenterai les modèles biologiques de quelques projets qui peuvent être caractérisés comme

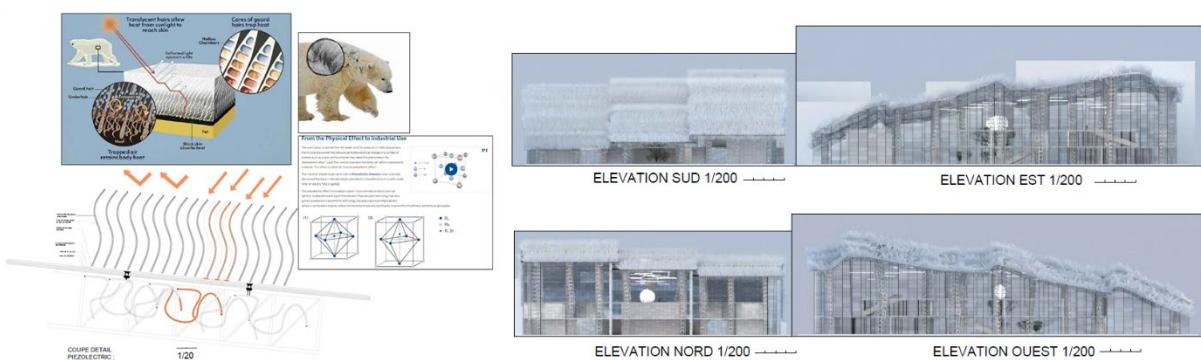


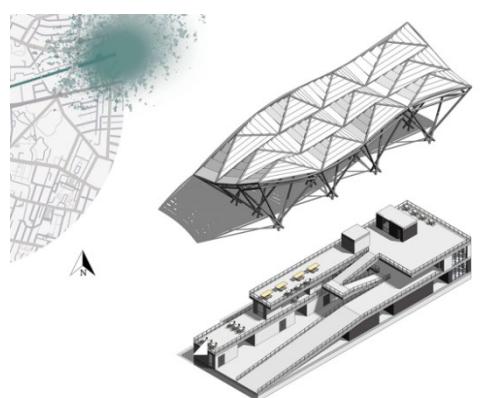
Figure 19 \_ Analyse de la modèle biologique " Fourrure d'ours polaire "

représentatifs de l'ensemble des 25 projets et comment ils peuvent être analysés.

En utilisant la « fourrure d'ours polaire » (Figure 19) comme modèle biologique, le projet analyse l'isolation produite par les différentes couches épidermiques et la fourrure de l'ours polaire. L'analyse se concentre sur son excellente efficacité en matière de conservation d'énergie. Sur la base de cette analyse, l'étudiant propose une solution pour une application à l'épiderme d'un bâtiment.

Adoptant les « Abeilles » comme modèle biologique, le projet évoque la structure hexagonale et l'efficacité du nid d'abeille créé par les abeilles, et envisage de l'appliquer à l'enveloppe du bâtiment : la masse des deux bâtiments est présente, et les espaces délimités par la maille métallique hexagonale en forme de nid d'abeille sont destinés à permettre la pénétration de la lumière du jour et l'allègement de la structure.

Ainsi, tous les projets de « organisme » présentent des solutions de légèreté de l'enveloppe ou de la structure, ou, comme dans le cas du projet « méduse lunaire », les effets que l'on peut attendre en prenant les formes structurelles des organismes vivants et en les appliquant aux bâtiments. Ce projet visait à remplacer le système de circulation de l'eau à l'intérieur d'une méduse par un système de circulation dans la couche d'air.



#### Processus :



Figure 20 \_ Analyse du système circulatoire d'une méduse

Ainsi, tous les projets de l'organisme présentent des solutions allégeant l'enveloppe ou la structure, ou, comme dans le cas du projet « méduse lunaire » (Figure 20), les effets que l'on peut attendre en prenant les formes structurelles des organismes vivants et en les appliquant aux bâtiments. Ce projet visait à remplacer le système de circulation de l'eau à l'intérieur d'une méduse par un système de circulation dans la couche d'air. En définitive, les

aspects les plus distinctifs d'Organisme se résument à la substitution formelle aux préoccupations matérielles, à l'efficacité structurelle et au souci de l'enveloppe.

## VI. Comportement

Avec environ quatre projets au niveau Comportement, il s'agit du pourcentage le plus faible des trois niveaux de biomimétisme, ce qui peut s'expliquer par le manque d'accessibilité de ce niveau pour de nombreux étudiants. Si, au niveau de l'analyse de l'organisme, ils ont choisi un modèle biologique basé sur une partie d'un animal, le niveau de comportement est une étape supérieure dans l'analyse : l'animal (y compris l'homme) devient alors une entité et l'accent est mis sur le lien entre les schémas de mouvement de cette entité et les médiateurs qui provoquent ce mouvement ou ce comportement.

Par exemple, le projet étudiant « Ronce Commune » de 2021-2022 s'est intéressé à la localisation des ronces et à la réaction des renards, qui ont produit des trajectoires relativement régulières. L'étudiant a ensuite simulé ces trajectoires à l'aide d'outils paramétriques. À ce titre, il est plus proche du « comportement animal » ou de la « psychologie animale » que de la biologie (science naturelle qui recherche la structure physique, les processus chimiques, les interactions moléculaires, les mécanismes physiologiques, le développement et l'évolution des organismes vivants), et a donc une texture différente de celle de l'organisme. Le cas de « Traces de bancs de poissons », qui s'est déroulé en 2023-2024, présente un schéma similaire. Inspiré par le comportement des bancs de poissons, ce projet utilise la composition de lignes de mouvement comme élément principal.

Sur les quatre projets, trois ont développé leur concept autour du flux de mouvement. Grâce à la configuration des flux de mouvement identifiée, ils ont souvent proposé des interprétations sur l'efficacité obtenue après optimisation et application au projet. Cependant, étant donné la très faible quantité de données, l'analyse du comportement risque de comporter de nombreuses erreurs.

## VII. Ecosystème

Tous les projets de l'écosystème étaient inclus dans le programme 2021-2022. Les projets qui se distinguent au niveau de l'écosystème peuvent être grossièrement classés en trois catégories : chaînes alimentaires, interactions homme-nature et interactions entre les individus dans la nature.

Les projets « Mouche spongieuse », « Mont hydrothermal », « Laisse de mer » et « Récifs d'éponges siliceuses » illustrent le niveau de l'écosystème en se concentrant sur la chaîne alimentaire. Ils abordent l'influence de la chaîne alimentaire sur l'environnement et l'impact global de l'environnement. La mouche Spongilla est un insecte qui vit sur les éponges d'eau douce, mettant en évidence les interactions de l'écosystème aquatique et la manière dont il profite à une partie de la chaîne alimentaire ou à l'éponge d'eau douce. Le projet « Mont hydrothermal » traite des écosystèmes chimiosynthétiques qui se développent dans les cheminées hydrothermales en eaux profondes. Il analyse les écosystèmes complexes qui se forment avec les chaînes alimentaires de différents organismes et les carcasses d'organismes qui se déposent, en utilisant les chaînes alimentaires et les mécanismes de dissipation de la chaleur qui caractérisent les environnements extrêmes. La laisse de mer est un phénomène écologique qui comprend les algues, les coquillages et les débris marins qui s'accumulent sur les plages, et l'étudiant a analysé les interactions entre les écosystèmes marins et terrestres.

Les projets « Forêt » et « Arbres morts » analysent les différentes végétations des arbres d'une forêt, les limites entre les arbres morts et les jeunes arbres, les mouvements des animaux à l'intérieur et à l'extérieur de ces limites, les interactions des créatures utilisant les arbres comme support, et les connexions qui résultent de ces interactions. Le projet « Termitière » recherche les connexions structurelles des fourmilières géantes dans le sol et les points aléatoires des termites qui se construisent à une certaine distance les uns des autres.

Les projets à l'échelle de l'écosystème analysent essentiellement l'impact global, plutôt que de se contenter d'examiner les caractéristiques individuelles, les mouvements des animaux, etc. C'est pourquoi l'échelle des projets est inévitablement plus grande, ce qui montre qu'ils sont mieux adaptés au contexte

urbain. Naturellement, parmi les étudiants formés en 2021-2022, huit projets ont utilisé des modèles biologiques comme notion d'analyse urbaine. En ce qui concerne la réalisation des projets, ceux-ci n'ont pas abouti à la conception d'un seul bâtiment, mais d'un ensemble de bâtiments à l'échelle d'un quartier. Le projet « Mouche spongieuse » est le seul à avoir conçu un seul bâtiment.

## C. Analyse paramétrique de Réalisations et de composants avec Grasshopper

### I. Principaux composants utilisés

Dans cette section, j'analyse les modèles Grasshopper que les étudiants ont utilisés pour mettre en œuvre les modèles biologiques qu'ils ont choisis. Les étudiants utilisent Grasshopper pour analyser et visualiser leurs modèles biologiques. Les composants utilisés dans chaque projet sont très variés, et plutôt que de tous les analyser, j'aimerais me concentrer sur les composants les plus fréquemment utilisés. Ces composants peuvent être considérés comme le résultat du système et l'impact visuel que les étudiants ont trouvé dans chacun des trois niveaux de modèles biologiques. Comme mentionné dans le paragraphe « 3.4 État de l'éducation », lorsque les étudiants ont exécuté leurs projets de biomimétisme, environ 50 % d'entre eux ont mentionné l'intérêt visuel et esthétique. Cela peut également être remarqué dans les projets des étudiants de l'ENSAPLV, et j'aimerais analyser quels sont les modèles récurrents de composants. Le tableau suivant liste les composants les plus utilisés dans les projets (Tableau 4).

Tableau 4 \_ Composant principaux de Grasshopper de chaque projet

N° de projet	Modèles biologiques	Composants principaux	Niveau biomimétisme
1	Mouche spongieuse	Populate 2D Voronoi	Ecosystème
2	Récifs d'éponges siliceuses	Division	
3	Lagunes côtières d'eau salée	Polar array Dispatch Ellipse	
4	Forêt	Square Closest point	

5	Mont hydrothermal	Populate 2D OcTree Project	
6	Arbre morts	Closest point Curve closest point square	
7	Laisse de mer	Square Surface from points Random	
8	Termitière	Voronoi Populate 2D	
9	Ronce commune	Python Square	Comportement
10	Ensemble de pingouins	Diamond panels Sweep surface morph	
11	Abeilles	Polygon Surface morph	
12	Bancs de poissons	Surface différence Field	
13	Peau des caméléons	Triangle Panels B Surface morph	Organisme
14	Ailes de libellule & Sarracénie	Voronoi Random reduce	
15	Fourrure d'ours polaire	Interpolate series	
16	Cactus	Surface box Surface morph	
17	Intestin	Ellipse Blend curve	
18	Fourrure d'ours polaire	Evaluate surface Voronoi 3D	
19	Lynx boréal	Mesh ray Voronoi	
20	Pomme de Pin	X	
21	moloch horridus	Voronoi Populate Surface morph	
22	Plume de pingouin	Je ne sais pas	

23	Stomata	Voronoi Populate 2D surface morph	
24	Peau des caméléons	OcTree Populate 3D surface morph Triangle panels B	
25	Cactus	Diamond panels	
26	Paroi cellulaire	Quad panels Populate 2d + interpolate Solid difference	
27	Cladiella Suezensis	Mesh ray Multi pipe	
28	Physarum	Divide surface ou square Pull point	
29	Crabe	Surface morph Voronoi Populate 2D	
30	Sea slug	X	
31	Haworthia	Mesh ray Solid difference	
32	Tronc d'arbre	L-system (Rabbit) Turtle (Rabbit)	
33	Carapace de tortue	Voronoi	
34	Peau des caméléons	Populate 2D Voronoi	
35	méduse lunaire	Mesh surface Bouncy solver Anchor	
36	Le repère des arts	Stella3d Dendro	
37	Jardin Couvert le long du canal de l'OURCQ	Construct plan Divide curve	

## La base des composants principaux

Les composants principaux présentés dans ce tableau sont ceux qui constituent la base de l'exécution de chaque projet. Lors de l'analyse d'un modèle biologique, on distingue deux parties principales : le processus et la réalisation. Le « processus » correspond au moment où les étudiants essaient des simulations dans Grasshopper pour comprendre le modèle biologique. La « réalisation » est le moment où ils finissent de comprendre les mécanismes du modèle et s'efforcent ensuite de donner vie au projet, de sorte que l'extérieur ou l'intérieur du projet montre visuellement le processus du modèle biologique. Les projets utilisant le « processus » sont concentrés aux niveaux « Comportement » et « Écosystème ». Les projets « Forêt », « Arbres morts » (Figure 22) et « Laisse de mer » (Figure 21) montrent une utilisation de Grasshopper concentrée sur les processus. Ils étudient les relations qui émergent des modèles biologiques.

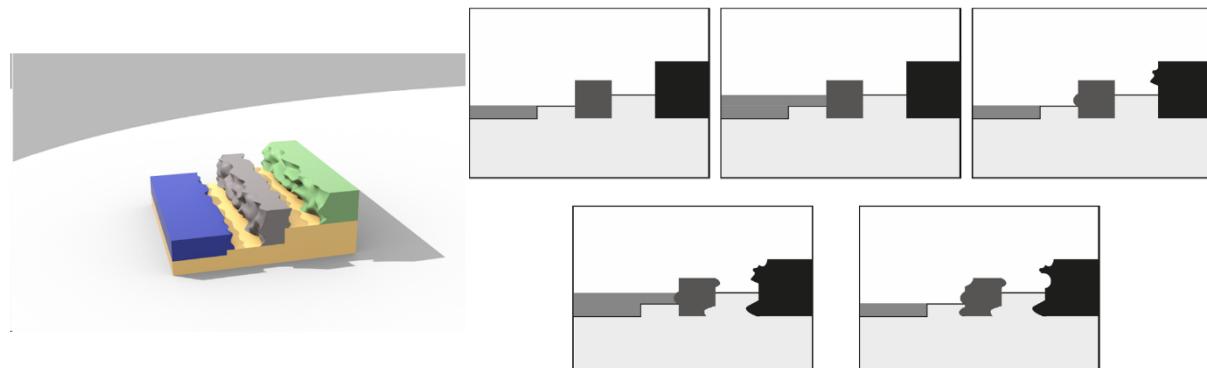


Figure 21 \_ Projet N°6, « Laisse de mer »

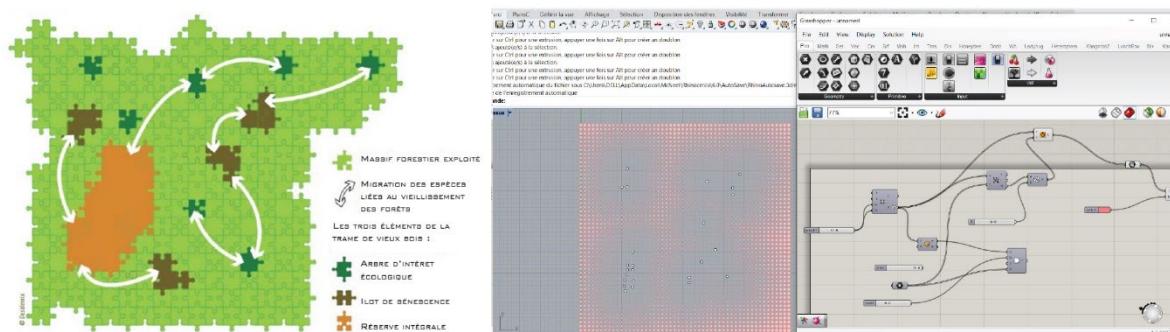


Figure 22 \_ Projet N°7, « Arbres morts »

## II. Éléments clés d'Ecosystème et Comportement : Relations

La « laisse de mer », par exemple, sont le résultat de l'échange de nombreuses matières organiques ou de formes physiques telles que le sable apporté par les marées. Grâce à l'eau de mer, de nombreuses matières organiques s'échouent sur les plages de sable, constituant ainsi de la nourriture pour d'autres animaux et d'autres chaînes alimentaires. Inversement, dans l'eau, l'échange avec la terre forme également des chaînes alimentaires qui soutiennent le système de chaînes alimentaires dans l'océan. Par conséquent, l'aspect le plus important de ce projet est la formation d'écosystèmes grâce aux marées. L'étudiant a voulu illustrer cette notion en utilisant trois gros morceaux pour montrer visuellement l'échange partiel. Le projet passe du « processus » à la « réalisation ».

Pour les projets « Arbres morts » et « Forêt », l'étudiant a utilisé Grasshopper pour analyser les écosystèmes des arbres morts et jeunes ainsi que des arbres adultes. Pour étudier la relation de distance entre les groupes, il pointe l'emplacement de chaque cluster dans Grasshopper, puis analyse l'intersection des deux clusters et la facilité d'échange entre eux en fonction de la distance. La « Ronce commune » au niveau « Comportement » démontre une méthode d'analyse similaire à l'aide de Grasshopper.

Les relations constituent l'élément clé de la partie « Écosystème ». Ils placent quelques objets ou limites clés dans un grand espace. La question de savoir comment ils interagissent et forment un système est analysée par Grasshopper. Par conséquent, l'orientation principale des étudiants présentée dans les niveaux « Écosystème » et « Comportement » ne semble pas être d'analyser les composants d'un seul objet ou d'un système. Ils considèrent les deux niveaux de biomimétisme en termes d'architecture, ce qui est similaire à la façon dont ils trouvent des connexions dans la condition ou les alentours de site pour analyser un site. Et c'est de cette façon que les principales configurations de composants sont trouvées dans Grasshopper.

### Composant « Square »

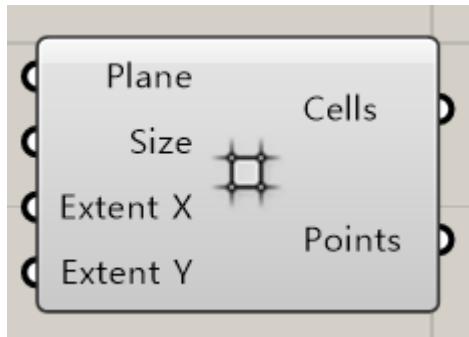


Figure 23 \_ Composant de grasshopper « Square »

Le composant le plus utilisé dans les deux niveaux susmentionnés est le composant « Square » (Figure 23). Sur les 12 projets, 4 ont démontré cette approche ou ont utilisé une méthode d'analyse basée sur « Populate 2D/3D ». Cependant, le composant « Populate » repose sur un placement aléatoire des points. Par conséquent, lorsqu'il s'agit de localiser des objets

ou des clusters existants importants ou spécifiques, la prise de points à la main peut s'avérer plus précise que l'utilisation de ce composant. Ce composant est généralement mieux adapté pour travailler avec les composants « Voronoï » ou « Ligne de Delauney » pour découvrir des règles dans des points aléatoires.

Le composant « Square » crée une grille de carrés d'une certaine taille, et l'étudiant utilise cette grille pour analyser la variété des relations entre les objets. Pour visualiser ces relations, les étudiants construisent par défaut les modèles de composants de base suivants. Ces schémas peuvent comporter plus ou moins de composants en fonction de la situation.

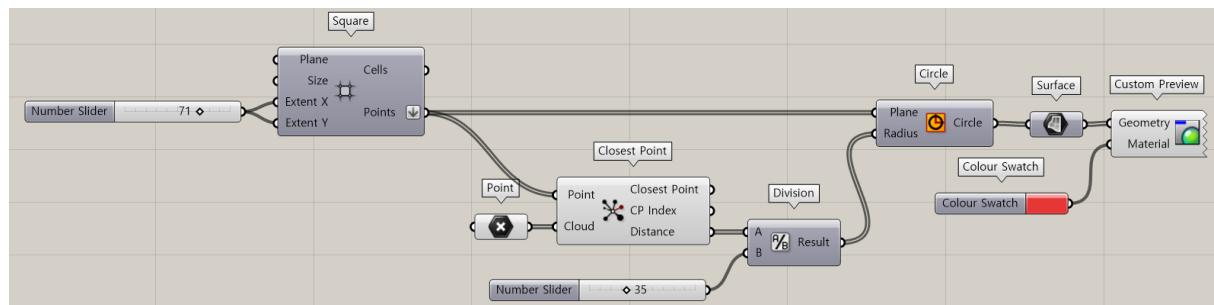


Figure 24 \_ Pattern observé dans les projets lors de l'utilisation du composant « Square »

Je crée des cercles en utilisant les points générés par le composant « Square ». Cependant, en créant des cercles avec le composant « Circle », tous les cercles ont le même diamètre. C'est pourquoi on peut utiliser le paramètre « Distance » du

composant « Closest Point » pour définir approximativement les zones de chaque point en fonction des distances entre des points (objets ou groupes) créés de manière aléatoire. En déplaçant ces points aléatoires, de nouvelles formes de zones sont générées en conséquence (Figure 24, 25). On peut également ajouter d'autres groupes pour étudier les surfaces de chaque zone. Ces zones permettent de définir des indicateurs approximatifs des relations physiques entre chaque groupe. Les étudiants qui ont utilisé ce modèle de composant ont tous présenté, à la fin de leurs projets, une analyse approfondie des relations avec le contexte environnant. 33 % des étudiants ont montré cette méthode d'analyse aux niveaux de l'écosystème et du comportement.

L'utilisation du composant « Square » par les étudiants ayant choisi les deux niveaux peut être décrite comme suit : Premièrement, ce composant nous donne un carré bien aligné, avec à l'intérieur un certain nombre de points qui sont modularisés et placés aux intersections d'une grille, ce qui est relativement facile à faire, avec quelques paramètres, pour obtenir un résultat visuel. Le second avantage de ce composant est son accessibilité. Sans avoir besoin d'autres plugins ou de combinaisons complexes d'autres composants dans Grasshopper, nous pouvons facilement créer une grille et, en fonction de nos besoins individuels, utiliser les lignes ou les points de celle-ci. Bien sûr, nous pouvons facilement créer une grille avec une combinaison d'autres composants, mais un composant prêt à l'emploi est plus accessible.

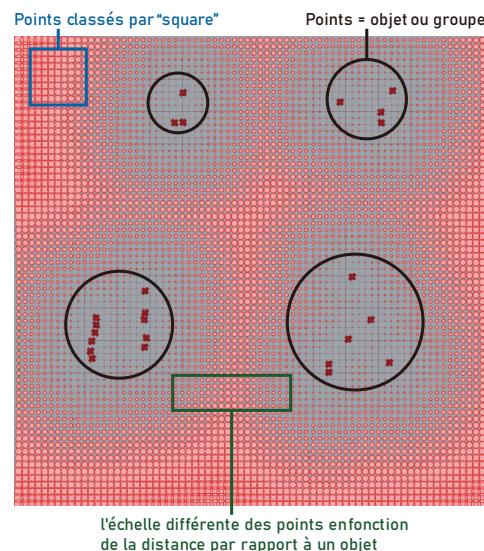


Figure 25 – Exemples de visualisation d'analyse utilisant le composant « Square »

Tableau 5 \_ Projets qui ont utilisé le composant « Square »

N° de Projet	Composant principaux	Image d'analyse	Particularité
<b>4</b>	Square Closest point		Organiser l'écosystème environnant autour des arbres comme référence et quantifier la distance entre cet écosystème et celui des autres arbres en utilisant des carrés.
<b>6</b>	Closest point Curve closest point square		Utiliser Square pour séparer l'écosystème des arbres morts de l'écosystème des jeunes arbres, puis utiliser Closest pour créer un nouveau groupe d'arbres morts.
<b>7</b>	Square Surface from points Random		Lorsqu'un élément se déplace d'un bloc à l'autre, il affecte non seulement la géométrie du bloc, mais aussi la densité, qui est recalculée après chaque déplacement.
<b>9</b>	Python Square		Utiliser Square comme référence pour les arbres et les fruits, puis visualiser les mouvements des animaux.

En d'autres termes, les niveaux Écosystème et Comportement se prêtent davantage à l'analyse à l'aide du composant « Square », et le fait de voir un tiers des étudiants orientés de cette manière prouve qu'il est relativement accessible et peut être une manière appropriée de représenter visuellement les deux niveaux (Tableau 5).

### III. Utilisation universelle : Voronoï

Le motif de Voronoï (Figure 26) est très populaire, quel que soit le niveau de biomimétisme. Sur 37 projets, j'ai trouvé des motifs de Voronoï dans 12 projets. Daniel Davis<sup>26</sup> a produit un tableau de l'utilisation de Grasshopper en 2011, que je

<sup>26</sup> Il est un chercheur qui s'intéresse à deux sujets principaux : l'impact de la technologie sur l'architecture et l'impact de l'architecture sur les personnes.

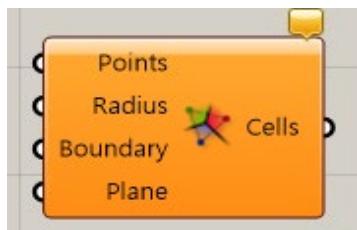


Figure 26 \_ Composant Voronoï

suppose basé sur des données consultées sur un site de forum appelé « <https://www.grasshopper3d.com/> » plutôt que sur des données demandées directement à Rhino3D (McNeel, le créateur de Rhino3D, ne fournit pas de données pour cette information). D'après son tableau (datant de 2011), 712 composants ont été étudiés, et le composant « Voronoï » est classé 143<sup>e</sup> avec 97 utilisations, ce qui représente un pourcentage très élevé si l'on exclut les composants de base (slider, group, list item, point, curve, etc.).

J'ai constaté que cette proportion était également présente dans les projets des étudiants. Sur les 12 projets, la grande majorité se situe au niveau « Organisme », ce qui s'explique par l'importance quantitative des données au niveau « Organisme ». Il ne serait en effet pas pertinent de dire que le pattern de Voronoï est fréquemment utilisé dans les projets au niveau « Comportement », alors qu'au niveau « Écosystème », trois projets sur huit utilisent ce composant comme principal. Je trouve également des collaborations fréquentes avec « Populate 2D », qui est bien adapté à l'expression de l'aléatoire (Tableau 6).

Tableau 6 \_ Projets qui ont utilisé le composant « Square » à « l'écosystème »

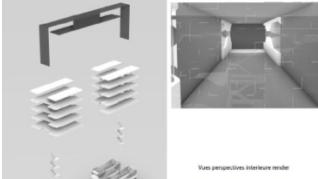
N° de Projet	Composant principaux	Image d'analyse	Particularité
1	Voronoi Populate 2D		Construction de la forme du jardin en utilisant la forme de Voronoi, aucun système biomimétique spécial n'a été trouvé.
2	Voronoi Populate 2D		Les limites de chaque entité dans la mer sont redéfinies sous la forme Voronoi et la circulation de chaque frontière est réorganisée dans la ligne Delaunay.
8	Voronoi Populate 2D		Les nids de termites répartis dans la savane sont utilisés comme points aléatoires pour construire des formes de Voronoï et pour observer les changements dans la zone environnante.

## Orientation de l'utilisation du composant « Voronoi »

Tout d'abord, la différence entre les composants « Voronoï » et « Square » réside dans la régularité. Selon l'usage qu'en font les étudiants, le composant « Square » utilise l'orientation régulière de la grille pour analyser de grandes surfaces, tandis que le composant « Voronoï » démontre une méthode d'analyse à plus petite échelle. En effet, les trois projets du niveau « Écosystème » l'appliquent soit à la forme irrégulière du jardin extérieur d'un bâtiment, soit ont une orientation pour l'analyse des limites d'objets individuels ou de quartiers. La méthode d'analyse du niveau « Écosystème » établit une distinction claire entre la régularité et l'irrégularité. Les méthodes « Voronoï » et « Square » conviennent aux analyses au niveau du quartier, sauf en ce qui concerne la régularité. Au niveau de « Écosystème », les deux méthodes sont similaires, mais à une échelle différente.

Tableau 7 \_ Projets qui ont utilisé le composant « Square » au « comportement » et à « l'organisme »

N° de Projet	Composant principaux	Image d'analyse	Particularité
14	Voronoi Random reduce		Contrôle la forme et l'intensité de la lumière à l'aide du motif Voronoi et les bords de la forme encouragent l'eau à s'écouler et à être stockée.
18	Evaluate surface Voronoi 3D Surface closest point		En utilisant Voronoi 3D, il crée un mécanisme qui permet à la neige de se transformer en eau et de s'écouler en créant des espaces entre les deux.
19	Mesh ray Voronoi		Utilisé comme mesure contre le froid en contrôlant la lumière naturelle grâce à la forme Voronoi.
21	Voronoi Populate Surface morph		Un système qui peut stocker efficacement l'eau en utilisant la forme cutanée de Moloch horridus tout en créant une structure en utilisant la forme Voronoi.
23	Voronoi Populate 2D surface morph		Un pilier est créé au centre de Voronoi, et le pilier reçoit la lumière et permet un mouvement vertical.

<b>29</b>	Surface morph Voronoi Populate 2D	 <small>Vues perspectives intérieur render</small>	Un toit qui contrôle la lumière est construit sur la base de la composition de cellules de chitine utilisant Voronoi. De plus, l'ouverture visuelle est assurée par des murs poreux.
<b>33</b>	Voronoi		La forme Voronoi est utilisée pour transmettre la lumière dans l'espace vert central. Obtenez une lumière adéquate en utilisant des pièces bloquées et ouvertes.
<b>34</b>	Populate 2D Voronoi		Il utilise la forme Voronoi pour laisser passer la lumière et maintenir le confort thermique. Il permet également de donner de la lumière aux plantes à l'intérieur.

### Utilisation du pattern « Voronoi » : 2D ou 3D ?

Le niveau « Organisme » affiche tous ceux qui ont utilisé le composant « Voronoi » en l'appliquant à l'enveloppe du bâtiment. En appliquant la méthode de Voronoi à l'enveloppe du bâtiment, la plupart des projets démontrent les avantages structurels et la prise en compte des éléments poreux. Les avantages structurels de Voronoi sont une intégrité structurelle et une connectivité forte, ainsi qu'une optimisation de la division de l'espace. En recourant au motif de Voronoï, il est possible d'obtenir une stabilité structurelle économique en minimisant l'utilisation de matériaux. Cela peut s'inscrire dans une démarche de biomimétisme (Tableau 7).

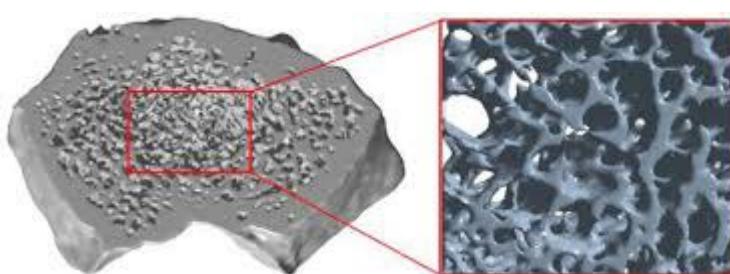


Figure 27 \_ Structure poreuse de l'os

Cependant, à ce stade, je peux soulever la question des avantages structurels. Les motifs de Voronoï ont déjà été utilisés en médecine

pour les greffes osseuses<sup>27</sup>(Figure 27). Ils imitent la surface poreuse de l'os et sont utilisés pour greffer de l'os dans les zones déficientes. Cela s'explique par la forte stabilité structurelle et le caractère abordable du motif de Voronoï, mentionnés plus haut.

Cependant, la méthode des étudiants montre une direction différente : il s'agit d'une utilisation bidimensionnelle du motif de Voronoï. La stabilité structurelle et la résistance utilisées dans la greffe osseuse requièrent une structure tridimensionnelle. Il est évident qu'en utilisant le motif de Voronoï en trois dimensions, un minimum de matériau peut être utilisé et la stabilité structurelle requise est obtenue. Par exemple, pour assurer une stabilité structurelle adéquate à un mur de 10 x 10 m, il faut environ 17,19 m<sup>2</sup> de poteaux et de poutres. En utilisant un motif de Voronoï, vous auriez besoin de 30 m<sup>2</sup>. On peut donc se demander si l'utilisation du motif de Voronoï en deux dimensions peut jouer un rôle majeur dans la réalisation d'économies. À moins qu'il n'y ait des forces horizontales importantes, il est difficile de voir comment une structure de poteaux et de poutres pourrait être efficace en termes de méthodes de construction et d'utilisation de matériaux. Parmi les projets des étudiants, seul un sur huit a utilisé le motif de Voronoï en trois dimensions.

Par conséquent, pour garantir la stabilité structurelle et l'efficacité économique de l'architecture, il est nécessaire d'utiliser des motifs de Voronoï tridimensionnels. L'utilisation de motifs de Voronoï bidimensionnels peut être esthétique, mais elle doit être envisagée dans un cadre plus biomimétique pour comprendre son lien avec le biomimétisme. Cette partie détermine si un projet est biomimétique ou non, sur la base de la classification « sous-niveaux supplémentaires biomimétiques » de la section « D. Identification des projets non biomimétiques ».

---

<sup>27</sup> A novel coupled analysis and porous structure modelling methods using the mixture theory and Voronoi cell, SeungHun Park, 2019.

#### **IV. Résultat des Projets avec les Composants Square et Voronoï**

Dans cette section, j'ai pu réduire les composants fréquemment utilisés par les étudiants à « Square » et « Voronoï ». Bien entendu, il est possible d'effectuer l'analyse ou la réalisation d'un projet avec des composants différents et des combinaisons des deux. Tout comme le composant « Voronoï » appartient à la famille du composant « Populate », j'ai constaté que les combinaisons des principaux composants souvent utilisés étaient très similaires.

Les projets des étudiants utilisaient les deux composants comme principaux, et j'ai trouvé plusieurs projets visuellement complets et spatialement intéressants (en dehors de la forme d'un rectangle). Cependant, je ne peux pas répondre à la question de savoir s'il s'agit de méthodes ou de réalisations conformes au biomimétisme dans cette section. Ils ont utilisé des outils paramétriques pour montrer différentes méthodes d'analyse, et dans la section suivante, nous pourrons déterminer si l'utilisation de ces outils paramétriques est conforme à la notion d'architecture biomimétique.

### **D. Identification des projets non biomimétiques**

#### **I. Composants Paramétriques dans les projets étudiants**

Dans la section précédente, j'ai identifié un modèle de composants paramétriques fréquemment utilisés et les principaux (Voronoï et Square), qui sont universellement utilisés par les étudiants à tous les niveaux du biomimétisme. Cependant, je devais m'assurer que l'utilisation de ces composants garantit que les projets des étudiants respectent la notion de biomimétisme. Les « sous-niveaux supplémentaires de biomimétisme » (figure 17) mentionnés par Maibritt Pedersen Zari dans la partie « METHODE » constituent le principal point de référence pour l'identification de l'architecture biomimétique.

Selon elle, l'architecture biomimétique comprend un total de cinq éléments : la forme, le matériau, la construction, le processus et la fonction. Cela signifie que le

biomimétisme se caractérise par cinq éléments distincts de l'architecture. Cependant, comme mentionné précédemment dans la section « Méthode », les éléments clés du biomimétisme sont le « Processus » et la « Fonction ». Au cœur du biomimétisme se trouve le concept qui consiste à découvrir les caractéristiques des systèmes ou des formes naturels et à les appliquer à la technologie pour accroître l'efficacité et la fonctionnalité. Au cours du processus, il peut y avoir des découvertes en matière de formes, de méthodes de construction ou de matériaux intéressants. Cependant, l'essentiel de ces découvertes repose sur le « processus » et la « fonction », deux caractéristiques que j'estime essentielles à la réalisation d'une architecture biomimétique.

## II. Projets non biomimétiques

Sur la base de ces critères, j'examine les projets des étudiants pour déterminer s'ils correspondent aux cinq composantes et je catégorise les projets non conformes au biomimétisme en expliquant pourquoi.

Les projets sont analysés pour déterminer s'ils relèvent de l'architecture biomimétisme. Pour les douze projets qui y ont eu recours, le lien avec les composants dominants trouvés dans la section C est mentionné.

Tableau 8 \_ Projets utilisant des composants de « Voronoï » axés sur la « forme »

N° de Projet	Composant principaux	Sous-niveaux biomimétique	Particularité de la « Forme »
1	Voronoi Populate 2D	Forme Matériel	Division de la forme du parc utilisant Voronoi.
2	Voronoi Populate 2D	Forme	Création de parois externes en utilisant l'agrandissement de la peau d'éponge pour former des Voronoi.
8	Voronoi Populate 2D	Processus	Non pertinent
14	Voronoi Random reduce	Forme Processus	Toit en motif Voronoi.
18	Evaluate surface Voronoi 3D Surface closest point	Forme Processus Fonction	Forme modifiée de demi-cercle + poreuse.
19	Mesh ray Voronoi	Forme Processus	Revêtement de bâtiment avec une membrane Voronoi.
21	Voronoi Populate Surface morph	Forme Processus	Utilisation d'une structure de fenêtres de toit en motif Voronoi.

<b>23</b>	Voronoi Populate 2D surface morph	Forme	Toit incurvé poreux et sol, colonnes boronoïsées.
<b>29</b>	Surface morph Voronoi Populate 2D	Forme Matériel	Finition d'une coquille de motif de Voronoï sur un plan avec une forme de pince
<b>33</b>	Voronoi	Forme Processus	Enveloppe décorée de motifs de Voronoi.
<b>34</b>	Populate 2D Voronoi	Forme Processus	Ajout d'une couche Voronoi inspirée de la peau du caméléon.

Tout d'abord, la quasi-totalité des projets ont fourni des informations correspondant à la partie « Forme ». C'est souvent la première chose qu'ils remarquent. En général, lorsque les étudiants commencent à analyser le biomimétisme, ils reconnaissent d'abord la forme qui est cohérente avec le système. En fin de compte, l'architecture biomimétique est plus susceptible d'avoir des parties formellement intéressantes. Cela s'explique par le fait que l'architecture biomimétique est plus expérimentale et qu'elle laisse place à la créativité (Tableau 8).

Par exemple, le motif de « Voronoï », un composant paramétrique que les étudiants ont utilisé plus tôt, se retrouve dans de nombreux modèles biologiques, et sa forme est très mathématique et régulière. En fait, il existe de nombreux exemples d'utilisation de ce motif pour l'extérieur des bâtiments ou pour la légèreté structurelle, de sorte que les étudiants peuvent dire que tout est conçu avec des caractéristiques et des éléments biomimétiques. Cependant, comme je l'ai mentionné précédemment, à moins d'utiliser le motif de Voronoï en trois dimensions, il est difficile de voir un avantage structurel ou fonctionnel - il s'agit simplement d'une préoccupation esthétique pour la façade du bâtiment.

### III. Relation avec d'autres mots contenant le préfixe « bio »

Pour les projets qui utilisaient des composants de Voronoï, tous étaient liés à la « Forme », ce qui suggère que les étudiants étaient plus concernés par la forme lorsqu'ils utilisaient des composants de Voronoï comme principal élément paramétrique de leurs projets. Le « processus » est également présent dans 12 des projets et dans 7 projets, mais il s'agit davantage d'un « comment travailler » qui découle de la forme. Ils utilisent le processus d'apparition du motif de « Voronoï »

et les points et lignes générés par ce processus comme élément central du projet qu'ils souhaitent montrer. Ainsi, parmi les projets où le « Processus » est présent, il est nécessaire d'observer s'il y a quelque chose qui se rapproche de la fonction et du processus du biomimétisme. À l'exception du projet n°23, l'utilisation du motif de « Voronoï » relève plus de la « bio-morphologie » que du biomimétisme, puisqu'il est utilisé comme élément esthétique pour envelopper l'extérieur.

Sur l'ensemble des projets, 22 projets s'inspirent de la « bio-morphologie » et 5 projets de la « biophilie ». Ces chiffres montrent que les projets ont commencé par le biomimétisme, mais qu'au fur et à mesure de leur développement, d'autres directions sont possibles avec le préfixe « Bio ».

Dans le cas du projet n°8, l'étudiant a utilisé le motif de Voronoï et la notion de « biophilie », qui introduit la nature dans le motif. L'étudiant qui a travaillé sur le projet n°8 a utilisé la notion de biomimétisme comme cadre pour enfermer la nature. On y retrouve donc aussi la notion de « processus », mais il serait difficile de qualifier cela de biomimétisme. Ce n'est pas parce que ces composants sont fréquemment utilisés par les étudiants qu'ils sont de bons composants pour réaliser le biomimétisme. Mais, nous pouvons voir que la forme est très présente dans la façon dont les étudiants en master abordent le biomimétisme, et nous pouvons faire le lien avec les projets qui ont utilisé des composants de Voronoï. Sur un total de 37 projets, 29 projets ont montré un contact avec « Forme » ; pour « Matériel », 8 projets l'ont montré ; cependant, la plupart des projets ont montré une préoccupation pour les matériaux, mais aucun d'entre eux n'a montré une préoccupation pour les matériaux liés au biomimétisme (légèreté, efficacité, etc.). Pour « Construction », aucun des projets ne l'a montré.

#### **IV. L'attention des étudiants sur la forme**

Je pense que ce flux correspond le plus à la partie des outils paramétriques relevant de la « Forme » dans les sous-niveaux supplémentaires de biomimétique. Tous les projets des étudiants ont été formés au concept de biomimétique par l'enseignement, ils ont choisi un modèle biologique et ils ont utilisé des outils paramétriques (Grasshopper) pour mener à bien leurs projets. Ils ont en effet fait

prouve d'une grande réflexion sur la « Forme ». Cela correspond à ce qui est évoqué dans la partie « État de l'éducation » de la section « État de l'art » concernant l'intérêt des étudiants lorsqu'ils travaillent sur des projets de biomimétique. Selon l'étude de Tavsan, S. et Tavsan, F., environ 50 % des étudiants ont déclaré s'intéresser à la forme dans le cadre de la biomimétique. Cependant, parmi les étudiants de master de l'ENSAPLV, environ 78,38 % des projets ont montré un intérêt pour la forme, utilisant des outils paramétriques à cet effet. Les motifs les plus couramment utilisés sont les motifs « Voronoi » et « Populate ». Comme la cohérence formelle est fortement présente dans toutes les parties, cela montre que l'intérêt pour la forme est largement exprimé dans le cadre de la biomimétique.

L'accent mis sur la partie morphologique brouille naturellement le lien avec l'architecture biomimétique. Dans l'architecture biomimétique, où les parties « Fonction » et « Processus » sont importantes, l'accent mis sur la forme a commencé comme un processus visant à développer cette architecture. Cependant, le résultat final est que peu de projets peuvent vraiment être considérés comme biomimétiques : sur 37 projets, seuls 7 peuvent être considérés comme biomimétiques. Cependant, cette statistique ne signifie pas que l'accent mis sur la forme n'est pas lié au biomimétisme et donc ne signifie pas que cette approche est sans intérêt. Sur les 7 projets, 5 analysaient la forme, et celle-ci constituait la réponse aux questions « Processus » et « Fonction ». Par conséquent, la prise en compte de la forme semble être une étape de recherche fondamentale dans l'étude de l'architecture biomimétique, et la question la plus importante est de savoir si elle peut être liée à la notion de biomimétisme à l'aide d'outils paramétriques.

## **V. Intervention de composants paramétriques : focus sur les éléments morphologiques dans l'architecture biomimétisme**

En conclusion, on constate que les composants paramétriques fréquemment utilisés dans les projets des étudiants (Voronoi et Square) mettent l'accent sur les éléments formels de l'architecture biomimétique. La plupart des projets se sont concentrés sur l'analyse et la mise en œuvre de la « Forme », ce qui semble être le

résultat de l'utilisation d'outils paramétriques ayant une forte influence sur la conception morphologique. Cependant, il y a eu relativement peu de considération pour le « Processus » et la « Fonction », qui sont des éléments clés de l'architecture biomimétique.

L'analyse des projets utilisant des composants de Voronoï montre que la plupart des étudiants ont mis l'accent sur les caractéristiques morphologiques, ce qui est plus proche de la « bio-morphologie » que du biomimétisme. Certains projets incluent un « processus », mais celui-ci tend à se concentrer sur le processus de développement morphologique.

Par conséquent, j'ai constaté que lorsque les étudiants utilisaient des outils paramétriques pour mettre en œuvre des notions de biomimétisme, ils s'intéressaient beaucoup aux éléments formels. Ce phénomène pourrait être attribué au fait que la conception formelle est un élément majeur de l'enseignement du biomimétisme.

Dans les sections suivantes, je décrirai les caractéristiques de sept projets que je considère comme relevant de l'architecture biomimétique et de l'utilisation d'outils paramétriques, afin de comparer leurs différences et similitudes avec d'autres projets et d'étudier à quel moment de l'analyse l'utilisation d'outils paramétriques était idéale.

## **E. Classification des projets de biomimétisme réussis et analyse de la conformité des outils paramétriques.**

L'utilisation d'outils paramétriques est un outil efficace pour réaliser l'architecture du biomimétisme. Cependant, comme je l'ai montré dans la section précédente, elle ne fournit pas de direction claire pour la réalisation du biomimétisme : 30 projets ne conviennent pas aux projets biomimétiques. Bien que l'utilisation d'outils paramétriques joue un rôle important dans la réalisation du biomimétisme, les limites des projets qui peuvent finalement être définis comme des projets

---

biomimétiques ont également été montrées dans la section précédente. Dans cette section, je dirais de l'utilisation d'outils paramétriques en relation avec les éléments biomimétiques principalement montrés dans les projets étudiants qui peuvent être définis comme des projets biomimétiques.

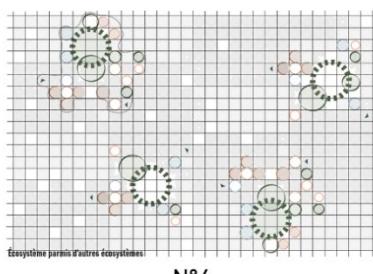
### I. Le rôle des outils paramétriques dans les projets de biomimétisme

La section D a analysé les modèles paramétriques utilisés par les projets qui ont débuté par le biomimétisme, mais qui n'ont pas pu être qualifiés de projets biomimétiques, ainsi que sur la base de leur réflexion. Les modèles suivants étaient caractéristiques des projets qui n'ont pas pu être qualifiés de projets biomimétiques : ils ont tenté de résoudre uniquement les aspects morphologiques à l'aide d'outils paramétriques, sans penser à la fonction et au processus ; ils n'ont pas trouvé d'avantage adéquat à l'aspect morphologique par rapport à la structure classique existante. L'analyse du modèle biologique n'était pas assez approfondie pour être traduite en architecture (comme l'a noté l'État de l'art, cela pourrait être dû à un manque de compréhension précise du biomimétisme ou à un manque d'informations biologiques ou d'ingénierie). Je pense que ces modèles de caractéristiques sont des indicateurs qui peuvent être utilisés pour identifier de manière plus fiable les projets de biomimétisme. J'ai également examiné dans quels projets les outils paramétriques étaient utilisés. Si 78 % de tous les projets concernent la forme, j'analyse le rôle des outils paramétriques dans les projets que l'on peut qualifier de biomimétiques.

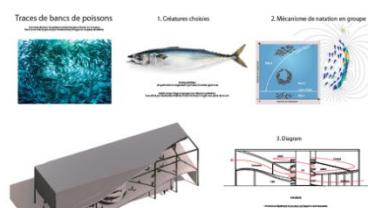
Tableau 9 \_ Projets déterminés comme étant biomimétiques

Nº de Projet	Modèle biologique	Particularité biomimétique	Particularité dans Grasshopper
4	Forêt	La résilience des systèmes naturels se produisant au sein même de la forêt.	Dans le contexte urbain, il est possible d'analyser divers réseaux de connexion et de relations urbaines en paramétrisant plusieurs analyses.
12	Bancs de poissons	Application à l'intérieur des bâtiments en utilisant les chemins et les mouvements créés par les bancs de poissons en nageant en groupe.	Ce projet de bio-inspiration est fortement axé sur l'approche morphologique, et en termes d'efficacité pratique, il est jugé plus approprié d'utiliser des transformations de courbes basées sur l'historique des enregistrements.
13	Peau des caméléons	Variation de couleur due aux changements de pores cutanés selon la température ambiante	En raison du problème de l'insertion de motifs se formant de manière répétitive sur la surface courbe, la flexibilité des outils paramétriques est requise.

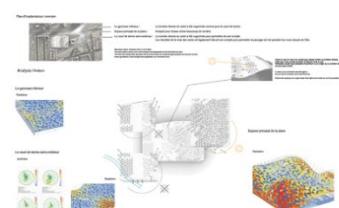
<b>15</b>	Fourrure d'ours polaire	Création de diverses couches pour permettre une entrée de lumière appropriée et substituer l'excès de lumière par de l'énergie stockée.	Il est recommandé d'utiliser le plugin Grasshopper (Ladybug) pour confirmer la forme complexe des poils tout en vérifiant leur effet isolant.
<b>18</b>	Fourrure d'ours polaire	Séparation entre les parties recevant la lumière et celles capables de stocker l'eau qui coule	Pour réaliser des formes tridimensionnelles de Voronoï et former des motifs de porosité utilisant l'aléatoire, l'aide de Grasshopper est largement nécessaire.
<b>23</b>	Plume de pingouin	Stockage de chaleur grâce à un système de plumes inspiré par celui des pingouins et par les différentes couches	Dans le processus de remplacement de formes de poils générées aléatoirement par des masses géométriques, l'utilisation d'outils paramétriques est nécessaire. De plus, des problèmes complexes de treillis de toit peuvent être résolus à l'aide du plugin Lunchbox.
<b>35</b>	Méduse lunaire	Réutilisation du système de circulation d'eau de la structure interne de la méduse lunaire pour le système de circulation d'air du bâtiment.	Bien qu'elle soit simple du point de vue de la forme, cette structure est efficace. Cependant, le plugin Kangaroo est utilisé pour démontrer le mécanisme de la circulation de l'air.



N°4



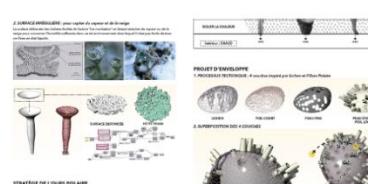
N°12



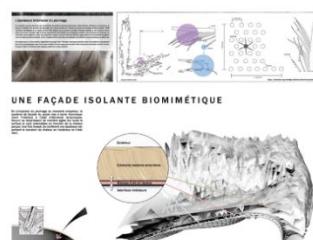
N°13



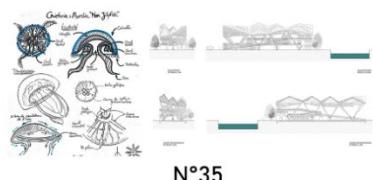
N°15



N°18



N°23



N°35

Figure 28 \_ Projets déterminés comme étant biomimétiques

Au total, sept projets présentaient des processus et des caractéristiques adaptés aux projets biomimétiques. J'ai décidé que ces sept projets étaient des projets biomimétiques car ils reprenaient la forme de modèles biologiques de manière

judicieuse sur le plan architectural, et qu'ils comportaient des caractéristiques biomimétiques significatives sur le plan architectural (Figure 28)(Tableau 9).

## II. L'intervention d'outils paramétriques est-elle nécessaire ?

Dans tous les projets, l'utilisation d'outils paramétriques a été conséquente, mais une enquête a d'abord été menée pour déterminer si une intervention paramétrique était réellement nécessaire et si la modélisation classique (modélisation dans Rhino3D sans Grasshopper) était plus efficace pour créer les formes.

Les particularités morphologiques relevées dans chaque projet sont les suivantes : surfaces courbes, motifs répétitifs, formes de Voronoï, motifs poreux, formes de cheveux générées de manière aléatoire et visualisation des mécanismes d'écoulement de l'air. Il s'agit souvent d'une tentative de résoudre des formes complexes à l'aide d'outils paramétriques, ou d'utiliser Grasshopper pour visualiser les performances attendues et les aspects morphologiques des performances structurelles ou de la simulation. Sur la base de ces exemples, Je voulais déterminer si l'utilisation d'outils paramétriques est essentielle :

1. Optimisation de courbes ou itération de géométries complexes avec des paramètres.
2. Performance structurelle ou simulation de différentes options.
3. Prédiction de l'efficacité énergétique ou des performances attendues grâce à des plugins

Il peut exister d'autres domaines paramétriques pour lesquels la modélisation paramétrique serait meilleure que la modélisation classique, mais pour ces sept projets, j'ai pensé qu'il était possible de faire une distinction sur l'efficacité des deux méthodes de modélisation dans le cadre de ces trois contraintes. J'ai compilé un tableau indiquant quelle méthode de modélisation est la plus efficace pour chaque projet, la méthode classique ou la méthode paramétrique.

Tableau 10 \_ Nécessité de l'utilisation d'outils paramétriques

N° de Projet	Modèle biologique	1.	2.	3.
4	Forêt			
12	Bancs de poissons			
13	Peau des caméléons			
15	Fourrure d'ours polaire			
18	Fourrure d'ours polaire			
23	Plume de pingouin			
35	Méduse lunaire			

Quatre projets ont choisi d'optimiser paramétriquement des formes complexes ou répétitives, ou de créer des formes simples avec moins d'efforts et de temps lorsqu'elles sont déjà facilement créées dans Grasshopper, comme les motifs de Voronoï. Quatre autres projets ont utilisé des outils paramétriques pour simuler des structures complexes, certains d'entre eux utilisant des plug-ins Grasshopper (Ladybug, Kangaroo, etc.) pour se concentrer sur l'efficacité énergétique et la simulation de formes qui changent sous l'effet de facteurs externes (Tableau 10).

Dans le cas du projet « Bancs de poissons », je n'ai pas introduit les trois contraintes : le mouvement du banc de poissons est représenté par une courbe, ce qui donne une forme curviligne. Cependant, si l'on compare les deux méthodes de modélisation, la modélisation classique basée sur les NURBS avec Rhino3D est plus efficace. Les poignées de la spline permettent de modifier la courbe de manière plus intuitive et il n'est pas nécessaire de configurer un modèle de paramètre (figure 29). De plus, le fait que le maillage courbe de base puisse être modifié même après la fin de la modélisation grâce à la fonction « Historique des enregistrements » rend la modélisation classique dans Rhino3D plus intuitive et plus facile à réaliser pour ce projet.

Cependant, si l'on demande si cela prend beaucoup de temps dans Grasshopper, la réponse est non. Avec le composant « Evaluate Curve », on peut déplacer une partie spécifique d'une ligne droite, et avec la combinaison des composants « Populate 2d » et « Interpolate », on peut créer des courbes aléatoires. Toutefois, pour les courbes que je souhaite, il y a l'avantage d'une approche plus intuitive, d'une meilleure accessibilité, et d'une utilisation plus facile en termes de difficulté.

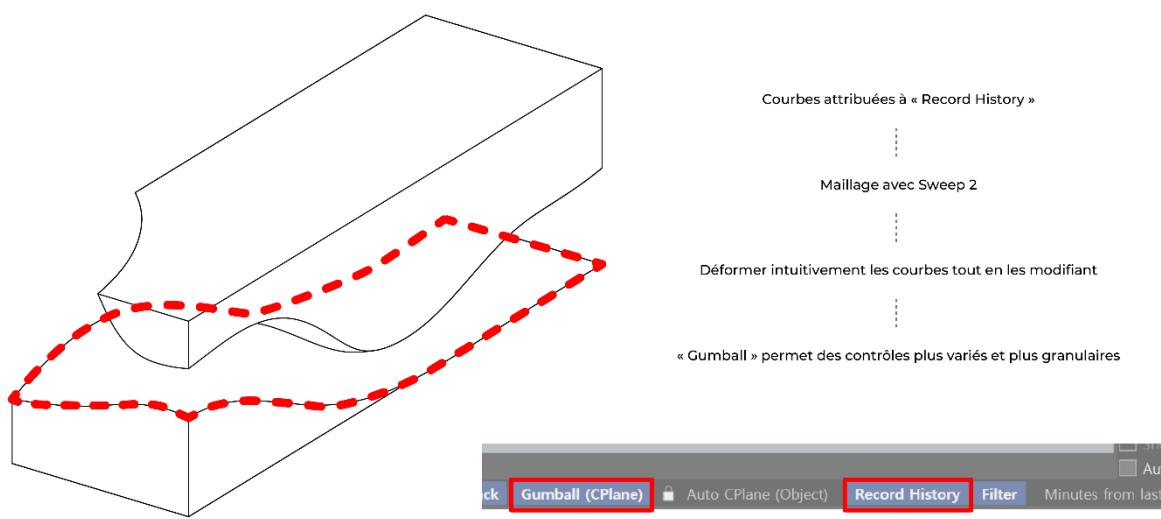


Figure 29 \_ Comment la forme du modèle biologique est implémentée dans Rhino3D pour le projet « Bancs de poissons ».

### III. L'utilisation d'outils paramétriques fortement recommandée

L'analyse précédente me permet de constater que dans six des sept projets, les outils paramétriques devraient presque certainement être impliqués. Dans le dernier projet, ce n'est pas la modélisation classique qui permet de trouver des variations plus intuitives, mais le fait qu'elles puissent également être réalisées à l'aide d'outils paramétriques. En fait, les outils paramétriques peuvent être essentiels pour obtenir plus de variations sur une courbe donnée.

Dans la partie simulation, Grasshopper peut également être utilisé comme outil pour démontrer l'efficacité du projet biomimétisme, car il permet d'analyser des facteurs qui ne sont pas possibles avec la modélisation classique. En particulier, il

montre le degré d'isolation généré par la forme du projet biomimétisme créé à l'aide du plugin « Ladybug ».

Les interventions de l'outil paramétrique dans le projet biomimétisme des étudiants, visibles dans les résultats ci-dessus, sont les suivantes :

1. Utiliser les outils paramétriques comme une alternative aux formes complexes ou répétitives à réaliser avec la modélisation classique, ou comme une méthode plus efficace et plus rapide par rapport à la modélisation classique.
2. Présenter les résultats des différentes performances du bâtiment en fonction de la modélisation créée (isolation structurelle, etc.) et démontrer que le bâtiment conçu selon les principes du biomimétisme est plus efficace qu'un bâtiment conventionnel.

Comme dans la section précédente, j'ai constaté que la forme a fait l'objet d'une grande attention. Sur les sept projets, quatre (57,14 %) ont utilisé des outils paramétriques pour créer des formes complexes. J'ai constaté que les outils paramétriques étaient fréquemment utilisés comme solution morphologique dans les projets de biomimétisme, bien qu'à un pourcentage inférieur par rapport au résultat global de 78 % de tous les projets.

Au total, 78 % des étudiants ont mis en œuvre une approche axée sur la forme dans leurs projets de biomimétisme, et dans la mesure où cette approche se traduit par une application correcte de la notion de biomimétisme dans la pratique, 4 projets sur 29 (13,79 %) ont montré une application architecturale correcte de la « fonction » du biomimétisme.

## 7. CONCLUSION

Dans la partie « EXPÉRIENCES », j'ai posé des questions et répondu à des questions sur l'intervention des outils paramétriques dans les projets de biomimétisme des étudiants et sur leur pertinence. L'analyse a été basée sur les projets biomimétiques présentés par les étudiants de l'ENSAPLV dans les cours de master qui se sont déroulés de 2018 à 2024. Les interventions des professeurs avec une expertise différente au sein du studio de projet et leurs opinions ont également été analysées, ce qui a permis de comprendre la base de départ donnée aux étudiants. Ensuite, j'ai analysé les projets des étudiants et les ai classés selon les critères de chaque section. Cela m'a permis d'obtenir des pourcentages et des conclusions sur les questions posées et, par conséquent, les résultats concernant l'endroit où les outils paramétriques ont soutenu les projets biomimétiques et ont eu une intervention significative.

### **Composants fréquemment utilisés pour réaliser le biomimétisme**

Les composants « Voronoï » et « Square » ont été les plus utilisés pour les analyses de base. Le composant « Square » a été plus fortement et plus fréquemment utilisé au niveau « Écosystème », où il s'est avéré excellent pour visualiser les connexions et les relations des parties caractéristiques, en particulier sur les grands sites. Le composant « Voronoï » a été fréquemment utilisé au niveau « Organisme » pour la forme de l'enveloppe du bâtiment ou des ouvertures. Le composant « Voronoï » a également été utilisé dans certaines parties de l'« Écosystème », et s'est avéré efficace pour montrer les connexions et les relations d'objets ayant les mêmes caractéristiques et distribués comme des points sur des frontières plus petites.

### **Domination de l'approche morphologique**

Les étudiants ont principalement choisi une approche morphologique pour leurs projets de biomimétisme, ce qui était également évident dans le modèle d'utilisation des outils paramétriques : 78,38 % de tous les projets étaient axés sur l'analyse et la mise en œuvre morphologiques. L'approche morphologique a

montré que les outils paramétriques ont été utilisés comme un outil pour décortiquer visuellement la notion de biomimétisme, avec une utilisation particulièrement active des motifs de Voronoï, qui sont morphologiquement intéressants et que l'on trouve souvent dans les modèles biologiques. Le composant « Voronoi » n'était pas difficile, surtout pour ceux qui découvraient Grasshopper, de sorte que de nombreux étudiants ont adopté cette méthode en raison de sa facilité d'accès. La force des outils paramétriques réside dans leur capacité à paramétriser une grande variété de formes, ce qui permet de créer efficacement des formes curvilignes ou des tâches répétitives. Le biomimétisme présentant souvent des formes mathématiques répétitives ou des formes courbes, comme les motifs de Voronoï ou les motifs fractals, il n'est donc pas surprenant que les étudiants se concentrent sur les aspects morphologiques des modèles biologiques.

### **Limites**

Tout d'abord, je pense que l'absence d'un professeur expert en biomimétisme a rendu difficile l'orientation claire des étudiants. En effet, le Dr Natasha Chayaamor Heil, experte en architecture biomimétique à l'Institut MAAC, a aidé les studios en 2018 et 2019, mais a cessé d'y intervenir après le deuxième semestre 2019. Par conséquent, les étudiants ont dû comprendre la notion de biomimétisme uniquement à travers une seule présentation. Les professeurs SILVESTRE et LOCICERO, qui ont dirigé la classe, n'étaient pas non plus des experts en biomimétisme, donc je pense qu'il y avait un manque de direction qui aurait pu permettre aux étudiants de mieux comprendre le biomimétisme.

Deuxièmement, il manquait du matériel sur les niveaux de biomimétisme spécifiques : il y avait un nombre écrasant de projets sur le niveau « Organisme » et très peu sur les niveaux « Écosystème » et « Confort », respectivement évalués 8 et 4. Comme ces projets étaient un mélange de projets de 2018 à 2024, il était difficile de vérifier si le nombre de projets attribués à chaque niveau correspondait au niveau préféré des étudiants. Pour compenser cela, il aurait fallu que je sache s'il y avait une intervention active d'experts en biomimétisme dans les studios chaque

année, ou s'il y avait une contrainte sur le niveau chaque année, mais ce que j'ai pu trouver, c'est qu'en 2020, en raison de la situation de la pandémie de la maladie au virus COVID, tous les étudiants ont travaillé sur le niveau « Écosystème ».

### **Implications pédagogiques**

Les résultats susmentionnés suggèrent la nécessité d'une compréhension globale de la notion de biomimétisme dans l'enseignement de l'architecture. On peut conclure que l'utilisation d'outils paramétriques pour résoudre des problèmes morphologiques est efficace. Cependant, j'ai fini par constater un manque de compréhension du biomimétisme. L'approche morphologique a du sens comme point de départ pour la recherche sur le biomimétisme, mais au-delà, une compréhension plus profonde des aspects fonctionnels et des processus est nécessaire. Par exemple, j'ai vu très peu de simulations fonctionnelles pour les projets : presque toutes les interventions avec des outils paramétriques étaient axées sur les aspects morphologiques, et seulement 4 projets sur 37 visaient à démontrer l'efficacité des projets de biomimétisme. Les outils paramétriques sont importants pour produire des résultats visuels, mais ils doivent être basés sur une compréhension précise du biomimétisme. Sans cela, la notion de biomimétisme se perd, car ils sont utilisés comme un outil pour l'intérêt morphologique sans prendre en compte les éléments clés du biomimétisme. C'est pourquoi les interventions d'experts en biomimétisme susmentionnées doivent être activement impliquées.

J'espère que les résultats de cette recherche serviront de ligne directrice à la prochaine génération d'étudiants de l'ENSAPLV sur la façon d'utiliser les outils paramétriques à l'avenir, et sur la manière dont leur niveau de compréhension du biomimétisme peut les aider à utiliser les outils paramétriques de manière efficace et appropriée. Les outils paramétriques sont efficaces pour réaliser le biomimétisme, mais un manque de connaissance du biomimétisme ne fera qu'aboutir à des projets paramétriques pour des formes atypiques.

**Orientations de la recherche à venir**

Un petit nombre de projets ont démontré la simulation de la forme et de la fonction, ce qui est le but des projets de biomimétisme. Comme cela n'est pas possible avec la modélisation classique, il semble qu'une compréhension plus large des interventions des outils paramétriques, qui vont de la forme à la simulation, soit nécessaire. Comme cette étude était limitée à des projets d'étudiants, il est probable qu'un modèle plus diversifié et plus précis de méthodologies serait trouvé si la recherche était menée parmi des professionnels qui maîtrisent Grasshopper ou qui ont une compréhension plus approfondie du biomimétisme.



## Annexe 1 \_ Classement des projet par niveau biomimétique

NIVEAU ECOSYSTEME							
Titre de projet	Modèle biologiques	Particularité	Sous-niveaux biomimétique	Script Grasshopper	Composants Grasshopper principaux	Année	Semestre
Spongillally		Écosystème de la chaîne alimentaire créée par les mouches	Forme Matériel	OUI	Populate 2D Voronoi	2021 - 2022	p913
Récifs d'éponges siliceuses		L'impact des éponges dans l'océan : Processus d'absorption des bactéries et émission d'eau propre	Forme	NON	division (Pas précis)	2021 - 2022	p913
Lagunes côtières d'eau salée		La corrélation qui commence à partir de la lagune et qui est formée par les humains et les animaux.	Forme Processus	OUI	Polar array Dispatch Ellipse	2021 - 2022	p913
Ecosystème du sol forestier	Forêt	La résilience des systèmes naturels se produisant au sein même de la forêt.	Processus Fonction	NON	Square Closest point	2021 - 2022	p913
Mont hydrothermal		L'écosystème près du Mont hydrothermal et la chaîne alimentaire qui en découle.	Processus	NON	Populate 2D Octree Project	2021 - 2022	p913
écosystème – Des bois morts qui regorgent de vie	Autre morts	Formation d'un écosystème entre arbres morts et nouvelles zones forestières	Forme Processus	OUI	Closest point Curve closest point square	2021 - 2022	p913
Laïsse de mer		Formation d'un écosystème à partir des résidus produits lors des marées hautes	Forme	NON	Square Surface from points Random	2021 - 2022	p913
Termitière		Les systèmes de termitières qui réagissent entre les arbres (Parce que les choses provenant des arbres sont utiles)	Processus	NON	Voronoi Populate 2D	2021 - 2022	p913

## 8. ANNEXES

NIVEAU COMPORTEMENT							
Titre de projet	Modèle biologiques	Particularité	Sous-niveaux biomimétique	Script Grasshopper	Composants Grasshopper principaux	Année	Semestre
Ronce Commune	Ronce commune	Système résultant du déplacement d'animaux et de polliniseurs selon la position du Ronce et de l'arbre.	Processus	OUI	Python Square	2021 - 2022	p913
Ensemble de pingouins		Minimisation de la perte d'énergie en partageant la chaleur de chacun.		NON	Diamond panels Sweep surface morph	2019	p913
L'abeille dans sa ruche	Abelles	육각형 형태의 벌집나이어는 벌들의 카뮤니케이션에 대한 집중	Forme Processus Fonction	NON	Polygon Surface morph	2023 - 2024	p7
Traces de bancs de poissons	Bancs de poissons	물고기 떠가 그을 수으로 만들 아니는 강로와 동선을 이용한 긴족	Forme Processus Fonction	NON	Surface difference Field	2023 - 2024	p7

NIVEAU ORGANISME						
Titre de projet	Modèle biologiques	Particularité	Sous-niveaux biomimétique	Script Grasshopper	Composants Grasshopper principaux	Année Semestre
Butterfly sports center	Peau des caméléons	Variation de couleur due aux changements de pores cutanés selon la température ambiante	Forme Processus Fonction	NON	Triangle Panels B Surface morph	2022 - 2023 P7
Forêt de la Courneuve	Alles de libellule &Sarracénie	Forme d'ales de libellule rappelant un système de stockage d'eau et la forme de Voronoi	Forme Processus Fonction	OUI	Voronoi Random reduce	2022 - 2023 P7
TOUNDRAClassification de Koppen : "ET"	Fourrure d'ours polaire	Création de diverses couches pour permettre une entrée de lumière appropriée et substituer l'excès de lumière par l'énergie stockée.	Forme Processus Fonction	NON	Interpolate series	2022 - 2023 P7
Lynx boréal	Cactus	Système de régulation de l'absorption de lumière des cactus	Forme Processus Fonction	NON	Surface box Surface morph	2019 P820
Climat Continental	Intestin	Diverses réactions chimiques se produisant de la bouche à l'anus	Forme	NON	Ellipse Blend curve	2021 - 2022 P913
	Fourrure d'ours polaire	Séparation entre les parties recevant la lumière et celles capables de stocker l'eau qui coule	Forme Processus Fonction	OUI	Evaluate surface Voronoi 3D	2019 P820
	Lynx boréal	Système d'assemblage permettant de réguler la résistance au froid et aux conditions extrêmes du bâtiment en utilisant le système pileux du lynx	Forme Processus Fonction	NON	Mesh ray Voronoi	2019 P820
	Pomme de Pin	Système de régulation de la lumière utilisant des pommes de pin et stockage de chaleur à travers une double enveloppe	Forme Matériel Processus	NON	X	2019 P913
	mojoch horridus	Système de lumière utilisant la peau du mojoch horridus et des trous permettant le stockage d'eau	Forme Processus Fonction	NON	Voronoi Populate Surface morph	2019 P913
Plumage du manchot empereur	Plume de pingouin	Stockage de chaleur grâce à un système de plumes inspiré par celui des pingouins et par les différentes couches	Forme Processus Fonction	NON	je ne sais pas	2019 P913
	Stomata	Imitation de la régulation de la taille des stomates, pour évacuer l'eau ou recevoir la lumière nécessaire à la photosynthèse	Forme	NON	Voronoi Populate 2D Surface morph	2018 P913

Cloudy City	Peau des caméléons	Variation de couleur due aux changements de pores cutanés selon la température ambiante	Forme	OUI	OCTree Populate 3D surface morph Triangle panels B	2018	P913
Cactus Centre commercial et marché couvert	Cactus	Création de diverses couches (elles que celles des cactus... après je ne sais pas trop ce qu'il voulait)	Forme Processus	NON	Diamond panels	2018	P913
	Paroi cellulaire	Système de circulation passant à travers les passages existants entre les parois cellulaires.	Forme Processus	NON	Quad panels Populate 2d + interpolate Solid difference	2018	P913
	Cladiella Suezensis	Approche morphologique simple (manque de matériel d'approche bionimétique)	Forme Matériel	NON	Mash ray Multi pipe	2023 - 2024	P7
Pavillon des arts: "Antre culturelle vivre l'art au cœur de la communauté	Physarum	La connexion au réseau de Physarum, la spatialisation avec l'exploration	Forme Matériel	OUI	Divide surface ou square Pull point Surface morph Voronoi Populate 2D	2023 - 2024	P7
Centre de recherche des fonds marins	Crabe	Système de ventilation et de contrôle de la lumière inspiré des tissus de la peau de crabe	Forme Matériel	NON		2023 - 2024	P7
Speed park	Sea slug	Composer des formes architecturales avec la forme douce de la limace de mer	Forme Matériel	NON	X	2023 - 2024	P7
Le musée aux bulles	Haworthia	Composition de formes inspirée de la morphologie de l'Haworthia	Forme	NON	Mash ray Solid difference	2023 - 2024	P7
Biomimétisme - Nurse log/ Tronc-Nurserie	Tronc d'arbre	Finition extérieure inspirée des arbres et des troncs	Forme Matériel Processus	OUI	L-system (Rabbit) Turtle (Rabbit)	2023 - 2024	P7
	Carapace de tortue	Application d'une forme dérivée d'une carapace de tortue à une forme de voronoi	Forme Processus	OUI	Voronoi	2023 - 2024	P7
Musée dans le quartier de Bondy	Peau des caméléons	Utilisation de la géométrie trouvée lorsque vous zoomez sur la peau du caméléon.	Forme Processus	NON	Populate 2D Voronoi	2023 - 2024	P7
UN MARCHÉ sous L'OMBRELLE	méduse lunaire	Reprendre le système de circulation d'eau de la structure interne de la méduse lunaire et le réappliquer au système de circulation d'air du bâti	Forme Matériel Processus	OUI	Mesh surface Bouncy solver Anchor	2023 - 2024	P7

Annexe 2 \_ Fréquentation des composants de Grasshopper par Daniel Davis (2011)

11842	Number Slider
7046	Panel
5494	Group
4626	List Item
2367	Curve
2362	Point
2179	Line
2164	Move
1669	Scribble
1553	Series
1496	Point XYZ
1418	Receiver
1313	Unit Z
1211	Cull Pattern
1163	F1
1155	Evaluate Length
1079	Divide Curve
1060	Number
1019	Graft Tree
941	Multiplication
896	Surface
858	Sketch
855	List Length
834	Param Viewer
830	Division
821	Integer
816	Flatten Tree
810	Unit Y
745	End Points
732	Loft
730	Decompose
716	Shift List
692	Extrude
689	Addition
635	Catenary
611	Unit X
602	Line SDL
597	Domain

557	Interpolate
552	Distance
547	Dispatch
483	Path Mapper
472	Vector 2Pt
466	F2
457	Rotate
449	Join Curves
443	Subtraction
441	PolyLine
429	Brep Area
400	Simplify Tree
391	Boolean Toggle
386	Circle
384	Tree Branch
383	Evaluate Curve
379	4Point Surface
376	Brep
370	Planar Srf
366	Offset
364	Geometry
364	Sort List
362	Range
361	Merge
358	Sub List
346	Brep Components
329	XY Plane
309	Divide Surface
301	Isotrim
296	Explode
295	Cull Index
291	Evaluate Surface
287	Point On Curve
274	Length
273	Divide Domain_
272	Vector XYZ
270	Clean Tree
270	VB Script
269	Custom Preview
266	Rectangle
265	Flip Matrix

263	Random	
259	Mass Addition	
253	Curve CP	
249	Cluster Input	
246	DotNET VB Script	
245	Mesh	
236	Amplitude	
222	Rotate 3D	
218	Bounding Box	
217	Project	
216	Curve   Curve	
214	Split List	
212	Orient	
211	Data	
203	Circle CNR	
201	Square	
193	Scale	
188	Reverse List	
186	Graph Mapper	
183	Surface CP	
181	Plane	
177	Weave	
176	Equality	
176	Cluster Output	
173	C# Script	
172	Cull Nth	
167	Duplicate Data	
167	Text Tag 3D	
165	Minimum	
163	Flip	
160	BRep Components	
159	Perp Frame	
158	Pi	
155	Larger Than	
155	Pipe	
155	Sweep1	
154	Box Corners	
146	Sphere	
146	Merge Multiple	
137	Colour Swatch	
135	Vector Display	
134	Plane Normal	
130	Control Points	
130	Replace Branches	
129	Point List	
128	Rotate Axis	
127	Cap Holes	
125	Center Box	
123	Scale NU	
122	Perp Frames	
121	Domain Components	
120	Bounds	
112	Angle	
110	Stream Filter	
109	Reverse	
108	Multiply	
101	Surface Split	
100	Brep Edges	
100	F3	
99	List Insert	
98	Smaller Than	
98	Random Reduce	
98	Mesh Brep	
97	Voronoi	
97	XZ Plane	
97	Remap Numbers	
96	YZ Plane	
93	Pan	
93	Divide Length	
93	Variable Expression	
93	DotNET VB Script (LEGACY)	
91	Explode Tree	
91	Vector	
89	BRep Area	
89	Maximum	
88	Brep   Plane	
88	Line   Plane	
87	Solid Difference	
87	Curve   Plane	
85	Cluster	
85	Closest Point	
83	Plane Components	

81	Domain_ Components
78	Brep Join
78	Plane 3Pt
78	Mirror
77	BRep
74	Sub Curve
74	Inside
73	Iso Curve
72	Timer
72	Rotate Plane
72	Center
71	Fillet
71	Discontinuity
71	Rectangular
69	Poly Line
69	Polygon
69	String
68	Boolean
68	Brep   Brep
67	Concatenate
64	Gradient
64	Plane Srf
64	Image Sampler
63	Merge 03
63	Repeat Data
63	Jitter
61	Edge Surface
60	Curve On Surface
59	Average
59	Gate Not
58	Delaunay Mesh
58	Similarity
57	Box Morph
55	Text Tag
54	BRep   Plane
54	Box
54	Negative
52	Value List
52	Sort Points
51	Square Root
51	KangarooPhysics
51	Interval Box
51	SL
50	Create Set
50	Map to Surface
50	Reference by layer
48	Brep Wireframe
48	Unit Vector
47	Evaluate Box
46	SpringsFromLine
46	Align Plane
45	Domain_
45	Surface From Points
45	DotNET C# Script
44	Radians
44	Trim Solid
43	Data Path
43	Brep Volume
42	MD Slider
42	Python Script
42	Trim with Region
42	String Split
42	Closed
42	Arc 3Pt
41	Create Branch
40	Divide
40	Box 2Pt
40	Decompose Branch
40	Split ARGB
40	Orient Direction
40	Tree Item
38	Galapagos
38	BRep   BRep
36	BRep Wireframe
36	DotNET C# Script (LEGACY)
35	Modulus
35	Ellipse
35	Interval
35	DataPanel
35	Cylinder
34	Solid Intersection
33	Brep CP

33	Read File	24	Split Tree
33	Divide Surface [OBSOLETE]	23	Loft Options
33	Plane Origin	23	Int Slider
32	Mesh edges	23	Arc SED
32	Display	21	Divide Distance
32	Null Item	21	Catmull-Clark Subdivision
32	Sweep2	21	Relative Item
32	Surface Frames	21	removeDuplicatePts
31	Cross Product	21	Point Polar
31	Containment	20	Cosine
31	Index	20	Divide Domain
30	Box Components	20	BRep Volume
30	Solid Union	20	Mirror Curve
29	Face Vertices	19	Arc
29	Includes	19	Kangaroo Settings
29	Quick Graph	19	Delaunay Edges
28	Integer Slider	19	Gate And Ternary
28	Mean	19	Mesh Thicken
28	Region Difference	18	Power
28	Rebuild	18	Mesh Explode
27	Vector Length	18	Geodesic
27	Extend	18	Pull Point
27	Region Intersection	18	Partial Flatten
27	Mesh Surface	18	Mesh Quad
27	Shatter	18	Absolute
27	Hexagonal	18	Polygon Center
27	Planar	17	Horizontal Frames
26	sdrTessellation	17	File Path
26	Data Panel	17	Mesh   Plane
26	Plane CP	17	Summation
26	Surface Box	16	Convex Hull
26	Mesh Colours	16	Integer Division
26	Point Oriented	16	removeDuplicateLines
26	Surface Morph	16	Simplify Curve
25	Gate And	16	Split with Breps
25	Mesh Join	16	Mesh Components
25	Sine	16	X Size
24	Face Polylines	15	PowerLaw
24	Gate Or	15	Item Index
24	Join Meshes and Weld	15	Mesh Triangle
24	Extrude Point	15	UnaryForce

15	Bezier Span
14	Offset on Srf
14	Surface   Curve
14	String Trim
14	SubString
14	Transform
14	Triangular
14	Divide Interval_
14	Dimensions
13	Bounds 2D
13	EcoMeshExport
13	ControlPolygon
13	Line   Line
13	Curve   Line
13	Guid
13	Set Union
13	EcoLink
12	HoopSnake
12	EcoSolCal
12	Decompose Mesh
11	Spherical Cloud
11	String Join
11	interconnectPoints
11	Reduce
11	sdrSweepProfile
11	Tangent
11	Surface Points
10	Brep   Curve
10	List Replace
10	Set Difference (S)
10	Bar Graph
10	Mesh BRep
10	Flatten one level
10	Pick'n'Choose
10	Plane Offset
9	Interval Components
9	Curvature
9	Create Material
9	EcoObjectRequest
9	Revolution
9	Region Union
9	Member Index
9	Horizontal Frame
9	Gate Or Ternary
8	Rectangle 3Pt
8	Create Shader
8	Lil Panel
8	Curve Frames
8	Settings (Custom)
8	Shader
8	PullToSurf
8	Mass Multiplication
8	Proximity 3D
8	Facet Dome
8	Picture Frame
8	Align Planes
8	Mesh Plane
8	WeaverBird's Catmull-Clark Subdivision
8	Vertices Component
8	Info Panel
8	SQL Query
8	Notes Panel
8	Plane Fit
7	Mesh Box
7	Create Complex
7	Delete Consecutive
7	Face Components
7	Degrees
7	Set Difference
7	U Count
7	Plane   Plane
7	Colour RGB
7	Trim with Regions
7	Image Gallery
7	Line SV
7	Digit Scroller
7	Principal Curvature
7	Trim Inclusion
7	Untrim
7	MetaBall(t)
6	Number Slider integer

6	Post It
6	V Count
6	Brep   Line
6	Offset Loose
6	Extent X
6	Cone
6	Spatial Deform
6	A2Ddeg
6	Grid Rectangular
6	Prune Tree
6	Circular Arc
6	Interval_ Components
6	Mesh Sphere
6	Trim with Brep
5	Mesh FromPoints
5	Split with Brep
5	Mesh Area
5	Surface   Line
5	Colour
5	NurbsCurve
5	B
5	Gate Nor
5	Interval_-
5	Curve MidPt
5	Line + Pt
5	Circle 3Pt
5	Mesh Flip
5	Write Database
5	Twisted Box
5	Area
5	Extremes
5	Reroute Faces
5	MeshNakedEdge
5	Mesh NakedEdge
5	Mesh Shadow
5	New Range
5	Rail Revolution
5	sdrPolyhedron
4	ssiGSANodeAtts
4	Diffuse
4	ssiGSACreateOrFindNode
4	InEllipse
4	F8
4	Colour CMYK
4	Curve Frame
4	Point-Load-Builder
4	PolyArc
4	WeaverBirdís Window
4	Number Slider 0/10
4	EcoWeatherFile
4	Geometry Cache
4	MetaBall(t) Custom
4	Seed
4	Replace String
4	Vector Field Integration
4	Dot Product
4	Golden Ratio
4	BRep   Line
4	Trim with Breps
4	Shear Angle
4	WeaverBirdís Mesh Boolean Union
4	Random LolCat
4	Fillet Distance
4	Constant Quads Subdivision
3	Compound
3	Chenge Axis
3	Data Paths
3	Int Slider 15
3	Assembly
3	Curve Midpoint
3	Assign Paths
3	Shift
3	Complex Modulus
3	Local Code Export
3	Support-Builder
3	Sequence
3	Surface Frames [OBSOLETE]
3	ssiGSACreateList
3	Interpolation
3	EcoSolRequest

3	Analysis
3	Complex Components
3	Shortest Walk
3	WeaverBirdís Mesh Prism
3	Extrude Linear
3	Geometry2Structure
3	ggInflateMesh
3	Power of 2
3	Smooth Polyline
3	Domain end
3	Point B
3	L MDL
3	Base
3	Step
3	Factor
3	WeaverBirdís Picture Frame
3	Pie Chart
3	Srf
3	Content
3	Target
3	QuadTree
3	Blend Box
3	Fit Circle
3	Bevel Edges
3	Min-Max
2	Curve D
2	ARGB Fractional
2	ssiSOFCreateOrFindNode
2	Curve C
2	ssiGSACreate Fabric Property
2	Edges Component
2	ssiSOFCreateSectionProp
2	Vortex Dynamic
2	Y
2	Mesh WeldVertices
2	NakedVertices
2	Substrate
2	Settings (Speed)
2	Consolas Font
2	Split
2	Curvature Graph
2	ssiSOFBeamAtts
2	If-Then
2	Z
2	Laplacian Smoothing
2	If-Then-Else
2	Points
2	ssiGSACreate Fabric Material
2	Data Address
2	Issue Panel
2	sdrGenerateUnivBeam
2	Remove Duplicate Points
2	ssiGSAAnalysis Case
2	ssiGSASolver
2	ssiGSAAnalysis Form Find
2	Radial Array Plane
2	Match Path Structure
2	Line + Line
2	IsoVist
2	Dash Pattern
2	Vertices
2	Stream A
2	Static Settings
2	RhinoNest - Nesting
2	RhinoNest Object
2	Grid Hexagonal [OBSOLETE]
2	ssiGSAMeshConvertFiniteElements
2	Curve B
2	Curve A
2	ssiSOFCreateBeam
2	Wrap
2	RhinoNest - Object Criterion
2	Size Y
2	RhinoNest Sheet by Curve
2	Shear
2	ssiGSALoadCase
2	ssiGSASettlementLoad
2	RhinoNest - Object Freedom
2	Split Polygons Subdivision
2	L MS
2	VB.NET Script

2	Equalize
2	CollideSurf
2	Divide Interval
2	Mesh   Ray
2	InfoPanel
2	VertexNeighbours
2	Size
2	Set camera
2	Settings (Quality)
2	Exposure
2	Mesh Union
2	ArcTangent
2	Wanted path
2	One Over X
2	Dynamic Vector Field Integration Simulation
2	Legend
2	Rest Length
2	Get Layer Names
2	Start
2	Get camera
2	Sphere Fit
2	Branch Compare
2	Segments
2	minimal BBox
2	Knot Vector
1	Compare
1	Line from Center
1	Mask
1	PathGen
1	Mesh AddAttributes
1	Spreadsheet Out
1	Domain start
1	List Min Max
1	sdrCurvesSplitIntersect
1	sdrNetworkPolygons
1	Sierpinski Triangles Subdivision
1	Support
1	Inner Polygons Subdivision
1	Vortex
1	RemoveDuplicateLines
1	RhinoLayers
1	ExtractAttr
1	Input
1	WeaverBird's Constant Quads Subdivision
1	Sort Strings
1	digit-ill text
1	sdrConvCurve
1	0-10 Slider
1	0-100 Slider
1	0-1 Slider
1	Stream Gate
1	SerialRead
1	Read Database
1	tsMeshToBrep
1	IDs of group
1	Mesh ConvertQuads
1	Orient Two Point
1	info display
1	Gate Xor
1	Diagrid Cells on Surface
1	Pressure
1	Kangaroo Options
1	Get Items on Layer
1	Mesh From Points
1	Logarithm
1	Curve to Vector
1	Swap surface UV
1	AdjCrvSeam
1	sdrGeoDome
1	Separate list of 4
1	Mask Maker
1	Duplicate Point Cull Pattern
1	Complex Argument
1	Fibonacci
1	Width
1	Mesh Intersection
1	Mesh Volume
1	Geometry Gym Proximity Points

1	Freeform Cloud
1	Sweep2rails closed curves
1	ssiGSAGravityLoad
1	Curve   Self
1	ssiGSABakeStructure
1	Adjust
1	Mesh Pyramid
1	SubIterations
1	ssiSOFMeshConvertFiniteElements
1	Planarize
1	ssiSOFCreate Fabric Material
1	ssiSOFCreate Eurocode Steel
1	Loft [OBSOLETE]
1	Separate List [OBSOLETE]
1	Grid Rectangular [OBSOLETE]
1	Sinc
1	ssiRobotBakeStructure
1	Degrees-Radians
1	ssiSOFBakeStructure
1	Find and Replace
1	Width count
1	MetaBall
1	ssiSOFCreate 2d Finite Element Prop
1	Occlusion
1	Radial
1	Mirror Surface
1	PosNeg
1	Split AHSV
1	Bend
1	IntegerSlider
1	Hex Cells on Surface
1	AHSV
1	Mesh Split Plane
1	Local Code Import
1	InputSingleItem
1	Separators
1	PCLines
1	0.000-1.000 Slider
1	NotesPanel
1	FitCrv
1	Replace Members
1	Average Curves
1	Mesh Prism
1	Mesh AntiPrism
1	Laplacian
1	Round
1	EqualizeN
1	Range for Rotate
1	SubSet
1	Minimal Surface
1	Surface Curvature
1	Simplify All
1	CMid
1	GradInRad
1	Second Number
1	Copy Trim
1	Dynamic Settings
1	Axis
1	Explode Outward
1	MeshFromPoints
1	String Length
1	Meshes
1	Volume
1	Clip Tree
1	Bake Attributes
1	Point Cylindrical
1	Int Slider 4

### Annexe 3 \_ Analyse des projets à l'aide des composants de « Voronoi »

		Image de projet	Particularité en ce qui concerne Voronoi	Lumière	Réaction ex/intérieure	stockage d'eau	Couches	Support de végétation
Spongillality	Populate 2D Voronoi		Construction de la forme du jardin en utilisant la forme de Voronoi, aucun système biomimétique spécial n'a été trouvé.					
Récifs d'éponges siliceuses	Voronoi Populate 2D		Les limites de chaque entité dans la mer sont définies sous la forme Voronoi et la circulation de chaque frontière est réorganisée dans la ligne Delaunay.					
Termitière	Voronoi Populate 2D		Les nids de termites, répartis dans la savane sont utilisés comme points aléatoires pour construire des formes de Voronoi et pour observer les changements dans la zone environnante.					
Alles de libellule & Sarraénie	Voronoi Random reduce		Contrôle la forme et l'intensité de la lumière à l'aide du motif Voronoi et les bords de la forme encouragent l'eau à s'écouler et à être stockée.					
Fourrière d'ours polaire	Evaluate surface Voronoi 3D Surface closest point		En utilisant Voronoi 3D, nous créons un mécanisme qui permet à la neige de se transformer en eau et de s'écouler en créant des espaces entre les deux.					
Lynx boréal	Mesh ray Voronoi		Utilisé comme mesure contre le froid en contrôlant la lumière naturelle grâce à la forme Voronoi.					
Moloch horridus	Voronoi Populate 2D Surface morph		Un système qui peut stocker efficacement l'eau en utilisant la forme citadelle de Moloch horridus tout en créant une structure en utilisant la forme Voronoi.					
Stomatia	Voronoi Populate 2D surface morph		Un pilier est créé au centre de Voronoi, et le pilier reçoit la lumière et permet un mouvement vertical.					
Crabe	Surface morph Voronoi Populate 2D		Un toit qui contrôle la lumière est construit sur la base de la composition de cellules de châine utilisant Voronoi. De plus, l'ouverture visuelle est assurée par des murs poreux.					
Carapace de tortue	Voronoi		La forme Voronoi est utilisée pour transmettre la lumière dans l'espace vers central. Observez une lumière adéquate en utilisant des pièces bloquées et ouvertes.					
Peau des caméléons	Populate 2D Voronoi		Il utilise la forme Voronoi pour laisser passer la lumière et maintient le contrôl thermique. Il permet également de donner de la lumière aux plantes à l'intérieur.					
				6	8	3	8	3

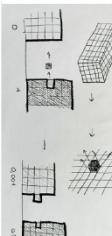
## Annexe 4 \_ Analyse des projets à l'aide des composants de « Square »

### Particularité de l'utilisation de « Voronoi »

Essentiellement, il existe deux grandes façons d'utiliser le Voronoi. Il peut être utilisé pour traiter l'éclairage intérieur en laissant passer la lumière, ou en présentant des motifs de structure capable de supporter les plantes intérieures. Alternativement, les modules Voronoi peuvent être utilisés comme système de stockage d'eau en laissant l'eau s'infiltrer à travers les bords des modules. De plus, il est utilisé pour former la relation entre l'extérieur et l'intérieur en utilisant une structure poreuse.

### Particularité de l'utilisation de « Square »

Dans les projets utilisant principalement des composants de la zone Square ou Divide, le travail consiste principalement à simplifier visuellement les vastes zones pour une analyse simplifiée. Après avoir pixelisé l'unité minimale de la zone, chaque analyse est menée sur la base des objets biomimétiques apportés individuellement pour cette zone. Bien que les analyses individuelles varient, elles présentent visuellement des motifs similaires. Pour réaliser cela, une carte basée sur Square est utilisée.

			Organisation de l'écosystème	Relation
Forêt	SquareClosest point		Organiser l'écosystème environnant autour des arbres comme référence et quantifier la distance entre cet écosystème et celui des autres arbres en utilisant des carrés.	
Arbre morts	Closest point Curve closest point square		Utiliser Square pour séparer l'écosystème des arbres morts de l'écosystème des jeunes arbres, puis utiliser Closest pour créer un nouveau groupe d'arbres morts.	
Laisse de mer	Square Surface from points Random		Lorsqu'un élément se déplace d'un bloc à l'autre, il affecte non seulement la géométrie du bloc, mais aussi la densité, qui est recalculée après chaque déplacement.	
Ronce commune	Python Square		Utiliser Square comme référence pour les arbres et les fruits, puis visualiser les mouvements des animaux.	
Physrum	Divide surface ou square Pull point		Réalisation de la structure de colonnes carrées utilisant Square, favorisant la connectivité entre le haut et le bas. Cela représente la connectivité de chaque étage.	3
				4

## Annexe 5 \_ Analyse des projets à l'aide de sous-niveaux biomimétiques

Sous-niveaux supplémentaires						
Niveaux de Biomimétisme	Modèle biologique	Forme	Matériel	Construction	Processus	Fonction biomimétique
Syngénétisme						
Syngénétal						
Récifs, d'éponges siliceuses	Voronoi Populat. 2D	Division de la forme du parc utilisant Voronoï	Végétation	Jardin, esp. espace public	Non pertinent	Non pertinent
Lagunes côtières d'eau salée	Polar array Dispatch Ellipsoïde	Création de parois externes en utilisant l'agrandissement de la peau d'orange pour former des formes	Perçage du sol	Non pertinent	Système d'interaction des clusters d'éponges	Non pertinent
Forêt	Square Closest point	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Interactions écosystémiques entre la Forêt et les entités externes	Non pertinent
Mont hydrothermal	Populat. 2D Octree Project	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Création d'écosystèmes générés par chaque individu d'arbre	Bio-inspiration
Autre morts	Closest point Curve closest point	Conception d'habitat pour un animal des sous-sols (qui lutte pour ses proches et qui échappe pour les étrangers).	Non pertinent	Non pertinent	Chaine alimentaire autour des monts hydrothermaux	Bio-morphologie
Laisse de mer	Square Surface point Bézier	Implémentation d'un écosystème de connexion entre les autres morts, les jeunes arres et les clusters d'arres	Non pertinent	Non pertinent	Bio-morphologie Bio-contextualisation	Bio-morphologie
Terrière	Voronoi Populat. 2D	Disposition précise.	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Bio-morphologie Bio-contextualisation
Roue commune	Python Square	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Construction d'un système de circulation écologique centré sur les fourmilières blanches	Bio-morphologie
Ensemble de pingouins	Diamond barrels Sweep surface morph	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Un système de déplacement des animaux autour de l'éco-système forestier	Bio-morphologie
Abellies	Pythag. Surface morph	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Mettre en place un mécanisme permettant aux marchands empereurs de se rassembler et de partager la châteleur.	Bio contextualisation
Bank de poissons	Surface difference Field	Forme de déplacement vertical et rotationnel de bancs de poissons.	Non pertinent	Gallery, repos, Ciné	Luminosité en forme de ruche, légèreté structurale, communication sociale	Bio-morphologie
					Mise en place de trajectoires en réponse aux mouvements de tourbillon des poissons	Biomimétisme Bio-morphologie

Péau des camélions	Triangle Panneaux B Surface morph	Voronoi Random reduce	Non pertinent	Complexe sportif	Captation de la lumière du soleil selon l'ouverture des pores des cellules végétales
Allée de libellule & Surracche		Tot en motif Voronoi.	Non pertinent	Restaurant, Jardin	Régulation de la lumière solaire utilisant la forme de Voronoi
Fournie d'ours polaire	Interpolate series				
Cactus	Surface box Surface morph	Tot à quatre pans de chaume. Cylindre avec un motif répétitif.	Non pertinent Non pertinent	Motif de forme du cactus	Effet isolant utilisant les multiples couches de poils de l'ours polaire
Insectin	Ellipe Blend curve		Non pertinent		Disposition de quatre couches de fibres sur le toit pour la gestion de la lumière solaire
Fournie d'ours polaire	Evaluate surface Voronoï 3D	Représentation architecturale de la coupe transversale d'un insecte.	Non pertinent		
Luna boréal	Mesh ray Voronoi	Forme modifiée de demi-cercle + porosité.	Non pertinent		Construction d'un système filtrant la neige utilisant un motif répétitif et de Voronoi avec une isolation ajoutée par de multiples couches.
Pomme de Pin	X	Fenêtres de toit répétées.	Non pertinent		
Mosch horridus	Voronoi Populaire Surface morph	Utilisation d'une structure de fenêtres de toit en motif Voronoi.	Non pertinent	Double couverture utilisant des membranes Voronoi	Biomimétisme
Plume de pingouin	Je ne sais pas	Non pertinent	Non pertinent	Regulation de la lumière solaire en utilisant la forme répétitive de la peau de sapien	Bio-morphologie
Somaria	Voronoi Populaire 2D Surface morph	Utilisation d'une structure de fenêtres de toit en motif Voronoi.	Non pertinent	Création de structures en utilisant la peau de Mosch horridus	Biomimétisme
Peau des camélions	OCTree Populaire 3D surface morph Triangle panneaux B	Non pertinent	Non pertinent	Reduction des pertes de chaleur en disposant l'enveloppe de manière similaire au système de l'abeille carpenterie.	Bio-morphologie
Cactus	Diamond panels	Enveloppe simplifiée inspirée de la peau de cactus.	Vitre	Système de transfert de chaleur vers l'intérieur ???	Bio-morphologie
Protocellulaire	Quid sauf Populaire 2D / Interpolate Sous différence	Grille des murs.	Non pertinent	La formation du processus d'échange d'énergie entre les parois cellulaires	Bio-morphologie

<i>Cladella Suensis</i>	Nest ray Multi pipe	Coupe en utilisant la surface de Cladella Suensis.	Vitre, structure métallique, béton	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent
<i>Physarum</i>	Dvide surface ou aqure pur point	Structure quadrille.	Béton	Exposition	Non pertinent	Non pertinent
<i>Crabe</i>	Surface morph Voronoi Populite 2D	Plan utilisant une forme de pince.	Végétation	Laboratoire, Bibliothèque, salle polyvalente	Non pertinent	Non pertinent
<i>Sea slug</i>	X	Ouverture incurvée utilisant la forme de la limace bleue de mer.	Végétation Bois	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent
<i>Haworthia</i>	Nest ray Solid difference	Configuration inspirée de la forme de Haworthia.	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Bio-philic Bio-morphologie
<i>Tronc d'arbre</i>	L-system [Rabbit]	Utilisation du système L pour envelopper le bâtiment de l'igé.	Bois	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent
<i>Crapace de tortue</i>	Voronoi	Enveloppe décrite de motifs de Voronoi.	Non pertinent	Système de ventilation utilisant la forme des racines d'arbres, régulation de la lumière à travers les branches d'arbres.	Non pertinent	Bio-philic Bio-morphologie
<i>Peau des caméléons</i>	Populite 2D Voronoi	Ajout d'une couche Voronoi inspirée de la peau du caméléon.	Non pertinent	Système d'éclairage naturel utilisant Voronoi	Non pertinent	Bio-morphologie
<i>meduse lunaire</i>	Mesh surface Bounce solver Animo	Installation de voiles mobiles sur le toit.	Voile	Enveloppe du bâtiment composée de plusieurs couches tées que les couches cellulaires du caméléon, utilisant la forme Voronoi	Non pertinent	Possibilité de changer la direction de la circulation de l'air en fonction de la température.

<i>Cladella Suensis</i>	Nest ray Multi pipe	Coupe en utilisant la surface de Cladella Suensis.	Vitre, structure métallique, béton	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent
<i>Physarum</i>	Dvide surface ou aqure pur point	Structure quadrille.	Béton	Exposition	Non pertinent	Non pertinent
<i>Crabe</i>	Surface morph Voronoi Populite 2D	Plan utilisant une forme de pince.	Végétation	Laboratoire, Bibliothèque, salle polyvalente	Non pertinent	Non pertinent
<i>Sea slug</i>	X	Ouverture incurvée utilisant la forme de la limace bleue de mer.	Végétation Bois	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent
<i>Haworthia</i>	Nest ray Solid difference	Configuration inspirée de la forme de Haworthia.	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Bio-philic Bio-morphologie
<i>Tronc d'arbre</i>	L-system [Rabbit]	Utilisation du système L pour envelopper le bâtiment de l'igé.	Bois	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent
<i>Crapace de tortue</i>	Voronoi	Enveloppe décrite de motifs de Voronoi.	Non pertinent	Système de ventilation utilisant la forme des racines d'arbres, régulation de la lumière à travers les branches d'arbres.	Non pertinent	Bio-philic Bio-morphologie
<i>Peau des caméléons</i>	Populite 2D Voronoi	Ajout d'une couche Voronoi inspirée de la peau du caméléon.	Non pertinent	Système d'éclairage naturel utilisant Voronoi	Non pertinent	Bio-morphologie
<i>meduse lunaire</i>	Mesh surface Bounce solver Animo	Installation de voiles mobiles sur le toit.	Voile	Enveloppe du bâtiment composée de plusieurs couches tées que les couches cellulaires du caméléon, utilisant la forme Voronoi	Non pertinent	Possibilité de changer la direction de la circulation de l'air en fonction de la température.

## Annexe 6 \_ Analyse des projets biomimétiques des étudiants

### Le rôle des outils paramétriques dans l'architecture

Modèle biologique	Particularité	Particularité dans Grasshopper	1)	2)	3)	Besoin de paramétrique?
Forêt	la résilience des systèmes naturels se produisant au sein même de la forêt.	Dans le contexte urbain, il est possible d'analyser divers écoulements de connexion et de relations urbaines en paramétrisant plusieurs analyses.				OUI
Bancs de poissons	Application within buildings using the paths and movements created by schools of fish by group swimming	Ce projet de bio-inspiration est fortement axé sur l'approche morphologique, et en termes d'efficacité pratique, il est jugé plus approprié d'utiliser des transformations de courbes basées sur l'historique des enregistrements.				NON
Peau des caméléons	Variation de couleur due aux changements de pores cutanés selon la température ambiante	En raison du problème de l'insertion de motifs se formant de manière répétitive sur la surface courte, la flexibilité des outils paramétriques est requise.				OUI
Fourniture d'ours polaire	Création de diverses couches pour permettre une entrée de lumière appropriée et substituer l'exécès de lumière par de l'énergie stockée.	Il est recommandé d'utiliser le plugin Grasshopper [ladybug] pour confirmer la forme complexe des polis tout en vérifiant sur effet isolant.				OUI
Fourniture d'ours polaire	Séparation entre les parties recevant la lumière et celles capables de stocker leu qui coule	Pour réaliser des formes tridimensionnelles de Voronoi et former des motifs de porosité utilisant l'algorithme, l'aide de Grasshopper est largement nécessaire.				OUI
Plume de pingouin	Stockage de chaleur grâce à un système de plumes inspiré par celui des pingouins et par les différentes couches	Dans le processus de remplacement des formes de polis générées aléatoirement par des masses géométriques, l'utilisation d'outils paramétriques est nécessaire. De plus, des problèmes complexes de treillis de toit peuvent être résolus à l'aide du plugin Lunchbox.				OUI
méduse lunaire	Réutilisation du système de circulation d'eau de la structure interne de la méduse lunaire pour le système de circulation d'air du bâtiment.	Bien qu'elle soit simple du point de vue de la forme, cette structure est efficace. Cependant, le plugin Kangaroo est utilisé pour démontrer le mécanisme de la circulation de l'air.				OUI

## 9. BIBLIOGRAPHIE

1. Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design, Patrik Schumacher, 2008
  2. Le pinceau du requin : le biomimétisme et comment la nature inspire l'innovation, Jay Harman, 2013
  3. Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement, Patricia Ricard, 2015
  4. Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils, Natasha Chayaamor-Heil, François Guéna, 2018
  5. Comité technique : ISO/TC 266 Biomimétique. ISO/TC266 18458:2015 : Biomimétique - Terminologie, concepts et méthodologie ; ISO : Genève, Suisse, 2015.
  6. Wanieck, K. ; Fayemi, P.-E. ; Maranzana, N. ; Zollfrank, C. ; Jacobs, S.R. Biomimetics and its tools Bioinspir. Biomim. Nanobiomater. 2017
  7. Chakrabarti, A. ; Sarkar, P. ; Leelavathamma, B. ; Nataraju, B.S. A functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas Artif. Intell. Eng. Des. Anal. Manuf. AIEDAM 2005, 19
  8. Vattam, S.S.; Goel, A.K. Seeking bioinspiration online: A descriptive account. In Proceedings of the International Conference on Engineering Design, Seoul, Corée du Sud, 19-22 August 2013.
  9. Pratiques et champs biologiques, pièces manquantes du puzzle méthodologique de la biomimétique, Eliot Graeff, Nicolas Maranzana, 2020
  10. Paramétrage, 建築百科事典, 2021
  11. Un nouveau style mondial, Patrik Schumacher, 2008
  12. Analyse de cas et examen de l'applicabilité de la conception paramétrique dans la conception architecturale du paysage, Sungjin Na, 2021
  13. Overseas-parametric design III, Korean Architects Journal, Sung, W, 2015
  14. (2017b) Les mathématiques s'élèvent : What matters in the education of the design computing. Architectes coréens, Kim, S, 2017
  15. Codify: Parametric and Computational Design in Landscape Architecture, Bradley Cantrell et Adam Mekies, 2018
  16. Advances in Dataflow Programming Lan - guages, ACM Computing Surveys, Johnston, W.M., Hanna, J.R.P. et Millar, R.J., 2004.
  17. Techniques de modélisation paramétrique dans le cadre de BIM (Building Information Modelling), Seungmin Jeon, 2013
-

18. Approche biomimétiquedans l'enseignement de l'architecture : étude de cas du cours "Biomimicry in Architecture", Nihal Amer, 2019
19. Le biomimétisme dans l'enseignement de la conception architecturale, C. Tavzan, F. Tavzan, E. Sonmez, 2015
20. A novel coupled analysis and porous structure modelling methods using the mixture theory and Voronoi cell, SeungHun Park, 2019