Bio-inspiration et enveloppe du bâtiment : proposition d'une méthode de conception et application expérimentale

Tessa Hubert

▶ **To cite this version:**

Tessa Hubert. Bio-inspiration et enveloppe du bâtiment : proposition d'une méthode de conception et application expérimentale. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2022. Français. NNT : 2022BORD0222 . tel-03892809

HAL Id: tel-03892809
https://theses.hal.science/tel-03892809

Submitted on 10 Dec 2022

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

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

université de BORDEAUX

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES DE L'INGÉNIEUR

SPÉCIALITÉ MÉCANIQUE

Par Tessa HUBERT

Bio-inspiration et enveloppe du bâtiment

Proposition d'une méthode de conception et application expérimentale

Soutenue le 4 juillet 2022

Membres du jury :

M. INARD, Christian	Professeur des Universités, Université de La Rochelle	Rapporteur
M. CASAS, Jérôme	Professeur des Universités, Université de Tours	Rapporteur
M. LIVENEAU, Philippe	Professeur des ENSA, ENSA Grenoble	Examinateur
Mme AUJARD, Fabienne	Directrice de Recherche CNRS, MNHN	Co-directrice
M. BRUNEAU, Denis	Professeur des ENSA, ENSAP de Bordeaux	Co-directeur
Mme. VOGT WU, Tingting	Maître de Conférences, Université de Bordeaux	Co-encadrante
M. DUGUÉ, Antoine	Docteur-Ingénieur, NOBATEK/INEF4	Invité
M. JAUPART, Dimitri	Assistant-Ingénieur, ENSAM-Bordeaux	Invité

Bio-inspiration et enveloppe du bâtiment : proposition d'une méthode de conception et application expérimentale

Résumé : Les travaux de thèse proposés visent au développement d'un processus de conception d'enveloppes du bâtiment inspirées du vivant, appuyé par une démarche expérimentale. Pour cela, différentes étapes clés de la conception bio-inspirée sont abordées. En premier lieu, l'exploration d'un périmètre défini du vivant analogue aux enveloppes du bâtiment, notamment les enveloppes biologiques et constructions animales, met en avant des caractéristiques et stratégies pertinentes au regard de l'enveloppe et de ses fonctions souhaitées. Des ateliers réunissant divers acteurs du bâtiment – architectes, ingénieurs – amènent à l'idéation de concepts variés pour l'enveloppe. L'un des principes émis, basé sur l'hybridation de principes thermorégulateurs de deux espèces, est sélectionné comme cas d'étude. L'utilisation d'outils de conception paramétrique permet alors le transfert de ce principe vers un concept technologique d'enveloppe déformable et déployable, ayant une gestion adaptative des transferts d'air, de chaleur et de lumière à travers la paroi. Le prototypage mène ensuite à l'évaluation technologique et expérimentale du système à plusieurs échelles. Un banc d'essai est conçu pour réaliser des expérimentations à une échelle représentative en conditions climatiques réelles. Les mesures, couplées à des modèles de type boîte-grise, offrent de premiers éléments de caractérisation du concept et l'évaluation de son impact global sur un bâtiment. Ainsi, l'objectif d'une démarche utilisable et appropriable par différents acteurs du bâtiment sans nécessité de connaissances préalables en biologie est atteint, tout en promouvant l'interdisciplinarité pour la génération de concepts ou produits bio-inspirés innovants.

Mots clés : Enveloppe du bâtiment, conception, bio-inspiration, expérimentation, modélisation

---

Bioinspiration and building envelope: proposition of design method and experimental application

Abstract: This PhD work aims at developing a design process of building envelopes inspired by living organisms using an experimental approach. For this purpose, different key steps of the bio-inspired design process are addressed. First, the exploration of a defined perimeter of living organism, analogous to building envelopes, i.e., biological envelopes and animal constructs, highlights relevant features and strategies for the envelope and its required functions. Workshops gathering building stakeholders – architects, engineers – lead to the development of various envelope principles. One of them, based on a hybridization of thermoregulatory principles from two species, is selected as a case study. Using parametric design tools,

the principle is transferred into a technological concept of a deformable and deployable adaptive envelope, managing air, heat and light transfers through the wall. The prototyping of such a system then leads to its technological and experimental evaluation at different scales. A test bench is designed to perform 1:1 scale experiments under real climatic conditions. The measurements, coupled with grey box models, offer first elements towards its characterization and the evaluation of its global impact on a building. The objective of an approach that can be used and appropriated by different building actors without requiring prior knowledge in biology is achieved, while promoting interdisciplinarity for the generation of innovative bio-inspired concepts or products.

Keywords: Building envelope, conception, bioinspiration, experimentation, modeling

À Jérôme, mon étincelle,

À ma très chère mère Françoise,

Et à mon père Pierre, qui me manque profondément.

Remerciements

Les travaux de thèse sont bien souvent vus comme un chemin solitaire, qui demandent un effort sans relâche au doctorant et à lui seul. Pourtant, il s'agit d'un travail d'équipe, le résultat d'années de collaborations, d'échanges dans un environnement qui porte, guide et encourage. Je souhaite donc exprimer toute ma gratitude aux chercheurs, praticiens, amis et famille, qui ont contribué à mon épanouissement personnel et professionnel.

Je tiens en premier lieu à chaleureusement remercier mon encadrement pédagogique, pour son écoute et soutien à tous les stades du doctorat. Merci à Denis Bruneau, mon directeur de thèse, de m'avoir fait confiance et guidée tout au long des travaux. Ses précieux conseils et son expertise ont façonné les grands axes de ma recherche, tout en me laissant choisir les directions que je souhaitais prendre, et j'ai conscience de cette chance. Merci également à Fabienne Aujard, ma directrice de thèse, pour sa bienveillance, sa grande aide sur le vaste sujet de la biologie, et ses encouragements que j'ai tant appréciés tout au long des travaux. Je remercie Tingting Vogt Wu pour sa présence et sa disponibilité, son aide régulière sur le terrain, et aussi pour sa gentillesse. Enfin, je souhaite remercier Antoine Dugué, pour son investissement sans faille, ses riches critiques et un apport qui ont tant contribué à la qualité des travaux. Je vous suis à toutes et tous extrêmement reconnaissante.

Je souhaite remercier Jérôme Casas et Christian Inard, d'avoir accepté de rapporter mon travail de thèse, pour leurs critiques constructives, leurs regards croisés sur mon rapport et nos échanges le jour de la soutenance. Je remercie Philippe Liveneau d'avoir présidé le jury de thèse, et d'avoir apporté un point de vue architectural inspirant pour mes travaux.

Cette thèse étant CIFRE, j'ai navigué entre trois équipes : NOBATEK/INEF4, partenaire industriel, le laboratoire I2M (Institut de Mécanique et d'Ingénierie) et le MECADEV du MNHN (Muséum National d'Histoire Naturelle). Je n'ai pas passé un temps équitable dans ces trois environnements, mais tous ont été enrichissants.

Merci aux équipes du MECADEV pour leur accueil, leur curiosité, et leur disponibilité. Je remercie particulièrement Raphaël Cornette pour nos échanges sur les ACM, et Fabien Pifferi pour son attention à mon intégration dans l'équipe BioAdapt. J'aurais souhaité avoir d'avantage d'échanges et de temps pour collaborer avec les chercheurs passionnés de cette équipe, mais le Covid et la distance n'ont pas facilité les choses. Je garderai un œil sur leurs projets, tant ils sont passionnants. Merci à Jerry le microcèbe pour ses guilis, aussi.

Merci aux personnes d'I2M qui m'ont offert un environnement académique stimulant et qui ont enrichi ma réflexion à travers questions et remarques. Je remercie Wahbi Jomaa et Alain Sempey pour leur accueil dans le département TREFLE et dans l'équipe EBS, et également Laurent Mora, pour sa bienveillance dans le cadre de l'équipe commune GP2E. Je remercie Thomas, dont les retours en dernière ligne droite de thèse m'ont été extrêmement utiles, et avec qui j'espère, nous organiserons bientôt la fameuse retrouvaille post-ski avec Jérôme. Merci à Muriel pour sa bonne humeur continuelle, et à Cécile et Audrey, pour nos agréables pauses-café. Je souhaite aussi remercier les permanents d'E3BUS, tels que Aline, Philippe, Ferran,

Régis, Patrick, pour leurs contributions et regards différents sur mes travaux, qui m'ont plusieurs fois aidé à les orienter. Je souhaite remercier les doctorants et post doctorants qui ont su m'encourager par leurs remarques (parfois acérées, teintées de jalousie, certainement) mais aussi pour les très bons moments passés en dehors du laboratoire. Dédicace à la team Mathieu, Enguerrand et Enzo (dont j'attends maintenant la soutenance avec impatience !). Un merci particulier à Ryad, avec qui la rivalité sur les instruments de mesure n'a jamais cessé, mais qui s'est toujours porté volontaire pour m'aider quand j'en avais besoin. Merci également à Anass, Huyn, Zineb, Assia, Fujin, Tosin, Quentin, Benjamin, Ana, Myriame, Youssef, Lorena, et aux autres, pour nos discussions et rires échangés.

Je tiens enfin à remercier NOBATEK/INEF4, qui m'a donné l'opportunité de travailler au sein d'équipes aux compétences multiples et très investies sur les problématiques environnementales actuelles. Un grand merci à Olivier Scheffer d'avoir insufflé le biomimétisme à NOBATEK/INEF4 et donc contribué au lancement de cette thèse. Je suis aussi très reconnaissante envers Marie Pauly et Aurélien Hénon de m'avoir accueillie dans leur pôle et équipe avec bienveillance, et de l'écoute qu'ils m'ont accordée. Je remercie Saed Raji pour ses conseils avisés, et grâce à qui j'ai pu mener dans de bonnes conditions mes expériences. Je tiens à remercier Jérôme Lopez, qui a plusieurs fois sur me faire prendre un recul nécessaire sur mes travaux, et prêter un œil plus attentif aux besoins industriels. Merci à Baptiste pour son aide sur la partie modélisation, et son partage de connaissances (des inférences bayésiennes à Zelda BotW, un large spectre). Un grand merci à Pauline, qui s'est plusieurs fois proposée pour relire articles et manuscrit, sans vraiment savoir dans quel pétrin elle se mettait. Merci à Stéphanie pour le vif intérêt qu'elle a porté à mes travaux et les nombreuses suggestions et idées soufflées. Merci à Zakaria et Pierre d'avoir partagé le labo de Talence avec moi et supporté mon bazar et mon humour douteux. Merci à Ilona pour ses high skills en Grasshopper, Juliette pour le prêt de sa robe scintillante, Jérémie pour ses encouragements sportifs, Laure pour avoir été mon infaillible pilier de bureau, Thomas pour son sacrifice du meilleur spot au parking, Lafrech pour sa grande subtilité dont je suis toujours bon public, Benjamin pour son grain de folie... Plus généralement, merci à tous ceux qui m'ont tant appris, et apporté aide, soutien, et rires ces trois années : Isabelle, David, Pyrène, Fred, Fabian, Lucas, Thomas, Hugo, Romain Martha, Simon, Alvaro, Emlyne, et tous les autres. Merci pour les moments passés, et d'avance, merci pour les moments à venir.

Je souhaite remercier à Dimitri Jaupart et Philippe Guibert, pour leurs précieux conseils et leur aide aux ateliers de l'ENSAM. Ils ont su m'écouter avec patience et proposer des solutions à chacun de mes besoins. Je tiens également à remercier chaleureusement Damien Decker, qui a également rendu possible la fabrication du prototype par son ingéniosité, et qui m'a permis d'avancer dans ces travaux plus que je ne l'espérais. Merci également à Noémie Jaupart, pour ses idées astucieuses, et de m'avoir ouvert le monde incroyable des LEGOS et de l'impression additive. J'ai ainsi bénéficié d'une aide précieuse et multiple pour la fabrication des prototypes, et j'ai beaucoup appris.

Merci également aux membres du CEEBIOS, qui ont apporté un regard neuf et externe aux travaux. Je remercie particulièrement Estelle Cruz, avec qui cela a été un réel plaisir de collaborer.

Je tiens à remercier mes amis pour leur présence, physique pour certains, dans les pensées pour les autres. Merci aux héros du padel, Audrey et Mathieu, pour ces nombreuses séances thérapeutiques ; ils ont supporté mes humeurs instables et subi mes bandejas ratées. Je remercie Lucie et Antonin, pour nos rires et parties endiablées, dont les visites ces dernières années m'ont fait beaucoup de bien. Merci à la team Salsita, Manon et Adèle, pour leur présence et le réconfort constant qu'elles m'ont apporté, et dont j'avais tant besoin. Merci à tous ceux dont je chéris l'amitié, Allison, Amaury, Jaeyoon, Martin, Kevin, Simon, Vincent. Et merci à mes amis Ricains, qui étaient avec moi le 4 juillet.

Je pense à ma famille et souhaite la remercier. A la mémoire de ma grand-mère Georgette, qui m'a choyée et entourée de son affection. A la mémoire de mon père Pierre, qui n'aura pas vu l'aboutissement de cette thèse, mais dont la fierté et les encouragements résonnent encore dans mon cœur. A ma mère Françoise, pour son affection et sa confiance, grâce à qui j'en suis là aujourd'hui. A Demie et à mon frère Quentin, qui a été ma source d'inspiration et a contribué à mon amour pour les sciences. A ma belle-famille pour leur soutien et leur gentillesse, et à mes neveux, ces petites canailles qui m'émerveillent.

Enfin, je remercie Jérôme, pour son amour et sa compréhension au quotidien. De m'avoir soutenue dans mes pires moments. De me rendre meilleure. Merci d'être à mes côtés et merci d'être toi.

Table des matières

Introduction **21**

Chapitre 1 - État de l'art des méthodes de conception existantes **27**

1.1 Processus de conception bio-inspirée 28
1.1.1 Terminologie des théories et méthodologies de conception **28**
1.1.2 Conception « classique » **29**
1.1.3 Conception bio-inspirée **31**
1.2 Pratique de la conception bio-inspirée appliquée aux enveloppes du bâtiment 34
1.2.1 Analyse comparative d'applications bio-inspirées **36**
1.2.2 Proposition d'une approche **56**

Chapitre 2 - Chactérisation biologique pour l'idéation de concepts **57**

2.1 Notions générales sur le vivant 59
2.1.1 Définitions **59**
2.1.2 Concepts liés à l'environnement **62**
2.2 Caractérisation de modèles biologiques 63
2.2.1 Formulation du « problème » **64**
2.2.2 Exploration des approches pour la description des modèles biologiques **69**
2.2.3 Synthèse **117**

Chapitre 3 - Du concept au prototype **119**

3.1 Du principe bio-inspiré vers le domaine technique 121
3.1.1 Description du concept sélectionné comme cas d'application **121**
3.1.2 Connaissances existantes relatives à ce concept **122**
3.1.3 Possibles transpositions du concept **123**
3.1.4 Formalisation **124**
3.2 Étapes de conception 126
3.2.1 Conception paramétrique **126**
3.2.2 Fabrication des prototypes **128**
3.3 Caractérisation expérimentale multi-échelle 135
3.3.1 Objectifs de la caractérisation **135**
3.3.2 Tests en laboratoire **136**
3.3.3 Tests sur banc d'essai mobile : « boîte test » **138**
3.3.4 Suite de l'expérimentation **164**
3.4 Conclusion 179

Chapitre 4 - De l'expérimentation à la modélisation 181

4.1 Méthodologie de modélisation de la façade 183
4.1.1 Choix du modèle **183**
4.1.2 Présentation des choix de modélisation **185**
4.1.3 Algorithme de calcul **191**
4.2 Caractérisation thermique par calibration du modèle RC 192
4.2.1 Démarche globale **192**
4.2.2 Analyse de sensibilité **193**
4.2.3 Algorithmes de calibration **204**
4.2.4 Discussions **212**
4.3 Perspectives 213
4.3.1 Inférences bayésiennes **213**
4.3.2 Vers un modèle pour un système adaptatif **214**
4.3.3 Conclusion **214**

Conclusion générale et perspectives 217

Bibliographie 221

Annexes 233

Table des figures

Figure 1.1 - Classification pyramidale des théories et méthodologies par Fayemi (2016) et adapté de Lahonde (2011). 28
Figure 1.2 - Processus archétype de conception (Dubberly 2005). 29
Figure 1.3 - Processus étapes ou activités (Blessing 1994). 29
Figure 1.4 - Ontologie FBS et Méthode OIA (Collignan 2012) 31
Figure 1.5 - (a) Esplanade – Theater on the Bay, Singapour (Pixabay Licence), (b) Hygroskin (Source : http://www.achimmenges.net/) 35
Figure 1.6 - Processus bio-inspiré (a) orienté problème, (b) orienté solution, adapté de (ISO 18458:2015 2015) et traduit de Cruz, Hubert *et al.* (2021). 37

Figure 2.1 - Arbre phylogénétique du vivant, selon Hug et al. (2016) construit à partir de génomes. 61
Figure 2.2 - Exemples de facteurs abiotiques divers qui affectent tous systèmes vivants. Inspiré de Mitchell & Skinner (2004). 63
Figure 2.3 - Représentation graphique de la loi de tolérance de Shelford adaptée de Costamagno et al. (2016), accompagnée d'exemples de gammes QEI. 64
Figure 2.4 - Diversité d'enveloppes. De gauche à droite : façade vitrée, textile (yourte), en brique, en bambou (Licences Pixabay). 65
Figure 2.5 - (a) Nid construit par un oiseau tisserand (Licence Pixabay). (b) Squelettes de radiolaire à base de plancton siliceux adapté au monde marin (© Annick Baudrimont, Laboratoire de géologie et d'océanographie, Université Bordeaux I). 68
Figure 2.6 - Modèle boîte noire du système chien de prairie pour la fonction thermorégulation. Basé sur Nagel, Nagel, et al. (2010). 69
Figure 2.7 - Approche fonctionnelle de la thermorégulation du chien de prairie. 70
Figure 2.8 - Images extraites de Peeters et al. (1994). (a) Dessin du nid souterrain des *Harpegnathos saltator* avec A : atrium ; NE : tunnel d'entrée ; S : sphère de nidification ; E : ouvertures dans la sphère ; M : fosse ; E : chambres de nidification. (b) Photographies au microscope électronique à balayage du "papier peint" tapissant les chambres du nid. 71
Figure 2.9 - Modèle SBF appliquées aux colonies des *Harpegnathos saltator*. 71
Figure 2.10 – Outils proposés en atelier : arborescences pour l'identification de mots-clés et base de données. 73

Figure 3.1 - Croquis du concept inspiré du papillon morpho. Crédit : Myriame Ali-Oualla et Kaïs Bhouri. 122
Figure 3.2 - Institut du monde arabe et ses moucharabiehs mobiles (Crédit de gauche à droite : Loïc Durand et © Fabrice Cateloy). 122
Figure 3.3 - (a) Institut du monde arabe (Crédit : Loïc Durand), (b) Pavillon thématique à Yoesu (Crédit : Knippers Helbig GmbH), (c) Tour Al-Bahar. 123
Figure 3.4 - Schéma du concept bio-inspiré formalisé, et description des caractéristiques pour une membrane déformée. 125

Figure 3.5 - Configurations opaque, devant un vitrage, et en tant qu'enveloppe (de gauche à droite). 126
Figure 3.6 - Conception paramétrique réalisée sous Rhinoceros - Grasshopper avec un motif hexagonal : (a) taille des éléments de base (100 % à 50 % de recouvrement), (b) base creuse, (c) variation des axes d'orientation des clapets, entiers ou demi. 127
Figure 3.7 - Exploration de la déformation de divers types de maillages. (a) Points d'impacts multiples et multidirectionnels. (b) Variation de la tension appliquée sur un point de tension d'un maillage. 128
Figure 3.8 - (a) Cinétique des clapets, (b) Déformation par pression manuelle sur la base centrale. 129
Figure 3.9 - (a) Maillage silicone sur cadre acier, (b) éléments de base en aluminium ou plastique imprimés. 129
Figure 3.10 - Illustration du *Stegosaurus Ungulatus* de Marsh (1891). 130
Figure 3.11 - Cotes (a) des clapets, (b) du système cranté imprimé, (c) du cadre structurel et de ses fentes. (d) Clapet inséré dans le système cranté. 131
Figure 3.12 - Découpe au jet d'eau du cadre structurel. 132
Figure 3.13 - Impression des pièces pour le système cranté. 132
Figure 3.14 - (a) Montage du prototype STEGOS, (b) Prototype final. 133
Figure 3.15 - Système de traction prévu pour le prototype à grande échelle. 133
Figure 3.16 - Vue global de la paroi déformable intégrée à une boite bois. 134
Figure 3.17 - Vue arrière du montage de la paroi déformable et câble de traction sur un élément hexagonal. 134
Figure 3.18 - Vues d'un élément en tension et de l'ouverture créée par la déformation. 135
Figure 3.19 - Vues face de la déformation due à la tension application sur un élément hexagonal. 135
Figure 3.17 - Appareil photo et caméra thermique pour observer les variations de couleurs et de température. 136
Figure 3.18 - Coefficient d'absorption α calculé et température de l'échantillon au cours de l'expérimentation. 137
Figure 3.19 - Photographie et image thermique infrarouge de STEGOS exposé au rayonnement solaire en extérieur. 137
Figure 3.20 - Schématisation et composition de la boîte test. 138
Figure 3.21 - Photographies de la boîte test : (a) séchage de la peinture imperméabilisante, (b) montage et pose de la bâche étanche (c) vue de profil du débord de toit en OBS et bâché, (d) installation du boîtier électrique. 139
Figure 3.22 - Nomenclature et positions des capteurs dans la boîte et la façade testée. 140
Figure 3.23 - Centrale d'acquisition et ses 40 voies dans le boitier électrique et relié au câble d'alimentation fixé sur la boîte test. 140
Figure 3.27 - Pyranomètre vertical et pyranomètre orientable installés sur la boîte test. 141
Figure 3.25 - Anémomètre à coupelle fixé sur un profilé aluminium. 141
Figure 3.26 - Installation des fluxmètres : (a) pate thermique déposée sur un fluxmètre, (b) scotch réfléchissant pour la fixation à la surface, (c) fine mousse pour éviter toute couche d'air. 142

Figure 3.27 - Soudure du thermocouple à un fluxmètre de taille 30 mm x 30 mm avant ajout d'un adhésif protecteur. 143
Figure 3.28 - Etapes de montage selon la configuration testée opaque ou vitrage. 143
Figure 3.29 - Rotation possible du système entier. 144
Figure 3.30 - (a) Façade modélisée sur Rhinoceros Grasshopper et courses solaires (par heure) sur la période testée (b) Surfaces ombragées modélisées sur le STEGOS avec clapet à 90°. 144
Figure 3.31 - Effet d'une ombre de 10 secondes sur la paroi ensoleillée : les clapets baissent en température et tendent vers la couleur bleue à température inférieure à 45°C. 165
Figure 3.32 - Dégradation progressive du revêtement thermochromique visible par le changement de couleur. 165
Figure 3.33 - Coefficient d'absorption des clapets mesuré avec un spectrophotomètre avec les revêtements noir et blanc. N.B. : Le bruit observé à 800 nm est lié à l'appareil de mesure utilisé. 166
Figure 3.34 - Modification apportées au banc d'essai : (a) ajout d'un isolant polystyrène sellé avec de la mousse expansive, (b) revêtement noir de la face externe de la couche aluminium d'1 mm située derrière les clapets. 167
Figure 3.35 - Ajout de mousse noire puis blanches sur le contour aluminium de 4 mm. 167
Figure 3.36 - Nomenclature et positions des capteurs dans la boîte et la façade testée après modification du banc d'essai. 168
Figure 3.37 - Impacts de (a) dépôt de sable et (b) vent fort sur la mesure et sur les clapets.. 170
Figure 3.38 - Flux radiatifs en courte longueur d'onde incidents sur le prototype (vertical) et sur sa normale (horizontal) les journées du 9 et 10 février 2022. 170
Figure 3.39 - Vitesse de vent extérieure les journées du 9 et du 10 février 2022. Les points sont les mesures à chaque pas de temps, le trait plein est la moyenne mobile de ces mesures. 171
Figure 3.40 - Mesures de température intérieure de la boîte test à trois hauteurs les journées du 9 et 10 février 2022. La figure de droite est un zoom réalisé sur le pic de la première journée. 171
Figure 3.41 - Comparaison des deux fluxmètres positionnés sur le contreplaqué, côté extérieur (nœud T_{we}) les journées du 9 et 10 février 2022. 172
Figure 3.42 - Flux et température mesurés dans les couches de la paroi testée pour les journées du 9 et 10 février 2022. 172
Figure 3.43 - Flux et températures mesurés dans les couches du STEGOS pour les journées du 9 et 10 février 2022. 173
Figure 3.44 - Comparaison de la température intérieure de la boîte test avec la température d'air extérieure les journées du 9 et 10 février 2022. 173
Figure 3.45 - Flux mesurés sur toutes les parois intérieures de la boîte test pour les journées du 9 et 10 février 2022. Le graphe de droite présente le bilan de tous les flux. 174
Figure 3.46 - Températures mesurées de l'air extérieur, de la surface extérieure des clapets, et à l'interface mousse-contreplaqué la nuit du 9 au 10 février 2022. 174
Figure 3.47 - Comparaison des flux solaires incidents entre la séquence n°1 à gauche, et la séquence n°5 à droite. 176
Figure 3.48 - Comparaison des températures d'air extérieur et intérieur entre la séquence n°1 à gauche, et la séquence n°5 à droite. 176

Figure 3.49 - Comparaison des flux aux différentes couches de la paroi entre la séquence n°1 à gauche, et la séquence n°5 à droite. 176
Figure 3.50 - Comparaison des températures aux différentes couches de la paroi entre la séquence n°1 à gauche, et la séquence n°5 à droite. 177
Figure 3.51 - Comparaison du coefficient de transmission τ calculé géométriquement entre le 23/02 (séquence n°2) et le 26/03 (séquence n°6). 177
Figure 3.52 - Nuages de points des différences thermiques horizontaux dans la paroi en fonction du rayonnement solaire incident mesuré, pour les clapets blancs (séquences entières n°4, n°5, n°6). $\Delta T = tHF_{isol,i} - tHF_{al,e}$. 178
Figure 3.53 - Nuages de points des gradients thermiques entre la surface extérieure des clapets et la température d'air, pour les clapets blancs. $\Delta T = tHF_{fl,e} - T_{ext}$. 178

Figure 4.1 - Phénomènes de transferts thermiques sur la paroi intégrée à la boîte test. 184
Figure 4.2 - Modèle RC d'une paroi homogène. 185
Figure 4.3 - Composantes du facteur solaire. 186
Figure 4.4 - Représentation schématique du modèle RC appliqué à la paroi testée. 190
Figure 4.5 - Schéma RC du modèle sous *OpenModelica*. 192
Figure 4.6 - Schématisation du problème inverse. 193
Figure 4.7 - Jeu de données extrait de la séquence n°1 pour l'analyse de sensibilité. a) Flux solaire incident, b) Flux mesurés dans les couches de la paroi testée, c) Températures d'air intérieure et extérieur, d) Vitesse du vent. 198
Figure 4.8 - Distance euclidienne normalisée d entre les deux indices de Morris (μi^*, σi) pour les trois ouvertures de clapets. 199
Figure 4.9 - Estimations des indices de Sobol sur les paramètres à identifier pour clapets fermés et ouverts. 200
Figure 4.10 - Graphique en coordonnées parallèles représentant toutes les simulations réalisées lors de l'analyse de sensibilité pour la configuration à clapets ouverts avec les erreurs moyennes (NMBE) et quadratiques (CV(RMSE)). 201
Figure 4.11 - Analyse de sensibilité dynamique et plages possibles pour une optimisation par partie sur l'erreur moyenne de $T_{w,e.}$ 202
Figure 4.12 - Comparaison entre mesure et simulations de l'analyse de sensibilité ; les parties encadrées indiquent une sous-estimation des prédictions. 203
Figure 4.13 - Principe de fonctionnement des algorithmes évolutionnaires pour le passage d'une génération G_i à la génération suivante G_{i+1}. 205
Figure 4.14 - Croisement binaire à deux points de coupure. 207
Figure 4.15 - Exemple d'une fonction de coût à 2 dimension, montrant ses lignes de contour et le processus de génération des vecteurs de paramètres $v_{i,G+1}$ (Storn et Price 1997). 208
Figure 4.16 - Processus de calibration et interfaces utilisées. 209
Figure 4.17 - Mesure et modèle pour (a) la période d'entrainement et (b) la période de validation sur clapets fermés. 211
Figure 4.18 - Mesure et modèle pour la période de validation sur clapets ouverts. 211

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Extrait des tableaux 4, 6 et 7 de Cruz, Hubert *et al.* (2021). 37

Tableau 3.1 - Transposition des principes à des technologies potentielles. Rapport d'échelle : échelle de fonctionnement du modèle biologique / échelle de fonctionnement de la transposition (nano (n), meso (m), macro (M)). 124
Tableau 3.2 - Lexique ou système sémantique utilisé pour le concept. 125
Tableau 3.3 - Description des matériaux assemblés. 131
Tableau 3.4 - Caractéristiques des différentes couches composant le prototype STEGOS et la boîte test 168
Tableau 3.5 - Chronologie des mesures sur la boîte test de Juillet 2021 à avril 2022. 169
Tableau 3.6 - Séquences des mesures réalisées. 169

Tableau 4.1 - Paramètres incertains : intervalles de variations utilisées. 197
Tableau 4.2 - Paramètres incertains : intervalles de variations. 210
Tableau 4.3 - Valeurs des paramètres après optimisation et erreurs associées. 210

Nomenclature

Lettres latines

C	Capacité thermique	J/K
C_p	Capacité thermique massique	J/kg.K
c	Fitness ou fonction cout (AE)	-
d	Distance euclidienne	-
e	Epaisseur	mm
F	Facteur de forme pour échange radiatif	-
f	Facteur ou paramètre incertain	-
H	Modèle numérique ou ensemble de fonctions étudié	-
h	Coefficient de transfert thermique	W/m².K
HF	Densité de flux de chaleur	W/m²
I	Densité de flux solaire incident	W/m²
G	Densité de flux solaire global	W/m²
m	Masse	kg
q	Nombre de sous-échantillons équiprobables d'une partition (Morris)	-
r	Nombre de répétitions (Morris)	-
R	Résistance thermique	K/W
S	Surface d'échange	m²
S_i	Indice de sensibilité (Sobol)	-
T / tHF	Température	°C ou K
v_i	Vecteur candidat de paramètres d'entrée (AE)	-
v	Vitesse	m/s
x_i	Vecteurs de paramètres d'entrée (AE)	-

Lettres grecques

α	Coefficient d'absorption	-
Δ	Saut des paramètres (Morris)	-
ΔT	Différence de température	°C ou K
Δt	Pas de temps	mn
ε	Emissivité	-
φ	Densité de flux de chaleur	W/m²
Φ	Flux de chaleur	W
λ	Conductivité thermique	W/m.K
μ	Moyenne des valeurs relatives des effets élémentaires dans un criblage (Morris)	-
μ*	Moyenne des valeurs absolues des effets élémentaires dans un criblage (Morris)	-
ρ	Masse volumique	kg/m^3

σ	Constante de Stefan Boltzmann	$W/m^2.K^4$
	Écart-type des valeurs relatives des effets élémentaires dans un criblage de Morris	-
τ	Coefficient de transmission	-

Opérateurs mathématiques

.	Produit scalaire
$\widetilde{(.)}$	Paramètre temporaire (AE)
$\widehat{(.)}$	Variable de sortie calculée
$\overline{(.)}$	Valeur moyenne de la variable de sortie mesurée
$\lvert(.)\rvert$	Valeur absolue

Indices

abs	Absorbé
al	Aluminium
blanc	Relatif à des clapets blancs
c / ciel	Ciel
cond	Relatif à la conduction
conv	Relatif à la convection
CLO	Relatif aux courtes longueurs d'onde
e / ext	Extérieur
env	Environnement
f	Forcé
fl	Clapet (*flap)*
G	Génération d'une population
GLO	Relatif aux grandes longueurs d'onde
i /int	Intérieur
isol	Isolant
λ	Longueur d'onde
m	Milieu, situé entre nœud extérieur *e* et intérieur *i*
mousse	Mousse
nat	Naturel
noir	Relatif à des clapets noirs
rad	Relatif à la radiation
sol / s	Solaire
t	Au temps *t*
STEGOS	Relatif au STEGOS
v	Relatif au vent
w	Contreplaqué (*plyWood)*

Abréviations

ABS	Acrylonitrile Butadiène Styrène
ADN	Acide désoxyribonucléique
AE	Algorithme Evolutionnaire
BDD	Base de données
Bio-BS	*Biomimetic Building Skins*
CAO	Conception assistée par ordinateur
CAD	*Computer aided design*
CLO	Courte Longueur d'Onde
CR	*CRossover probability*
CV	Coefficient de Variation
CVC	Chauffage, Ventilation et Climatisation
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
DSC	*Database / Static list / Catalogue*
FBS	*Function-Behaviour-Structure*
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GLO	Grande Longueur d'Onde
ISO	*International Organization for Standardization*
IR	Infrarouge
IPBES	Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques
MCA	Analyse des correspondances multiples
MCP	Matériau à Changement de Phase
NMBE	*Normalized Mean Bias Error*
OAT	*One step At a Time*
OMEdit	OpenModelica Connection Editor
OSB	*Oriented Strand Board*
RMSE	*Root-mean-square error*
RTD	Détecteurs de Températures à Résistance
TRL	Niveau de maturité technologique
QEI	Qualité Environnementale Intérieure
IEQ	*Indoor Environmental Quality*
UV	Ultraviolet

Introduction

Urgence climatique

Le GIEC (IPCC 2022) et l'IPBES (Díaz et al. 2019) ont établi le lien entre les activités humaines et le dérèglement climatique. Or, les émissions de gaz à effets de serre liées aux activités anthropiques ont des impacts à des échelles variées ; climatique (extrêmes de chaleur, périodes de sécheresse, acidifications des océans), humaine (accentuation des vulnérabilités liées aux contextes politiques, économiques et sociaux), et également au niveau de la biodiversité, qui a subi ces dernières décennies des dégâts irréversibles. L'atteinte de la neutralité carbone accompagnée d'une forte baisse d'émission des autres gaz à effets de serre à grande échelle permettrait cependant de limiter le changement climatique, et d'atteindre avec le temps une stabilisation des températures.

Face à ces enjeux et au travers d'exigences environnementales en constante évolution (protocoles de Kyoto (Nations Unies 1998), Grenelle de l'environnement 1 et 2 (Légifrance 2009), Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (Légifrance 2015), Plan rénovation énergétique des bâtiments (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2021b)), la France s'est engagée à réduire ses émissions de GES. Le secteur du bâtiment représentant une très grande part de l'énergie totale finale consommée en France (44% (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2021a)), des efforts ont ainsi porté sur le parc immobilier existant ainsi que sur les constructions neuves. Grâce à des réglementations successives (RT et RE (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2022)), la performance énergétique des bâtiments s'est grandement améliorée, d'abord au travers de progrès dans les techniques et matériaux de construction, puis par une consommation d'énergie, en chauffage, climatisation et refroidissement, de plus en plus décarbonée.

Cela a pu donner lieu à des bâtiments équipés de systèmes complexes, qui requièrent des méthodes constructives, un usage et une maintenance énergivores. Réduire l'utilisation de ces systèmes permettrait de réduire l'énergie grise, ou énergie « intrinsèque » du bâtiment, engendrée par l'extraction des matières qui composent le bâtiment. Par sa phase chantier, sa maintenance, sa déconstruction et le recyclage de ses matériaux, l'énergie et émission grises sont loin d'être négligeables devant la consommation d'énergie opérationnelle. Ainsi, une réduction brutale de l'énergie engendrée par le bâtiment, soit grise ou opérationnelle, requiert une approche holistique du bâtiment. Il s'agit d'un système technologique en soit dont la performance repose sur les sous-systèmes qui le composent, mais aussi sur la qualité de conception, de réalisation et d'exploitation de l'assemblage de ces sous-systèmes.

L’enveloppe, terrain d’expérimentation

Le terme « enveloppe » est un concept largement utilisé en architecture et en ingénierie pour désigner les façades, le toit et le sol d’un bâtiment, mais sa définition change en fonction de l'observateur. Pour les occupants, les éléments d’enveloppe qui les entourent traduisent un confort visuel et thermique qui délimite l'espace privé de l'espace public. Pour un architecte ou une maitrise d’ouvrage, elle peut représenter une surface de contact, voire un volume, entre le bâtiment et la ville, et porte l’image et l’esthétisme d’un projet. Une approche plus fonctionnelle définit l’enveloppe du bâtiment comme un séparateur physique entre deux environnements, intérieur et extérieur, qui contrôle de multiples aspects comme la résistance à l'air, à l'eau, à la chaleur, à la lumière et au bruit (Herzog, Krippner, et Lang 2004).

L’enveloppe du bâtiment est une composante multifonctionnelle essentielle dans la performance énergétique du bâti et dans son impact carbone. Pour s’adapter aux exigences techniques et architecturales, il existe une grande diversité d’enveloppes de par les matériaux, revêtements et formes variées qui les composent. En outre, les moyens scientifiques et techniques pour les réaliser sont de plus en plus conséquents : les nanomatériaux pour l’amélioration des performances des systèmes constructifs, les capacités de production et de stockage d’énergie qui permettent de considérer le bâtiment comme un système énergétiquement autonome, l’impression additive augmentant le champ des possibles au niveau des formes, les systèmes de pilotages associés à des algorithmes performants qui permettent de décentraliser et améliorer le fonctionnement d’assemblages de systèmes actifs.

Ces attentes ont aussi donné plus de place à la possibilité de façades dynamiques et évolutives, qui répondent aussi bien à l’usage qu’aux sollicitations extérieures. Ainsi, l’apparition récente d’enveloppes adaptatives (Al-Obaidi et al. 2017) s’ajustant aux fluctuations extérieures en temps réel pour maximiser le confort intérieur et minimiser les dépenses énergétiques, sont la preuve d’une volonté de développement d’enveloppes auto-régulantes. Certains systèmes vivants réagissant aux aléas climatiques ou abiotiques, inspirent la conception d’enveloppes ou de produits et systèmes de façades, dans leurs fonctionnements, formes, tailles et échelles. L’analyse de leurs propriétés est source d’inspiration pour la résolution de problèmes pratiques.

L’architecture bio-inspirée

Définitions

Le terme ‘biomimétisme’ fait appel à « une philosophie et approches interdisciplinaires prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable », tandis que la ‘biomimétique’ est une « coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie […] 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 » (ISO 18458:2015 2015). La différence entre biomimétisme et biomimétique réside donc dans la volonté d’agir en faveur du

développement durable ou non. La bio-inspiration, qui inclut les deux notions, se définit plus simplement comme « une approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques ».

La bio-inspiration et les termes qui gravitent autour ont été internationalement formalisés il y a quelques années par des travaux de normalisation, mais certaines disciplines lui sont encore parfois confondues. La bionique par exemple, cherche à reproduire, améliorer ou remplacer des fonctions biologiques par des technologies électroniques ou mécaniques. La bio-assistance (ou bio-utilisation) consiste, elle, à utiliser ou détourner des molécules biologiques pour répondre à un défi biologique, et peut être intégrée de façon durable dans des solutions basées sur la Nature (European Comission 2019). Si ces dernières ne sont pas à proprement parler bio-inspirées, elles s'appuient sur les écosystèmes pour relever des défis globaux liés au bien-être humain et à la crise climatique ; elles ne sont donc pas contradictoires, mais plutôt complémentaires dans leur approche.

Expansion récente

Difficilement estimable, l'époque des premières bio-inspirations remonterait au moins à des dizaines de milliers d'années. De l'inspiration des toiles d'araignées pour les filets de pêches durant le Tarentien (100 000 ans avant JC) aux machines volantes inspirées du vol des oiseaux de Leonard de Vinci (XV^{e} siècle), les sciences se sont régulièrement reposées sur la bio-inspiration pour innover (Pavé 2013). Les courants architecturaux ont également évolué en s'inspirant de la nature, entre le biomorphisme et l'architecture organique pendant la première moitié du XX^{e} siècle, dont Antonio Gaudi est un précurseur en 1882 lors de la conception de l'iconique Sagrada Familia, et plus récemment avec les constructions écologiques ou bien bioclimatiques qui tirent parti des conditions et ressources locales comme le ferait le vivant.

Ces dernières décennies, la bio-inspiration connait un réel essor, tous secteurs confondus. Face aux besoins de solutions nouvelles, cette discipline transverse inspire des concepts innovants, qui dans un contexte économique sont de précieux facteurs de différenciation. Les avancées technologiques récentes, avec par exemple l'apparition des nanosciences, ont permis de comprendre à une nouvelle échelle le fonctionnement des systèmes vivants mais également d'appliquer leurs principes via des moyens technologiques nouveaux. En outre, il a été montré et médiatisé comment les systèmes biologiques sont capables d'efficience et de durabilité, avec bien peu d'énergie et de matière. Dans le contexte environnemental, la bio-inspiration apparait donc comme une solution pour de l'innovation durable (Ricard 2015) et de nombreuses applications émergent : des vitres super hydrophobes et autonettoyantes inspirées des feuilles de lotus (Solga et al. 2007), des isolants thermiques inspirés de la fourrure ours polaires (Engelhardt et Sarsour 2015), des collecteurs d'eau inspirés du scarabée du désert (Chayaamor-Heil, Guéna, et Hannachi-Belkadi 2018), etc.

En conséquence, plusieurs réseaux tels que le *Biomimicry Institute* aux Etats-Unis (2006) ou le *CEEBIOS* (Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis) en France (2014) se consacrent au biomimétisme et développement des méthodes visant à s'inspirer du vivant. Spécifiques aux bâtiments, des actions COST dans le cadre du programme H2020 se sont

récemment focalisées sur le développement de façades adaptatives et de bâtiments régénératifs (Lollini, Pasut, et al 2020). Certains centres de recherches sont également reconnus pour leurs travaux actifs sur la conception de design architecturaux bio-inspirés, notamment le centre de recherche collaboratif SFB-TRR 141 de l'Université de Freiburg, Tübingen and Stuttgart (Knippers, Nickel, et Speck 2016).

Contexte et objectifs des travaux

Contexte

Alors que les travaux et réseaux en bio-inspiration sont croissants, le nombre de bâtiments ou d'enveloppes bio-inspirés est aujourd'hui limité. De même, malgré un nombre grandissant de processus proposés pour la conception biomimétique dans diverses disciplines, peu d'entre eux sont spécifiques au secteur du bâtiment. Si ceux-ci peuvent être facilités par des outils et méthodes issus de l'ingénierie, de la biologie et du biomimétisme, les processus se comptent à ce jour en plusieurs dizaines, certains nécessitent un temps élevé d'apprentissage, au point qu'il en devient difficile de choisir les plus pertinents lors du processus de conception. Face à une multitude de choix, il apparait ainsi plus facile dans le domaine de la conception de créer ses propres processus et outils, que d'analyser ceux existants et de les améliorer (Baumann, Boons, et Bragd 2002), (Blessing et Chakrabarti 2009).

Le fossé existant entre un concept, source d'inspiration initiale, et le produit qui en résulte, serait principalement dû aux challenges habituels propres au développement d'un concept en produit viable (faisabilité, stratégie marketing, commercialisation), mais également aux difficultés liées au transfert de connaissance des organismes vivants vers une technologie (Chirazi et al. 2019). La transférabilité d'un modèle biologique requiert une maitrise des contraintes d'implémentations de la technologie, ainsi qu'une bonne compréhension de son fonctionnement ; sur ce pan, nombres d'outils existent pour aider l'interdisciplinarité lors de la conception bio-inspirée, mais ils ont l'inconvénient d'être souvent conçus pour et par des ingénieurs, sans le regard et l'intervention de biologistes (Graeff, Maranzana, et Aoussat 2019). Ces outils manquent donc souvent de pertinence voire de données car ceux-ci nécessitent une mise à jour constante. Les étapes du processus de conception liées à la compréhension et l'identification de modèles biologiques pertinents méritent donc une interdisciplinarité poussée.

Objectifs

Une des volontés de ce travail est l'adoption d'un processus qui permette la conception d'enveloppes ou d'éléments d'enveloppe du bâtiment bio-inspirées efficientes et durables. Si les critères de performance, d'industrialisation et d'acceptabilité, relèvent a priori d'enjeux liés à toute conception de produits destinés à être mis sur le marché, certaines étapes clés de la conception bio-inspirée se différencient clairement : la sélection et la compréhension de modèles biologiques, et leurs transferts vers une application technologique efficiente.

Ce travail nécessite donc l'exploration du processus de conception dans son intégralité, via l'application d'un cas d'étude poussé à un niveau de maturation technologique raisonnablement significatif comparé au bâtiment. La finalité est la proposition d'un processus de conception accompagné d'étapes et outils appropriables par des architectes et ingénieurs ayant pour volonté d'aboutir à une solution inspirée du vivant dont la performance, et donc l'impact énergétique et environnemental, peut être quantifiée et s'inscrire dans une volonté d'amélioration globale des GES liées au secteur du bâtiment.

Approche utilisée pour la réalisation des travaux

Structure de ce manuscrit

Les travaux menés sont présentés à travers 4 chapitres. Les trois premiers intègrent des publications, qui ont été soumises à un processus d'évaluation par des pairs et experts dans les domaines concernés.

CHAPITRE 1. Etat de l'art - Afin de mieux identifier les limites et contraintes principales à la pratique de la bio-inspiration pour l'enveloppe du bâtiment, ce chapitre fournit une analyse des processus de conceptions bio-inspirées trouvés dans la littérature et sur le terrain. Sur ce second aspect, une étude a été menée sur 30 enveloppes bio-inspirées construites, en recueillant des témoignages auprès des concepteurs. Elle est publiée dans le journal **Energy and Buildings** est intitulée *« Design processes of bioinspired building skins: A comparative analysis »* (Cruz, Hubert *et al.*, 2021).

CHAPITRE 2. Caractérisation biologique pour l'idéation de concepts - Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour décrire un panel de modèles biologiques préalablement ciblés, et son utilisation par des ingénieurs et architectes lors d'ateliers d'idéation pour des concepts bio-inspirés d'enveloppes. Ces travaux ont fait l'objet d'un chapitre dans le livre **Bionics and Sustainable Design**, sous le titre *« Exploiting the potential of Nature for sustainable building designs: A novel bioinspired framework based on a characterization of living envelopes »* (Hubert *et al.*, 2022).

CHAPITRE 3. Transfert technologique et protocole expérimental - Un des concepts ayant émergé des ateliers a été retenu comme cas d'application afin d'être mené vers une solution testée en conditions réelles. Le travail d'analyse de ce concept, de modélisation paramétrique, de transfert vers une technologie par la fabrication de plusieurs prototypes, et d'intégration à un banc d'essai est décrit dans ce chapitre. L'article *« An Adaptive Building Skin Concept Resulting from a New Bioinspiration Process: Design, Prototyping, and Characterization »* publié dans **Energies** (Hubert *et al.*, 2022) décrit la démarche employée.

CHAPITRE 4. Modélisations du système bio-inspiré - Enfin, le développement et la calibration d'un modèle décrivant les phénomènes physiques du prototype sont présentés. Les caractéristiques obtenues et la qualité du modèle sont discutées.

Environnements de recherche

NOBATEK/INEF4 est un centre privé de recherche appliquée, Institut national pour la Transition Energétique et Environnementale du bâtiment. Il a pour mission le co-développement de solutions et produits innovants pour accompagner l'ensemble de la filière du bâtiment vers la transition énergétique et environnementale. Les travaux de thèse ont ainsi bénéficié de retours d'expériences et critiques d'industriels et PME enrichissant pour les réflexions menées sur les besoins et la faisabilité des systèmes bio-inspirés développés. En outre, le développement d'éléments méthodologiques pouvant être intégrés dans des projets d'assistance à maitrise d'œuvre a profité d'échanges instructifs avec les équipes d'assistance à maitrise d'œuvre en intégrant les phases initiales des projets.

L'I2M (Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux, UMR CNRS 5295) est un centre de recherche porté par l'INSIS du CNRS qui couvre l'ensemble du spectre de la mécanique, des solides, des fluides et de l'énergétique. De l'échelle des composants et matériaux du bâtiment à l'échelle de l'urbain, son groupe E3BUS (Efficiences Énergétique et Environnementale du Bâtiment, des Usages et des Systèmes) développe des méthodologies, expérimentations et modélisations associant sciences pour l'ingénieur, sciences humaines et architecture.

LE MECADEV (Mécanismes d'adaptation et évolution, UMR CNRS 7179) mène des recherches permettant de comprendre les mécanismes qui contribuent à l'intégrité de la biodiversité et à sa vulnérabilité. Ce laboratoire d'écologie couvre une grande diversité de systèmes vivants, sur des sujets comme les approches fonctionnelles des mécanismes adaptatifs et leurs limites face aux changements environnementaux naturels ou anthropiques. Leur implication dans ces travaux de thèse a paru cruciale afin d'assurer sa transdisciplinarité. Le regard de multiples biologistes (entomologistes, ornithologistes, etc.) a consolidé la pertinence de l'approche utilisée et l'exactitude de notre compréhension des modèles étudiés.

Collaborations

Outre les trois institutions formelles citées ci-dessus, ces travaux ont été conduits avec le CEEBIOS (Centre Européen en Biomimétisme de la ville de Senlis) et VICAT comme partenaires industriels pour un regard applicatif et concret des développements technologiques menés. Notons que les travaux de thèse présentés ici sont complémentaires avec ceux menés par Estelle Cruz au sein du CEEBIOS[1], avec laquelle ont eu lieu des échanges très enrichissants.

Les ateliers d'idéation menés ont également bénéficié de la participation d'élèves et enseignants de l'ENSAPBx (École Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Bordeaux), et d'une semaine d'encadrement dirigée à l'ENSAM (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers) auprès d'étudiants de Master 1.

[1] Thèse de doctorat, Estelle CRUZ, Caractérisation multicritères des enveloppes biologiques : vers la conception de façades multifonctionnelles, 2021.

Chapitre 1

État de l'art des méthodes de conception existantes

Ce premier chapitre vise à établir un état de l'art des méthodes de conceptions existantes et appliquées pour l'enveloppe du bâtiment et souligner leurs limites. Il introduit d'abord les concepts généraux liés aux processus et méthodologies de conception référencés dans la littérature, puis les théories, méthodologies et outils ciblés par la littérature comme pertinents pour l'approche bio-inspirée.

Un regard est ensuite porté sur la conception bio-inspirée en pratique et les cadres méthodologiques utilisés par les concepteurs. L'étude bibliographique s'avérant limitante en termes de données et de détails disponibles, une analyse d'applications d'enveloppes bio-inspirées par échanges directs avec les concepteurs est proposée. La méthodologie utilisées est décrite dans l'article *« Design processes of bioinspired building skins: A comparative analysis »* publié dans le journal **Energy and Buildings** (Cruz, Hubert *et al.*, 2021).

Sommaire

1.1 Processus de conception bio-inspirée ... 28
1.1.1 Terminologie des théories et méthodologies de conception ... **28**
1.1.2 Conception « classique » ... **29**
1.1.2.1 Principe général d'un processus de conception ... 29
1.1.2.2 Les différentes typologies ... 29
1.1.2.3 Théories générales de la conception ... 30
1.1.3 Conception bio-inspirée ... **31**
1.1.3.1 Théories de conception bio-inspirées ... 31
1.1.3.2 Méthodes et Outils ... 33
1.1.3.3 Conclusion ... 34
1.2 Pratique de la conception bio-inspirée appliquée aux enveloppes du bâtiment 34
1.2.1 Analyse comparative d'applications bio-inspirées ... **36**
1.2.1.1 Article – Energy and Buildings ... 36
1.2.1.2 Discussion ... 55
1.2.2 Proposition d'une approche ... **56**

1.1 Processus de conception bio-inspirée

1.1.1 Terminologie des théories et méthodologies de conception

La facilitation de l'approche bio-inspirée et de son processus se situe à l'intersection de thèmes ancrés dans la discipline d'ingénierie de la conception : la théorie de la conception et du processus, et les méthodologies de conception (Hubka et Eder 1987). Dans ce domaine, les acteurs emploient régulièrement des termes dont les définitions sont souvent proches et confuses. Pour clarifier ce qui suit, nous ferons donc les distinctions suivantes :

- Une théorie est un ensemble organisé de principes, de règles, de lois scientifiques visant à décrire et à expliquer un ensemble de faits, généralement basé sur des observations ;
- Une méthodologie est un ensemble de méthodes et de techniques dans un domaine particulier ;
- Une méthode est un ensemble ordonné de manière logique de principes, de règles, d'étapes, qui constitue un moyen pour parvenir à un résultat ;
- Un outil est un élément d'une activité, qui n'est qu'un moyen.

Quant à la conception, notion complexe liée à la création ou à l'intention, elle a été décrite de nombreuses manières (Love 2002) et il est difficile de faire consensus. Si on la considère comme une science (Fayemi 2016), on peut convenir qu'elle s'appuie sur un ensemble de théories. Une théorie de la conception est un ensemble de connaissances ou d'hypothèses qui visent à appréhender la conception pour en fournir une formalisation (Chakrabarti et Blessing 2014). Elle peut être descriptive, c'est-à-dire qu'elle inclut la description d'activités de conception usuellement considérées, ou bien prescriptive (Cross 2008). Dans ce cas, son objectif est de distinguer les pratiques de conception existantes et les nouvelles, en argumentant sur cette dissociation ; elle pourrait correspondre alors à une « méthodologie de conception » (Tomiyama et al. 2009).

Ainsi, de façon synthétique, la théorie fait référence aux modèles descriptifs du processus de conception, et la méthodologie à ses modèles prescriptifs. Les méthodes et outils peuvent être considérés comme des méthodologies plus concrètes et désignées comme « méthodes de conception » (Cross 2008; Lahonde 2011) (voir représentation en Figure 1.1).

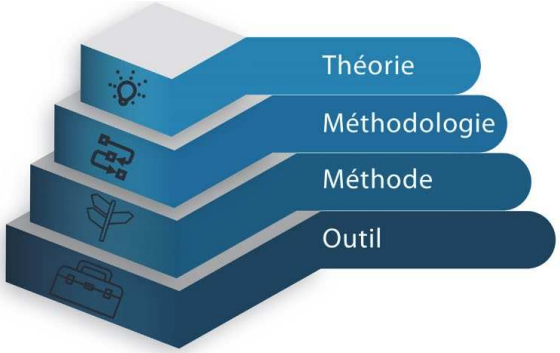


Figure 1.1 - Classification pyramidale des théories et méthodologies par Fayemi (2016) et adapté de Lahonde (2011).

1.1.2 Conception « classique »

1.1.2.1 Principe général d'un processus de conception

La conception d'un produit est un processus de création, qui part d'une idée ou d'un concept, suivi de son développement et de sa commercialisation. Ce processus peut être généralisé par la résolution d'un problème par transformation des données d'entrée (Dubberly 2005) en un produit fini (Figure 1.2). Le produit obtenu en fin de conception varie selon les données d'entrée, c'est-à-dire le besoin auquel on veut répondre, et selon le processus utilisé pour y parvenir. Ce bloc de processus de conception est généralement fractal, c'est-à-dire qu'il est composé d'étapes plus ou moins nombreuses qui interagissent entre elles de manières variées : en représentations abstraites, de manière linéaire ou circulaire, à convergences variées, etc.

Figure 1.2 - Processus archétype de conception (Dubberly 2005).

1.1.2.2 Les différentes typologies

Les processus de conception peuvent être classés selon plusieurs typologies (Clarkson et Eckert 2005):

1. Orientation problème ou solution : le processus porte sur l'analyse du problème pour générer un spectre de solutions ou à l'inverse, le processus partira d'une solution possible et tentera de l'adapter à l'environnement choisi.
2. Centrage activité ou étape : le processus peut être un ensemble d'étapes, un ensemble d'activités, ou bien une hybridation des deux (Figure 1.3).
3. Approche abstraite (modèles très généraux), procédurale (plus spécifique et concret), et analytique ; le processus est alors utilisé pour décrire des projets de conception très spécifiques.

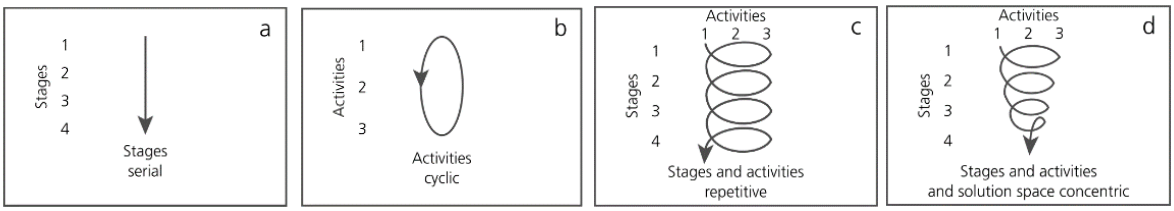


Figure 1.3 - Processus étapes ou activités (Blessing 1994).

Le domaine de la conception touche un large panel d'acteurs : architectes, ingénieurs, programmeurs informatiques, ou encore enseignants, conçoivent produits, projets, activités, et la qualité de leur conception réside dans le processus choisi pour y arriver. Appliquée au bâtiment, la conception de produit ou système pourrait être envisagée à travers des processus généraux de conception (Jones 1992), (Alexander 1964), de la conception architecturale (Royal Institute of British Architects 1967), de la conception technique (French 1999), ou bien encore

de la conception de produit (Archer 1963). Dans ces domaines, la plupart des processus sont généralement orientés problème, agissent par étapes et sont procéduraux.

1.1.2.3 Théories générales de la conception

Quelques approches de théories les plus courantes sont introduites ci-dessous.

1.1.2.3.1 Théorie C-K

Introduite par Hatchuel et Weil (2009) aux Mines ParisTech, cette théorie crée deux espaces de réflexion distincts : l'espace des concepts C (*Concept*) et l'espace des connaissances K (pour *Knowledge*). La méthode consiste à jouer entre les deux espaces. Lorsque l'espace C s'expand, l'espace K sera automatiquement peuplé par de nouvelles connaissances. Celles-ci pourront générer de nouveaux concepts (des alternatives au concept initial) ou en invalider certains. Les deux espaces sont donc complémentaires et se nourrissent mutuellement.

1.1.2.3.2 Infused Design

L'*Infused Design*, ou concept par infusion, consiste à transférer la terminologie, les méthodes de résolutions de problèmes ou les solutions d'une discipline à une autre. Elle nécessite de pouvoir transformer le modèle étudié en un modèle mathématique plus général, qui devient commun aux deux disciplines. Appelée représentation combinatoire, la représentation finale mathématique des deux disciplines permet de comprendre les mécanismes communs et donc les analogies de fonctionnement. Le problème à résoudre ou l'innovation à trouver dans une discipline peuvent donc ensuite être décrits de manière générale, et résolus grâce à une solution fournie par une autre discipline.

1.1.2.3.3 Modèle *Function-Behaviour-Structure*

Le modèle de conception *Function-Behaviour-Structure*, ou FBS (Gero 1990) est une ontologie qui représente le processus descriptif de transformation d'un ensemble de fonctions F en une description de conception D. Le processus de transformation de F en D implique les activités suivantes : formulation, synthèse, analyse, évaluation, reformulation et production de D. Les résultats sont les fonctions, le comportement attendu, la structure, le comportement dérivé et la description de la conception.

1.1.2.3.4 Conception générative

La conception générative est basée sur le couplage entre évaluation et évolution, à travers un processus itératif. Le concepteur affine ainsi à chaque itération ses objectifs de conception. Si le design génératif n'est pas nécessairement basé sur la conception numérique, de nombreux concepteurs les associent. Parce que cette approche numérique rend le processus efficace et efficient, de nos jours, presque tous les designers qui adoptent la conception générative utilisent cette approche informatique.

S'inscrivant dans cette approche, la méthode OIA (*Observation, Interpretation, Aggregation*) permet de soutenir le processus de prise de décision pour guider le concepteur vers la sélection des meilleures solutions de conception. Les solutions potentielles sont notées selon un index global d'objectif à maximiser qui combine les différents critères attendus pour le design. Il s'agit donc d'un cadre permettant de clarifier le processus d'optimisation d'une conception (Collignan 2012). Cette méthode s'appuie d'ailleurs sur l'ontologie FBS introduite en 1.1.2.3.3 (Figure 1.4).

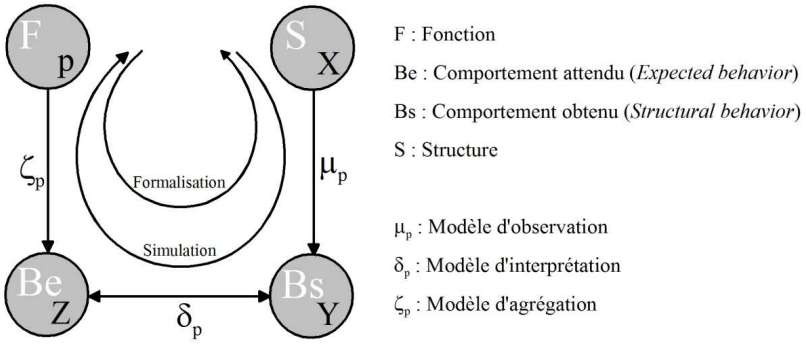


Figure 1.4 - Ontologie FBS et Méthode OIA (Collignan 2012)

1.1.3 Conception bio-inspirée

La conception s'est structurée autour de théories et modèles, méthodologies, méthodes et outils. Pour s'approprier l'approche bio-inspirée, la compréhension des avantages et limites de ces théories et modèles concrets est donc nécessaire. Cette section donne un aperçu des théories, méthodologies et outils, ciblés par la littérature comme pertinents pour l'approche bio-inspirée, ou spécialement développés pour.

1.1.3.1 Théories de conception bio-inspirées

1.1.3.1.1 Typologie

Le processus de conception bio-inspirée peut être mené selon les deux approches décrites dans 1.1.2.2 ; une approche orientée problème ou bien solution. La première approche, aussi désignée comme « *problem-driven* » (Vattam, Helms, et Goel 2007), « *problem-based* » (Badarnah et Kadri 2015a) « attrait technologique » (ISO 18458:2015 2015), « top-down »(Speck et Speck 2008), entend que le point de départ du processus est un problème identifié appartenant au domaine technologique. Le Shinkansen, train japonais le plus rapide du monde à sa création, avait par exemple la problématique de générer des déflagrations sonores à chaque sortie de tunnels dues à un changement de densité majeur de l'air qu'il pénètre. Pour résoudre ce problème, les équipes de la compagnie JR-W se sont inspirées d'une solution dans le domaine de l'ornithologie, en s'inspirant de la forme du bec du martin pécheur, dont l'aérodynamisme lui permet une plongée sans grande résistance dans l'eau pour attraper ses proies (O'Rourke et Seepersad 2015). Ainsi, la sortie du tunnel est à comparer avec l'entrée dans l'eau du martin pêcher, la solution étant la forme aérodynamique du bec.

La seconde approche, identifiée comme « *solution-based* » (Badarnah et Kadri 2015b), « poussée biologique » (ISO 18458:2015 2015), « *bottom-up* » (Speck et Speck 2008), a pour point de départ la découverte d'une propriété biologique ensuite transférée vers une solution technique. Un exemple iconique est celui de l'effet lotus, observé et décrit dans les années 1970 à l'échelle microscopique et utilisé 30 ans plus tard pour des revêtements hydrophobes appliqués à des vitres pour un effet auto-nettoyant (Zhang et al. 2016).

Cette dernière approche repose généralement sur la sérendipité et serait l'approche majoritairement utilisée pour les produits biomimétiques mis sur le marché (Jacobs, Nichol, et Helms 2014). L'approche par attrait technologique parait quant à elle la plus adaptée pour une utilisation systémique et généralisée dans un milieu industriel puisqu'elle démarre dans un milieu technique, où amélioration continue et innovation de rupture sont très souvent de mise (Fayemi 2016).

1.1.3.1.2 Théories

Dans une approche orientée problème, la théorie bioTRIZ (Vincent et al. 2006) – dérivée de la méthode de résolution de problèmes TRIZ (Altschuller 2004) – aide à résoudre un problème technique par l'implémentation d'une solution bio-inspirée en transposant les informations biologiques dans un langage proposé à l'ingénierie. Un inconvénient possible est que les stratégies proposées sont des idées théoriques, qu'on ne retrouve pas forcément dans la nature.

L'approche par attrait technologique peut également grandement bénéficier de théories du raisonnement de conception (Chakrabarti et Blessing 2015) telles que la théorie descriptive C-K (Hatchuel et Weil 2009; Shai et al. 2012) qui a été appliquée dans plusieurs contextes industriels pour améliorer la capacité d'innovation des organisations (Salgueiredo et Hatchuel 2014).

La modélisation d'un problème par un langage fonctionnel, déclinée sous forme de nombreux modèles dans la littérature, semble également adéquate pour alterner d'un domaine d'ingénierie au domaine de la biologie. Utilisée par des outils tels que IDEA-INSPIRE (Chakrabarti et al. 2005) ou DANE (*Design by Analogy to Nature Engine* (Vattam et al. 2011)) notamment qui sont basés sur des FBS (voir 1.1.2.3.3 Modèle *Function-Behaviour-Structure*), la modélisation fonctionnelle s'accompagne naturellement de bases de données exploitables pour les concepteurs à la recherche de modèle d'intérêt pour leur problème. Celles-ci doivent cependant être alimentées et demandent un certain investissement, d'entrée ou en continu, pour atteindre un niveau d'information satisfaisant pour l'utilisateur.

1.1.3.1.3 Processus

L'essor de la bio-inspiration s'est accompagné d'un développement de nombreux processus de conceptions basés sur certaines des approches théoriques décrites en 1.1.3.1., voués à faciliter et promouvoir sa démarche.

La méthode *Biomimicry Thinking* donne par exemple un cadre de travail se basant sur 4 étapes – cadrage, exploration, création, évaluation – qui assure l'intégration de fonctions et stratégies du vivant au sein de la conception. D'autres processus se démarquent par une succession d'étapes plus ou moins nombreuses qui peuvent par exemple intégrer des méthodes de conception automatisées (Nagel, Nagel, et al. 2010). A partir d'observations empiriques, Goel, McAdams et Stone (2014, chap. 6) indiquent qu'un processus par attrait technologique nécessite au cours du processus un recadrage du problème, qui implique son itération, créant ainsi deux processus disjoints. Enfin, l'objectif de développer un processus général pour l'aide à la conception basée sur l'inspiration biologique a mené à des efforts d'harmonisation. En 2015, la norme (ISO 18458:2015 2015) propose deux processus abstraits, qui peuvent ainsi servir de référence à l'approche bio-inspirée.

Sur la thématique de l'enveloppe du bâtiment, BioGen (Badarnah et Kadri 2015a) et Kuru *et al.*(2020) décrivent un modèle d'exploration cartographique à partir d'une base de données, BioGen étant construit à partir de cas pratiques en architecture, mais ne se limitant qu'à quelques exemples.

1.1.3.2 Méthodes et Outils

En support des étapes ou activités contenues dans les processus, il est possible d'utiliser une multitude d'outils ou méthodes créés ou non pour la conception biomimétique. Un grand nombre d'entre eux – bases de données, thésaurus, ontologies, taxonomies – est comparé et référencé dans la littérature (Fu et al. 2014), (Goel et al. 2014), (Glier et al. 2012), (Nagel et Stone 2012). Les sections suivantes en décrivent quelques-uns.

1.1.3.2.1 Outils DSC

Les DSC (database / static list / catalogue) sont des bases de données, listes statiques et catalogues qui listent les espèces vivantes, leurs principes et fonctions, et qui peuvent être mises à jour manuellement. La plus connue est AskNature (Deldin et Schuknecht 2014a), une plateforme en ligne référençant presque 1700 stratégies biologiques. Les DSC peuvent servir tout au long du processus biomimétique tel que décrit par (Fayemi 2016), mais n'évoluent que s'ils sont mis à jour. Souvent en support des DSC, des taxonomies décrivent les organismes vivants et les regroupent en taxons, tel que *Biomimicry Taxonomy* (The Biomimicry Institute 2015).

1.1.3.2.2 Ontologies

Les ontologies, comme *Ontology explorer*, *Ontology for bioinspired design* (Yim, Wilson, et David 1996), E2BMP (McInerney et al. 2018) permettent de catégoriser les principes et les fonctions biologiques. Des ontologies fréquemment citées dans la conception biomimétique sont les SBF, telles que Dane (Vattam et al. 2011), SAPPhire (Srinivasan V et Chakrabarti 2009) et IDEA INSPIRE (Siddharth et Chakrabarti 2018). Elles sont principalement utilisées lors de l'identification d'un modèle biologique pertinent.

1.1.3.2.3 Thésaurus

Les thésaurus sont des répertoires utilisés pour l'indexation de documents et la recherche de ressources, tels que Biops (Fraunhofer IAO 2010) ou *Engineering-to-biology thesaurus* (Nagel, Stone, et McAdams 2010). Comme les ontologies, ils permettent d'identifier des modèles biologiques, et aident également à réaliser l'étape qui précède, c'est-à-dire le transfert du problème technique à la biologie.

1.1.3.2.4 Outils divers

Les outils, provenant du domaine de l'ingénierie comme les *9-screens* (Altschuller 1988) ou les *5-whys* (Ohno 1988), ou provenant du domaine de la biologie, peuvent également prendre sens pour des taches d'abstraction. Il peut cependant être souligné que les outils de biologie utilisés dans les processus de conception biomimétiques ont majoritairement été créés par des ingénieurs et non par des biologistes (Graeff et al. 2019), et ce dans le but de compenser l'absence d'interdisciplinarité.

1.1.3.3 Conclusion

La liste de processus, méthodes et outils décrite dans cette section n'est pas exhaustive, tant ils en existent toutes disciplines confondues. Comme le souligne Fayemi (2016), l'absence d'harmonisation des termes liés à la bio-inspiration, bien qu'en amélioration ces dernières années notamment grâce à la norme (ISO 18458:2015 2015), n'aide pas à leur agrégation, et ne facilite donc pas l'amélioration de ces outils.

Ces outils exploitent des méthodologies qui reposent sur des théories de conceptions générales diverses et variées. Appliqué au bâtiment et aux objectifs de cette thèse, le choix d'un processus adapté parait fondamentalement vaste, et bénéficierait d'un affinage basé sur un retour d'expérience lié à la pratique. De plus, si les processus appliqués au bâtiment proposés dans la littérature semblent prometteurs, ils n'ont pour l'instant pas mené à un produit construit et se limitent au mieux à de la simulation.

1.2 Pratique de la conception bio-inspirée appliquée aux enveloppes du bâtiment

Le bâtiment nécessite la gestion de nombreux aspects, tels que les transferts de chaleurs, de lumière ou bien d'humidité. En réponse à des besoins croissants en performances énergétiques et environnementales, les systèmes d'enveloppes sont donc de plus en plus complexes. Le Chapitre 2 détaille d'ailleurs ces exigences dans la partie 2.2.1 Formulation du « problème ». Si la majorité des enveloppes de bâtiments conventionnels sont statiques, on voit émerger le concept d'architecture cinétique (Zuk et Clark 1970), déformable, adaptable, mobile, et sous diverses formes. Par architecture interactive (Pan et Jeng 2010), contrôles automatiques en lien avec le climats (Nguyen et Aiello 2013), ou encore auto-réactivités des matériaux (Menges et Reichert 2012), les enveloppes du bâtiment s'arment de mécanismes destinés à adapter le

bâtiment aux sollicitations environnementales que celui-ci subit. Le vivant, nécessitant une adaptation constante aux conditions qui l'entoure, déploie en ce sens une diversité de fonctions très efficientes (voir également Chapitre 2).

Aussi, avec l'engouement relativement récent de la bio-inspiration, des nombreux travaux se sont focalisés sur la bio-inspiration pour proposer de nouvelles solutions architecturales. Un certain nombre de concepts d'enveloppes du bâtiment inspirés de modèles biologiques sont proposés dans la littérature et observés à travers le monde. Le référencement de bâtiments ou enveloppes bio-inspirés dans la littérature s'avère cependant fastidieux tant les termes encourus diffèrent, voire sont erronés dans le cas de champs d'applications proches, telles que les NBS ou la bio-assistance. Les définitions données par la norme (ISO 18458:2015 2015) et indiquées en Introduction aident à s'assurer du caractère bio-inspiré des exemples trouvés bien que l'ambiguïté persiste parfois. Par exemple, l'inspiration de minéraux (Fondation Jean-Jaurès 2021), ou encore de formes physiques, telles que la structure des bulles de savon par Frei Otto (Burkhardt 2020), ne relève pas *stricto sensu* de la bio-inspiration ; elles sont néanmoins d'intérêt, si la démarche de conception nécessite bien l'abstraction d'un modèle du monde qui nous entoure pour innover.

Kuru *et al.* (2019) recense plus de cinquante enveloppes bio-inspirées adaptatives, mais souligne que plus de la moitié se limite aujourd'hui à stade de développement conceptuel. Outre cette étude, il est difficile d'établir une longue liste de concepts d'enveloppes bio-inspirés qui en sont à un stade technologique avancé, c'est-à-dire du prototype de démonstration au bâtiment construit. Une analyse bibliographique met en évidence quelques applications architecturales d'envergure, ou des démonstrateurs ou pavillons à des échelles plus modestes. La Figure 1.5 illustre deux applications emblématiques en architecture bio-inspirée.

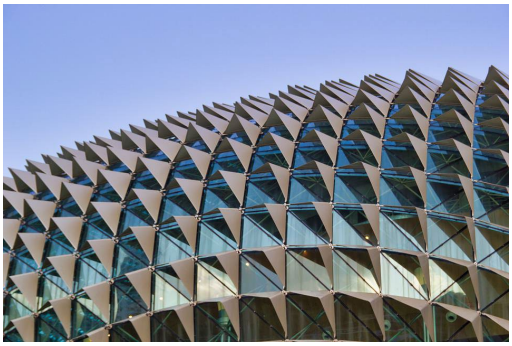
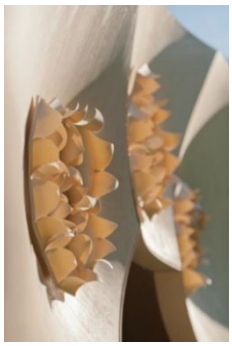
(a)  (b) 

Figure 1.5 - (a) Esplanade – Theater on the Bay, Singapour (Pixabay Licence), (b) Hygroskin (Source : http://www.achimmenges.net/)

L'Esplanade du Theater on the Bay (Figure 1.5a), création en collaboration entre Michael Wilford, Atelier One et DPA Architects, est un centre culturel ouvert depuis 2022, qui utilise un système d'ombrage inspiré de la peau du fruit du durian. Ce fruit aurait une peau recouverte d'épines, ce qui entre autres, lui permettrait une meilleure conservation face au soleil. L'arrangement de panneaux aluminium filtre la lumière naturelle et peuvent changer de direction en fonction de la position du soleil (Chayaamor-Heil et al. 2018). Le pavillon Hygroskin présenté en Figure 1.5b est lui un projet phare de l'architecte Achim Menges de

l'Université de Stuttgart, inspiré du cône de pin, réagissant aux variations d'humidité dans l'air par le comportement élastique en flexion de minces feuilles de contreplaqué (Correa et al. 2013).

Les recherches menées par les groupes de recherche collaborative du SFB-TRR, dont Achim Menges fait partie, précisent leurs cadres méthodologiques (Knippers et al. 2016), et détaillent les divers moyens mis en œuvre pour leurs réalisations biomimétiques. Hormis cet exemple, les processus et outils tels que présentés dans la partie 1.1.3, sont étonnamment peu décrits dans la littérature, si bien qu'il est difficile d'évaluer le rôle de l'interdisciplinarité dans la conception. Quelques exceptions, comme des applications iconiques et moins contemporaines (Crystal Palace pour l'exposition universelle de 1851, Tour Eiffel pour l'exposition universelle de 1889), sont bien documentées mais restent peu représentatives d'un processus visant la conception d'une œuvre à coûts réduits et avec des moyens de mise en œuvre simples, dans une optique de massification.

L'analyse de cas bio-inspirés à travers la littérature est donc assez limitée et ce malgré un nombre faible mais croissant d'applications architecturales concrètes. Pour répondre à nos interrogations sur les approches utilisées qui ont mené à la concrétisation de concepts, des échanges directs avec les concepteurs sur un panel d'applications bio-inspirées plus restreint ont été réalisés.

1.2.1 Analyse comparative d'applications bio-inspirées

1.2.1.1 Article – Energy and Buildings

Ce travail vise à fournir une meilleure compréhension des multiples critères impliqués dans le processus de conception en impliquant les équipes de conception de projets existants dans l'analyse. Pour cela, l'étude qui suit se focalise sur trente cas bio-inspirées au TRL supérieur à 6 (démonstration d'un modèle ou d'un prototype de système/sous-système dans un environnement pertinent représentatif) et intégrés à l'échelle de l'enveloppe du bâtiment (par exemple matériau, élément de façade, système d'ombrage).

L'article a été soumis auprès du journal **Energy and Buildings** le 6 mai 2020, accepté le 15 avril 2021 et publié le 12 mai 2021.

1.2.1.1.1 Présentation de l'article

Un total de trente enveloppes bio-inspirées a été retenu pour cette étude. Afin évaluer l'ensemble des processus de conception utilisé pour mener à ces cas, sept catégories de variables ont été définies : deux catégories destinées à décrire le contexte général et l'approche principale adoptée par les concepteurs, puis cinq catégories correspondant aux étapes de conception proposées par l'ISO (ISO 18458:2015 2015) (voir Figure 1.6). Celles-ci se déclinent en variables diverses, telles que les outils utilisés, les contraintes rencontrées, ou encore l'implication de biologistes durant la démarche. Les processus de conception respectifs ont été

évalués par le biais d'une série de questions adressées aux équipes de conception lors de visites, de discussions et d'échanges écrits.

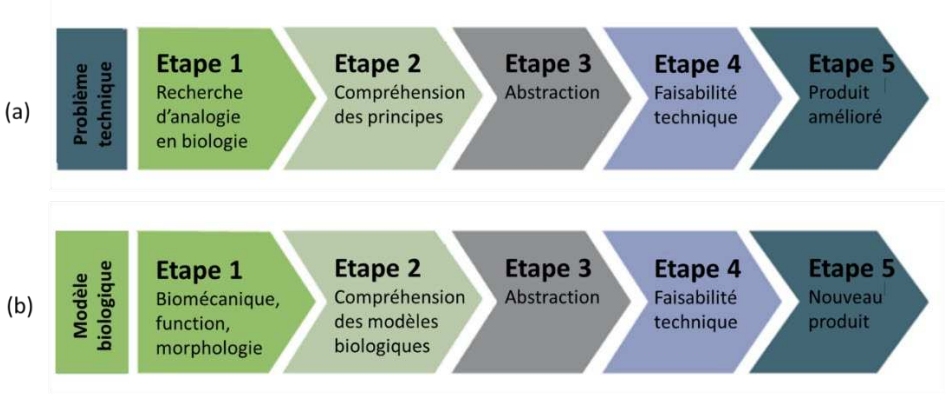


Figure 1.6 - Processus bio-inspiré (a) orienté problème, (b) orienté solution, adapté de (ISO 18458:2015 2015) et traduit de Cruz, Hubert *et al.* (2021).

Les données recueillies soulignent l'absence systémique de méthodologie rigoureuse des équipes de conception (voir extrait dans le Tableau 1.1). En outre, la frontière entre processus orienté solution ou problème est faible ; les concepteurs interrogés n'emploient pas une démarche linéaire, mais qui consiste plutôt en des boucles de rétroaction et des itérations.

Tableau 1.1 - Extrait des tableaux 4, 6 et 7 de Cruz, Hubert *et al.* (2021).

Variables	**Distribution des paramètres (%)**
Cadre de conception	**95% Non** | 5% Oui
Type de connaissance	**58% vouées au grand public** | 40% pour les spécialistes | 12% créés par des spécialistes et/ou par l'expérimentation au cours du processus de conception
Biologistes	**47% Pas d'interactions avec l'équipe** | 31% Biologistes intégrés à l'équipe | 21% biologistes consultés
Outils pour la compréhension biologique	**80% NA** | **20% aucun** | BDD | Ontologie | Taxonomie | Thesaurus | Méthode | Algorithme
Nombres de modèles	**84% Simple** | 16% Multiple
Outils pour l'abstraction	**73% NA** | 21% Aucun | 6% Autre
Outils d'optimisation	**44% CAO** | **44% modèles (maquettes)** | 12% calculs rapides

Les outils utilisés par les concepteurs interrogés sont non spécifiques à la démarche bio-inspirée. Par exemple, le modèle biologique inspirant est généralement choisi de façon très subjective ; l'utilisation d'outils pour comprendre son fonctionnement et pour sa sélection pour la suite du processus semble rare ou bien dévolue aux biologistes. De même, la phase d'abstraction repose fortement sur l'expertise de l'équipe de conception et sur son propre processus de créativité.

Une analyse multivariée, ou MCA (*Multiple Correspondance Analysis*) des variables choisies et des données recueillies indique une disparité claire entre deux groupes de cas bio-inspirés :

les projets de recherches et académiques, caractérisés par la collaboration étroite avec des biologistes durant leur processus, ainsi que des techniques de fabrications peu courante et complexes, et les bâtiments publics, sur des techniques de construction plus conventionnelles pour une innovation incrémentale (voir plus de détails en Annexe A). Certains efforts conjoints entre les milieux de la recherche et les marchés publics pourraient ainsi conduire à un nouveau développement dans le domaine de la bio-inspiration. Pour les projets de construction publique où le temps disponible est non compressible, les progrès biologiques tels que la génération de connaissances, la création d'outils structurants et l'exploration de données biologiques, peuvent considérablement aider le processus de conception biomimétique.

Enfin, les résultats démontrent que l'intégration des connaissances biologiques a une forte influence sur les étapes suivantes de la conception et sur le résultat final, puisque les projets universitaires ont donné lieu à une innovation radicale alors que les bâtiments publics ont été conçus de manière progressive.

Energy & Buildings 246 (2021) 111034

Contents lists available at ScienceDirect

Energy & Buildings

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enb

Design processes and multi-regulation of biomimetic building skins: A comparative analysis

Estelle Cruz [a,b,1,*], Tessa Hubert [b,c,d,1], Ginaud Chancoco [e], Omar Naim [e], Natasha Chayaamor-Heil [f], Raphaël Cornette [g], Christophe Menezo [h], Lidia Badarnah [i], Kalina Raskin [a], Fabienne Aujard [b]

[a] CEEBIOS, European Centre in Biomimetics, France
[b] MECADEV UMR CNRS 7179 - National Museum of Natural History of Paris, France
[c] NOBATEK/INEF4, Talence, France
[d] University of Bordeaux, CNRS, Arts et Metiers Institute of Technology, Bordeaux INP, INRAE, I2M Bordeaux, 33400 Talence, France
[e] ENSA Lyon, MAP ARIA UMR CNRS MCC 3495, France
[f] UMR MAP MAACC 3495 CNRS/MC, France
[g] Institut de Systématique, Evolution, Biodiversité (ISYEB), UMR 7205 Muséum National D'Histoire Naturelle, CNRS, Sorbonne Université, EPHE, Université des Antilles, CP 50, 57 rue Cuvier, 75005 Paris, France
[h] University Savoie Mont Blanc, LOCIE UMR 5271, Chambéry, France
[i] University of the West of England, BS16 1QY Bristol, United Kingdom

ARTICLE INFO

Article history:
Received 6 May 2020
Revised 22 March 2021
Accepted 15 April 2021
Available online 12 May 2021

Keywords:
Methods
Design process
Bioinspired building skin (Bio-BS)
Biological model
Biomimetics
Multivariate analysis
Univariate analysis

ABSTRACT

Biomimetics is an opportunity for the development of energy efficient building systems. Several biomimetic building skins (Bio-BS) have been built over the past decade, however few addressed multi-regulation although the biological systems they are inspired by have multi-functional properties. Recent studies have suggested that despite numerous tools and methods described in the literature for the development of biomimetic systems, their use for designing Bio-BS is scarce. To assess the main challenges of biomimetic design processes and their influence on the final design, this paper presents a comparative analysis of several existing Bio-BS. The analyses were carried out with univariable and multivariate descriptive tools in order to highlight the main trends, similarities and differences between the projects. The authors evaluated the design process of thirty existing Bio-BS, including a focus on the steps related to the understanding of the biological models. Data was collected throughout interviews. The univariate analysis revealed that very little Bio-BS followed a biomimetic design framework (5%). None of the Bio-BS was as multi-functional as their biological model(s) of inspiration. A further conclusion drawn that Bio-BS are mostly inspired by single biological organisms (82%), which mostly belong to the kingdom of animals (53%) and plants (37%). The multivariate analysis outlined that the Bio-BS were distributed into two main groups: (1) academic projects which present a strong correlation with the inputs in biology in their design processes and resulted in radical innovation; (2) public building projects which used conventional design and construction methods for incremental innovation by improving existing building systems. These projects did not involve biologists neither a thorough understanding of biological models during their design process. Since some biomimetic tools are available and Bio-BS have shown limitations in terms of multifunctionality, there is a need to promote the use of multidisciplinary tools in the design process of Bio-BS, and address the needs of the designers to enhance the application of multi-regulation capabilities for improved performances.

© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Building skins are multi-criteria systems that require the control of several environmental factors, such as heat, light, humidity, ventilation and mechanical stress. Their performances highly influence the building total energy consumption, since they filter the environmental constraints [1, Ch. 1]. In order to improve building skins efficiency, academics and industries have explored nature-inspired solutions that are referred to Bio-BS (Bio-Inspired Building Skins).

Biomimetics is an interdisciplinary approach based on the integration of biology and technology, by transferring nature's

* Corresponding author.
E-mail address: estelle.cruz@ceebios.com (E. Cruz).
[1] These authors have contributed equally to this work.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111034
0378-7788/© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

principles into a technological solution [2,3]. This approach has inspired innovation in diverse fields and had a significant impact in architecture for the design of sustainable built-environments [4–10]. International research has focused on the development of adaptive energy efficiency of building skins where biomimetics was implemented as a sub-research category [11,12]. As a result, more than seventy case studies and designs of bio-inspired building skins were reported over the last two decades, and this number is rapidly growing across industry and academia [13–18]. However, few of these cases address multi-criterion challenges. Kuru et al. [17] has outlined that only 13.4% of fifty-two published biomimetic adaptive skins (Bio-ABS) control more than one parameter. While Svendsen et al. [19] reviewed eight methodologies and twelve design stage-specific tools that addressed multi-functionality in biological inspired design, it appears that multi-functionality is not yet embedded in biomimetic envelopes and needs further development to address multiple contradictory functional requirements [17,19], [20, Ch. 8], [21]. More generally, these observations converge with recent studies [22–25], showing limited use of existing tools and frameworks to promote the development of multi-functional biomimetic applications.

In order to identify the main obstacles for the design of biomimetic building skins, this study presents a qualitative and quantitative analysis of thirty built bio-inspired building skins (Bio-BS). Their respective design processes were evaluated through a set of questions addressed to the design teams during visits, discussions and written exchanges. Univariate and multivariate analyses were carried out with the collected information, with a strong focus on the integration of biological concepts during the design process, and their impact on the final design of the Bio-BS.

2. Bio-BS design

2.1. Design process

Bio-BS follow different definitions according to ISO 2015:18458 [2]:

- *Bioinspiration*: Creative approach based on the observation of biological systems.
- *Biomimetics*: Interdisciplinary cooperation of biology and technology or other fields of innovation with the goal of solving practical problems through the function analysis of biological systems, their abstraction into models, and the transfer into and application of these models to the solution.
- *Biomimicry*: Philosophy and interdisciplinary design approaches taking nature as a model to meet the challenges of sustainable development.

Two main approaches exist in such design processes: 'technology pull' or 'biology push'. The ISO has provided the following definitions: **the technology pull process** is a "*biomimetic development process in which an existing functional technical product is provided with new or improved functions through the transfer and application of biological principles*". **The biology push process** is a "*biomimetic development process in which the knowledge gained from basic research in the field of biology is used as the starting point and is applied to the development of new technical products*" [2]. The generic steps are presented in Fig. 1 for each approach.

2.2. Design tools

There exists a wide range of methods and tools in literature to support biomimetic design processes [22]. Nevertheless, due to the interdisciplinary nature of biomimetics designers still tackle certain challenges in the search for, and the selection of appropriate models and strategies [26]. The search for analogies between buildings and natural systems is a common trend to address existing challenges, where seeking different classification categories have emerged, e.g. [5,8,20,27]. Addressing multi-functionality is another challenging topic, where it has been addressed in limited studies only [19], mainly due to its complexity and the need to address multiple contradictory functional requirements at the same time [17,19], [20, Ch. 8]. Existing efforts explore different avenues to develop frameworks that could assist in transferring multi-functionality from nature into biomimetic designs, such as focusing on multi-criteria requirements [28], on the correlation between morphology and environment [26,27] and on hierarchy and heterogeneity [29]. However, these frameworks are still under development and hardly applied in design solutions by the wider community. Therefore, there is a need not only to develop tools that support multi-functional applications but also to promote their use by the wider design community. This work aims to provide a better understanding of the multiple criteria involved in the design process by involving design teams of existing projects in the analysis. For this reason, 30 biomimetic building skins (Bio-BS) were selected for this study.

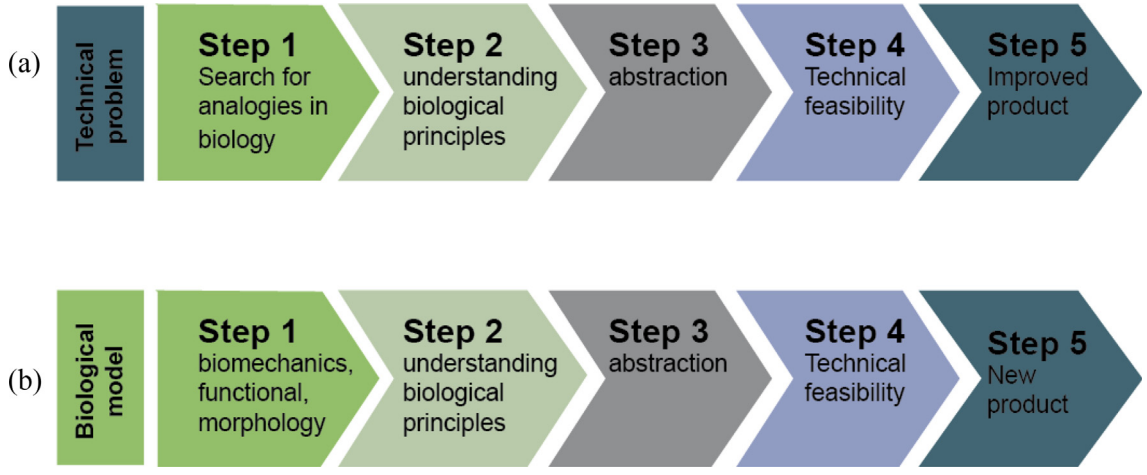


Fig. 1. Biomimetic design process. (**a**) technology pull, (**b**) biology push. Adapted with permission from ISO standard 2015:18458 [2].

Fig. 2. Overview of the 30 Bio-BS. With permission from: (1) © PLY Architecture, (2) © DO SU Studio Architecture, (3) © Decker Yeadon LLC, (4) © Tobias Becker, (5) © Art and Build, (6) © SL Rasch, (7) Estelle Cruz CC0 Creative Commons, (8) © Tom Ravenscroft, (9) © Tom Ravenscroft, (10) CC0 Creative Commons Licence, (11) © Frei Otto, (12) CC0 Creative Commons Licence, (13) © ARUP, (14) © Oast House Archive, (15) Regis L'Hostis, (16–30) © ICD/ITKE University of Stuttgart.

2.3. Overview of the 30 Bio-BS

An overview of the thirty Bio-BS are presented in Fig. 2. Table 2 lists them according to three criteria:

- The designs are above a Technology Readiness Level (TRL) of 6, which means they are either a *"system/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment"* [30]. It excluded student or research projects which had not resulted in a prototype so far. A TRL of 6 ensured that the projects at least have run through the design process enough to provide feedback on the methodological aspects.
- The projects met the definitions of either bioinspiration, biomimicry or biomimetics according to [2] Thus, they have different rigor in terms of biological data mining, understanding, and abstraction; however, they all derived from a creative approach based on the observation of biological systems.
- The bioinspired element of the Bio-BS is embedded at the scale of the building envelope from material, façade component, shading system, wall, fenestration, roof to envelope according to the classification of [31].

Biomimetic research pavilions (TRL = 6) designed by ICD/ITKE at Stuttgart University counted for half of the selection. They resulted from interdisciplinary biomimetic design processes within the collaborative research centre SFB-TRR 141 between the University of Stuttgart (ICD / ITKE research labs), Tübingen and Freiburg (the research group Plant Biomechanics) [32] Although performance of research pavilions highly differs from the building envelopes of public buildings, their biomimetic design processes remained relevant for this study since they were designed beyond the limitations of the real-world constructions. In order to compare the biomimetic design process in several contexts, this study assessed both real-world applications and prototype academic experimentations.

3. Methods

Thirty applications of Bio-BS have been selected according to three selection criteria in order to analyse their design process. Data was gathered throughout interviews of the designers, architects and engineers involved in the design of the Bio-BS. We first compared the Bio-BS using univariate analysis to highlight the main trends, then we compared these applications using multivariate analysis in order to show correlations between them.

3.1. Data collection

To assess the whole design process of the selected Bio-BS, seven categories of qualitative variables were defined. The first two categories provided the context of the Bio-BS (location, climate, etc.) and the biomimetic design process (purpose, main tools, etc.). Then, the following categories corresponded to the five biomimetic design steps according to ISO standard 2015:18458 [2]. These parameters and categories were chosen before identifying the thirty cases based on existing categorisations for building facades [31,33], biomimetic tools [22], and biomimetic facades [17,34]. Table 1 provides an overview of the variables and parameters, and Table 2 presents the 11 variables within the 34 presented in Table 1. They were chosen since they add new knowledge to the field collected during the interviews. A data sheet was created for each case study (Table 2), including the variables listed in Table 1. The information was first collected going through literature, then reviewed with the designers for validation. The reviews were conducted as follows:

- digital exchange through online datasheet using comments or direct modifications of parameters from the designers (Ids. 1–3, Table 2),
- phone calls and videoconferences (Ids. 11, 18–22, Table 2),
- face-to-face exchanges, discussions during conferences (Id. 5, 8, 10, 14, 15, Table 2), participant observations (Id. 7 for 10 weeks, Id 13 for 12 weeks, Ids. 16–30 for 2 weeks, Table 2).

3.2. Analysis

Information on the interviews (names/role of interviewees, type and durations of interviews) are given in supplementary data. Overall, 25 of the 30 Bio-BS data sheets received feedback from the designers. The collected data is available in two additional supplementary documents: an excel sheet gathers all results to the variables listed in Table 1 (on request), and an online report provides an overview of each project [103].

Data analysis was conducted through:

- **Multivariate analysis** ($n_{cases} = 30$) using Multiple Correspondence Analysis (MCA). MCA is a descriptive technique to bring to light correlations between variables in a complex dataset. It

Table 1
Full overview of the variables of analysis clustered in seven categories.

Category	Variable	Parameter
Bio-BS Context	Name	–
	Climate	A (tropical) | B (dry) | C (temperate) | D (continental) | E (polar)
	Continent	Europe | America | Asia | Africa
	City	–
	Country	–
	Year of construction	–
	Surface (m^2)	–
	Cost (€/m^2)	–
	Type of building	Housing (individual or collective) | Pavilion | Exhibition hall | Religious building | Office | Other
	Renovation	Yes | No
Biologically-inspired design process	Main motivation of the designers	Energy efficiency | Occupant's comfort | Structure performance | Sustainability
	Outsourced steps	Step 1 (Functional analysis) | Step 2 (Understanding of biological principles) | Step 3 (Abstraction) | Step 4 (Feasibility) | Step 5 (Outcome) | None
	Major constraints	Technical problems | Use of biomimetic tools | Law regulations | Lack of funds | Other
	Use of design framework	No |Yes
Step 1. Identification of biological models	Approach	Biology push | Technology pull
	Definition	Biomimetics | Bio-inspiration | Biomimicry
Step 2. Selection of biological principles	Models' kingdom	Animalia | Plantae | Protista | Archaea | Fungi | Bacteria
	Number of models	Single | Multiple
	Tools for understanding and selection of relevant biological models	Database | Ontology | Taxonomy | Thesaurus | Method | Algorithm | Other | None
	Knowledge	Non-scientific sources | Scientific sources | Created by academics and/or by experimentation during the design process
	Biologists' inputs	Biologists consulted | Biologists integrated in the design process | No interaction with any biologists
Step 3. Abstraction	Abstracted functions of regulation	One function | Two functions | Three functions | More than three functions
	Tools for abstraction	Database | Ontology | Taxonomy | Thesaurus | Method | Algorithm | Other | None
	Level of innovation	Radical | Incremental
Step 4. Technical feasibility	Optimization tools	Quick calculation | CAD/computational tools software | models (mock-ups) | Other
	Design complexity	High | Low
	Construction complexity	High | Low
Step 5. Outcome: improved or new design	Integration scale of bioinspiration	Material | Façade element | Shading system | Wall | Roof | Fenestration | Envelope
	Technology Readiness Level	TRL9 | TRL8 | TRL7 | TRL6
	Comfort	Thermal comfort | Visual performance | Indoor air quality | Mechanical stress resistance | Acoustic quality | Other
	Assessment of energy and structural performances	Yes | No
	Operational state	Still operating | Destroyed | Not yet operating
	Main component	Polymer | Alloys | Concrete | Wood | Textile | Glass fibre
	Adaptation to stimuli	No | Yes
	Adaptable to renovation	No | Yes

Table 2
Full overview of the thirty Bio-BS comparative information collected from literature and interviews. **Type of building**: Public Building (Pub.), Housing (H), Pavilion (Pav.) – **Main motivation(s) of the design teams**: Energy efficiency (EE), Occupant's comfort (Oc), Structure performance (S), Sustainability (Su) – **Approach**: Biology push (Bio), Technology pull (Tech) – **Models kingdoms**: Animalia (An), Plantae (Pl), Protista (Pr), Archaea (Ar), Fungi (Fun), Bacteria (Ba) - **Level of scientific knowledge**: Non-academic sources (nAS),academic sources (AS) , Created by academics and/or by experimentation during the design process (C) – **Abstracted functions**: 1 to more than 3 - **Level of innovation**: Radical (Rad), Incremental (In) – **Construction complexity**: High (H), Low (L) – **Integration scale:** Material (M), Façade element (FE), Roof (R), Envelope (E) – **Assessment of energy performance:** yes, no, na **– Contribution to general building challenges**: Thermal comfort (T), Visual performance (V), Indoor air quality (I), Mechanical stress resistance (Me), Acoustic quality (A), Other (O). Mentions 'na' means not available where the authors could not provide an answer with certainty.

Id	**Building envelopes** (City, Country, Date) Description of the biomimetic system	Type of building	Main motivation(s) of the design teams	Approach	Models' kingdom	Knowledge	Abstracted function	Level of innovation	Complexity constr.	Integration scale	Energy performance	Comfort impact
1	**Shadow Pavilion** (Ann Arbor, Michigan, USA, 2009) – Pavilion inspired by the concept of phyllotactic to optimize the geometry [35–37]	Pav.	Oc, S, Su	Bio	Pl	AS, nAS	3	rad	H	FE	no	O
2	**Bloom** (Los Angeles, USA, 2011) – Adaptive material inspired by adaptation mechanisms in nature [38–40]	Pav.	EE, Oc	Bio	An	nAS	2	rad	H	M	no	T,V
3	**Homeostatic facade** (NYC, New York, USA, 2012) – Adaptive shading system inspired by mammals' muscles to manage light and thermal comfort [41–43]	Pub.	EE, Oc	Bio	An	nAS	2	rad	H	FE	no	T,V
4	**Breathing Skin pavilion** (Mandelbachtal, Germany, 2015) – Pneumatic façade component inspired by human skin for light, air and thermal regulation [44]	Pav.	EE, Oc	Bio	An	nAS	3	rad	H	FE	no	T,V, I
5	**Pho'liage Façade** (France, Lyon, 2020) – Adaptive shading system inspired by opening and closing of flower petals and plants' stomata [45,46]	Pub.	EE, Oc, Su	Tech	Pl	AS, nAS	2	rad	H	FE	na	T,V
6	**Umbrella Al Hussein Mosque** (Cairo, Egypt, 2000) – Deployable shading system inspired by opening and closing of flower petals [47 48]	Pub.	S	Tech	An	nAS	2	in	H	FE	no	T,V
7	**Sierpinski Forest** (Kyoto & Tokyo 2008, Japan and Tainan, Taïwan 2019) – Sun-shading façade component inspired by the fractal geometry of trees [49–51]	Pub.	EE, Oc, Su	Bio	Pl	AS	2	rad	L	FE	yes	T,V
8	**Esplanade Theatre Singapore** Art Centre (Singapore, 2002) – Shading system of a double roof dome inspired by the skin of the durian fruit for energy efficiency [52,53]	Pub.	EE	Tech	Pl	nAS	1	in	H	FE	na	T,V
9	**ArtScience Museum** (Singapore, 2011) – Building's shape inspired by the shape of the lotus flower to collect and harvest water [54,55]	Pub.	EE, Oc, Su	Tech	Pl	nAS	2	rad	H	E	na	O
10	**Eden project** (Cornwall, UK, 2001) – Greenhouse inspired by soap bubbles for efficient subdivision of space and lightweight stability [56–59]	Pub.	S,Su	Tech	Pro	nAS	3	rad	H	R	yes	Me
11	**West German Pavilion** (Montreal, Quebec, Canada, 1967) – Roof's pavilion inspired by the structure of spider web and biological light structures in general (Frei Otto) [60 61 62]	Pub.	S	Bio	Pro	AS, nAS,C	1	rad	H	R	no	Me
12	**International Terminal** (Waterloo, UK, 1993) – Façade component inspired by the pangolin scale arrangement to respond to changes in air pressure [63,64]	Pub.	S	Tech	An	AS, nAS	1	in	L	FE	no	Me
13	**Eastgate Centre** (Harare, Zimbabwe, 1996) – Office building envelope inspired by termites' mounds ventilation system and the cactus geometry for energy saving [65–67]	Pub.	EE, Oc, Su	Bio	An	AS, nAS,C	4	in	L	E	yes	T,V,I
14	**Davies Alpine House** (Kew Garden, UK, 2006) – Green house for thermoregulation and passive ventilation inspired by macrotermes termite mounds [68,69]	Pub.	EE, Oc, Su	Tech	An	AS, nAS	3	in	L	E	yes	T,I
15	**Nianing Church** (Nianing, Senegal, 2019) – Church inspired by the ventilation system of termites mounds for passive ventilation [70,71]	Pub.	EE, Oc Su	Bio	An	nAS	3	in	L	E	no	T,I

(*continued on next page*)

Table 2 (*continued*)

Id	**Building envelopes** (City, Country, Date) Description of the biomimetic system	Type of building	Main motivation(s) of the design teams	Approach	Models' kingdom	Knowledge	Abstracted function	Level of innovation	Complexity constr.	Integration scale	Energy performance	Comfort impact
	ICD Hygroscopic facades - Responsive facade system inspired by opening of pine cone for light and water regulation											
16	**HygroScope** (Orléans, France, 2012) – Responsive wood material within a glass case (in controlled humidity conditions) [72,73]	Pav.	EE, Oc	Bio	Pl	AS	2	rad	H	M	no	T,V
17	**HygroSkin** (Paris, France, 2013) – HygroScope adaptation into a meteorosensitive pavilion in real conditions [74–76]	Pav.	EE, Oc	Bio	Pl	AS	2	rad	H	M	no	T,V
	ICD/ITKE Fibrous morphology pavilions (FB) - Lightweight structure inspired by functional morphology and material properties of arthropods											
18	**FB Lobster research pavilion** (Stuttgart, 2012) – Pavilion inspired by the highly adapted and efficient structure exoskeleton of the lobster [77–79]	Pav.	S	Bio	An	AS, C	2	rad	H	FE	no	Me
19	**FB Spider research Pavilion** (Stuttgart, 2014–15) – Pavilion inspired by the web building process of the diving bell water spider [80,81]	Pav.	S	Bio	An	AS, C	1	rad	H	FE	no	Me
20	**FB Elytra I research pavilion** (Stuttgart, 2013–14) – Pavilion inspired by the Elytra, a protective shell for beetles' wings and abdomen [82,83]	Pav.	S	Bio	An	AS, C	3	rad	H	FE	no	T,V,Me
21	**FB Elytra II research pavilion** (London, 2015–16) – Pavilion inspired by the Elytra [84,85]	Pav.	S	Bio	An	AS, C	1	rad	H	FE	no	Me
22	**FB Moths research pavilion** (Stuttgart, RP 2017) – Pavilion inspired by functional principles and construction logics of larvae spin silk of leaf miner moths [86,87]	Pav.	S	Bio	An	AS, C	3	rad	H	FE	no	T, Me
23	**FB BUGA Fibre research pavilion** (Heilbronn, 2019) – Load-bearing structure inspired by beetle wings [88]	Pav.	S	Bio	An	AS, C	1	rad	H	FE	no	Me
	ICD/ITKE Segmented shell Research Pavilions (SE) - Finger-joints inspired by the sand dollar and sea urchin morphology of their plate structures											
24	**SE Sand dollar I research pavilion** (Stuttgart, 2011) – Pavilion inspired by the high load bearing capacity of the plate skeleton morphology of the sand dollar built exclusively with extremely thin sheets of plywood [89,90]	Pav.	S	Bio	An	AS, C	1	rad	H	FE	no	Me
25	**SE Sand dollar II research pavilion** (Stuttgart, 2015–16) – Pavilion employing industrial sewing of wood elements on an architectural scale [91,92]	Pav.	S	Bio	An	AS, C	1	rad	H	FE	no	Me
26	**SE LAGA research pavilion** (Stuttgart, 2014) – First pavilion to have its primary structure entirely made of robotically prefabricated beech plywood plates [93,94]	Pav.	S	Bio	An	AS, C	1	rad	H	FE	no	Me
27	**SE BUGA Wood research pavilion** (Heilbronn, 2019) – Pavilion built with Co-design (feedback-driven design) ensuring that all segments fit together with sub-millimetre precision like a three-dimensional puzzle [95,96]	Pav.	S	Bio	An	AS, C	1	rad	H	FE	no	Me
	ICD/ITKE Compliant mechanisms (CP) – Shading façade system inspired by the bird paradise flower and coleoptera to minimize energy for adaptive facade system											
28	**CP Flectofin** (Germany, 2011) – Adaptive hinge less louver system inspired by the opening mechanism of the bird paradise flower [97]	Pav.	EE, Oc, Su	Bio	Pl	AS, C	2	rad	H	FE	yes	T,V
29	**Thematic Pavilion** (South Korea, 2012) – Shading system for the façade of an exhibition hall which adapt the CP Flectofin system [98–100]	Pub.	EE, Oc, Su	Bio	Pl	AS, C	2	rad	H	FE	yes	T,V
30	**ITECH Pavilion** (Stuttgart, 2019) – Adaptive compliant structure inspired by the folding mechanisms of the Coleoptera coccinellidae wings. ITECH 2019 [101,102]	Pav.	EE, Oc, Su	Bio	An	AS	2	rad	H	FE	yes	T,V

offers insights on a dataset without beforehand assumptions on variables correlations – it was used as a complementary method to identify typologies of projects by analysing relationships between qualitative parameters (Table 1) and the entire dataset of Bio-BS (Table 2). Information on this tool and results from the MCA analysis are given in supplementary data (section B**. MCA analysis**).

- **Univariate analysis** (n_{cases} = 19) - to highlight the trends in the design processes of the analysed Bio-BS through a distribution study of parameter in percentages. The 15 projects of ICD/ITKE/Stuttgart University (Ids. 16 to 30, Table 2) were counted here as 4 projects to obtain more representative results on a global scale. Indeed, they were gathered as 4 clusters defined as listed in Table 2: Hygroscopic façades, Fibrous morphologies, Segmented shells, Compliant mechanisms.

4. Results

4.1. Multiple Correspondence analysis (MCA) - typologies of projects

The MCA (description in supplementary data **B. MCA analysis**) distinguished a clear disparity between two main groups of Bio-BS: academic and research projects, mainly of the ICD/ITKE/University of Stuttgart, and public buildings. Fig. 3 outlines the distribution of the projects **(a)** and associated weighted variables **(b)**.

Academic projects (on the left of Fig. 3 **(a)** and **(b)** (Ids. 3, 16–30)) presented a strong correlation with biology inputs in their design process; architects, engineers and biologists collaborate closely at an interdisciplinary level. For these projects, the abstraction and then the transfer of biomimetic principles into building constructions have resulted in some radical and incremental innovations, implemented through novel and uncommon manufacturing techniques.

Public buildings (on the right of Fig. 3 **(a) and (b)** (Ids. 1,2,4–15)) were mainly characterised by a scarce involvement of biologists during the design process and no thorough understanding of biological models. The projects used conventional design and construction methods for incremental innovation by improving existing building construction systems. The use of a biomimetic approach was motivated to provide neutral or positive impact design, but only a few of them assessed the final impact of their implemented design.

These preliminary results herald two main approaches for the design process of Bio-BS, with different constraints, context, (Table 3) stakeholders and resources. Data collected from the interviews was then analysed through univariate analysis for each of the 5 design process steps defined in Section 2.

4.2. Univariate analysis

The results of the univariate analysis are presented step by step in the following pages. They are expressed in percentages and discussed in each section.

4.2.1. Context

Half of the selected projects are located in Europe and others are equally distributed between America, Asia and Africa. This distribution might be either due to a lack of financial resources in the construction field of less wealthy countries, or to a quieter communication from them in the biomimetic field; some regions might

Table 3
Variables distribution of category *Context* for the 19 Bio-BS.

Variable	Parameter distribution in percentage
Climate	**68% C (temperate)** | 16% B (dry) | 11% A (tropical) | 5% D (continental)
Continent	**52% Europe** | 16% America | 16% Asia | 16% Africa
Type of building	**37% Pavilion** | **32% Exhibition hall** | 11% Religious building | 11% Office | 5% Others (train station, hospital)
Renovation	**100% No** | 0% Yes

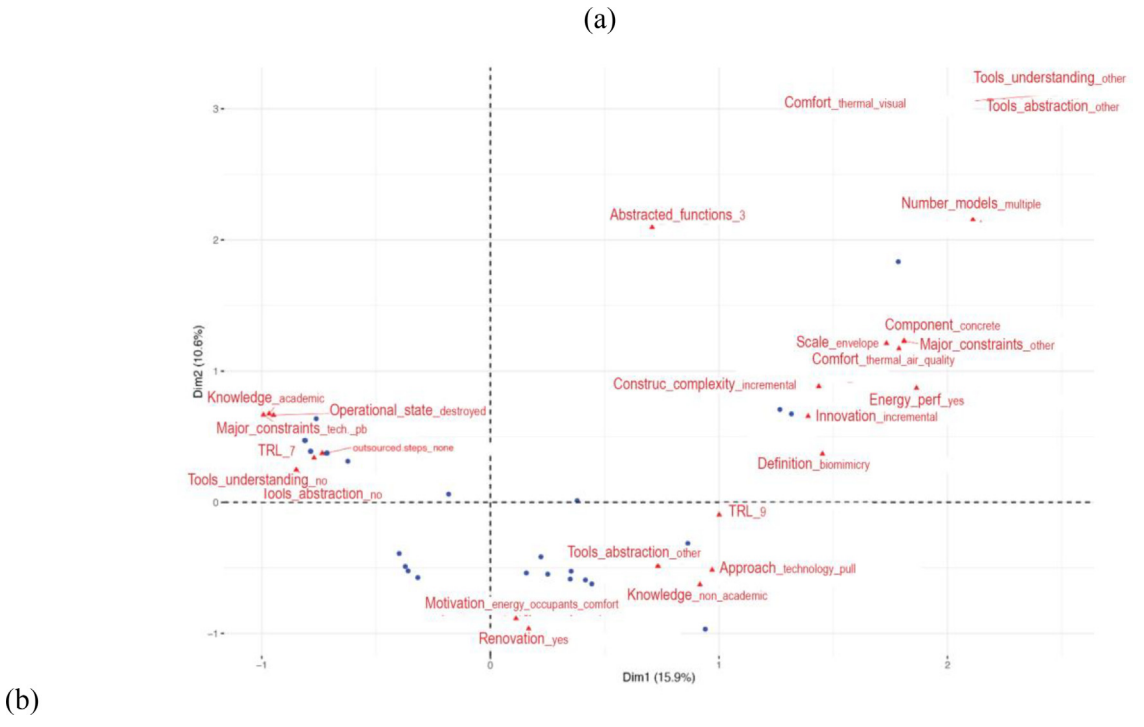


Fig. 3. MCA maps of all Bio-BS (blue points) and the 30 parameters (red triangles) (**a**) with the name of the Bio-BS, (**b**) with the name of the variables. All studied Bio-BS can be summarized in multidimensional spaces: each dimension stands for different variables describing the individuals. The first two dimensions, with here a total eigenvalue of 26.4%, can be considered representative of the correlations between the variables of the dataset. See supplementary data B. MCA Analysis for structuring variables contributing to these dimensions. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

simply use other semantics than what is defined by the ISO standard [2].

Pavilions are the most represented among the selected Bio-BS (37%). Bio-BS with higher TRLs such as exhibition halls count for a high share within the public buildings; this might be explained by their project briefs, usually allowing more creativity, in order to stand out or draw attention to the visitors, more than most other public projects. In line, this could also explain why the authors could not be found Bio-BS for housing, since project contractors would preferably seek conventional building skins configurations, and in short times.

Even if some completions of projects are spread over the last fifty years – the West German Pavilion being the first built of the selected Bio-BS, in 1967 – half of the Bio-BS were completed in the last decade. Surprisingly, none of the latter was designed for the renovation of an existing building, while building renovation is considered as the main challenge over the coming years regarding environmental needs [104].

4.3. Overview of the biomimetic design process

Main motivation(s) – This parameter was introduced in order to clarify the design teams' motivation to use biomimetics during their design process. More than half of the interviews confirmed that biomimetics was primarily used to improve the energy performance or occupants' comfort of the Bio-BS rather than to respond to environmental issues [103]. However, the ambivalence of this parameter was highlighted when design teams judged biomimetic skins being more sustainable solutions than traditional ones; improving the Bio-BS energy performances or the comfort of occupants indirectly contributes to environmental issues, by potentially reducing energy demands and use of building materials. Likewise, the ICD/ITKE teams clearly expressed structure performance as the main motivation for biomimetics, and building sustainability as a secondary objective. However, they pointed out that their work was part of a longer process beginning with using less negative impact material for lighter structures, and eventually finding a way to replace them by more sustainable materials. Further investigations must provide a qualitative evaluation of these parameters since biomimetic buildings usually impact energy efficiency, sustainability and occupants' comfort. These novel investigations must be aligned with previous works as carried out by [105,106].

Use of design framework – The designation framework covers the contributions describing the whole development process such as process, method and tools. The only followed framework (5%) is the biology push approach provided by the ISO Norm 18458, applied during the ICD/ITKE *Compliant mechanisms* projects (Ids. 28–30). Apart from this exception, none of the interviewees confirmed using or following a framework from literature or peer-learning, and admitted they had not felt the need to use one. It adheres the popular belief that designers usually have their very own ways and habits in their creative processes, even when it comes to biomimetics.

Outsourced steps was defined to evaluate the contribution of external assistance provided outside of the initial design teams. The interviews suggested that the design teams outsourced very little design steps; for medium to large public buildings, most of them took part in steps 1 to 3, steps 4 and 5 being partially or fully assigned to another entity. Note that the authors could not interview all actors involved in the design process, hence some parts are not fully documented.

The identified main constraints were distributed between lacks of adapted biomimetic tools known by the team, the implementation of the biomimetic design in regards with law regulations, and lack of funds or time. Technical problems (such as choosing the right material to make the biomimetic design work, or even scaling the solution) were mostly mentioned when all steps of the design process were covered by the interviewed team, meaning they had to face the whole process by themselves. Rather than giving constraints, researchers from ICD/ITKE/University of Stuttgart admitted they had little limitation in terms of time.

Hence, before a deeper analysis of each step of the Bio-BS design process, the authors made the following observations:

(i) Some answers are not comprehensive: it outlines uncertainties on interpretations from the authors but also points out a lack rigorous methodology or perspective from the interviewed design teams on their design frameworks and encountered limitations.

These limitations are rather different between the two typologies of projects observed using MCA (**3.1. Main trends**) i.e., academia/research projects and public projects. This is in line with the initial questioning of this study: how does their design process differ to lead to such different design and construction complexities?

The collection of data for step 1 to 5 is analysed and discussed in the next sections.

4.4. Step 1 – functional analysis

Definition – The Bio-BS are equally distributed between bio-inspiration, biomimicry and biomimetics according to the definition provided by [2] Associating semantic to these projects helped dissociate levels of abstractions; biomimetics requires a higher level of abstraction of biological models than bioinspiration. As for biomimicry, it reflected considerations to sustainability when designing a bio-inspired solution.

Approach – Most Bio-BS were designed following a biology-push approach Table 5, i.e. starting with the discovery of a biological property then its transfer to a technical solution [105]. These results are consistent with the main trends in bio-inspiration; the absence of systematic selective methodology to identify the relevant biological models results in a practice of biomimetics more driven by a biology-push approach [107]. However, interviews and literature analysis showed that the line between the technology-pull and biology-push approaches is difficult to draw. In fact, designers make permanent back and forth between the two approaches. Their research process is not linear, but rather consists in feedback loops and iterations, as discussed by [108].

Table 4
Variables distribution of category *Biologically-inspired design process* for the 19 Bio-BS.

Variables	Parameters distribution in percentage
Main motivation(s) of the design teams	**27% Energy efficiency | 27% Occupant's comfort** | 18% Structure performance | 18% Building sustainability Other
Use of design framework	**95% No** | 5% Yes
Main constraints	**24% NA | 20% Technical problems** | 16% Law regulations | 8% Use of biomimetic tools | 4% Lack of funds | 4% Other
Outsources steps	0% Step 1 (Functional analysis) | 0% Step 2 (Understanding of biological principles) | 4% Step 3 (Abstraction) | **28% Step 4 (Feasibility) | 28% Step 5 (Outcome)** | 24% None | 16% NA

Table 5
Variables distribution of category *Step 1 – Functional analysis* for the 19 Bio-BS.

Variables	Parameters distribution in percentage
Approach	**63% Biology-push** | 37% Technology-pull
Definition	37% Bioinspiration | 32% Biomimicry | 31% Bioinspiration

4.5. Step 2 – understanding of biological concepts

Knowledge and **Inputs of biologists from the design team –** Table 6 Biologists were not integrated in the design process of public projects: either the architects had a strong sensitivity to biology, or they intended to perform ecological architecture. Bio-BS Pho'liage and Bloom remain an exception, since the architects Steven Ware and Doris Kim Sung have a first-degree in biology (Ids. 2,5). 58% of all design teams (public building projects Ids. 6, 8, 9, 10, 15 and pavilions Ids. 2,4) based their understanding of the living systems on non-academic biological knowledge, i.e. documentary or popular scientific writing. Only Mick Pearce performed experiments himself on the endemic termite mounds *odontotermes transvaalensis* to understand the involved physical phenomenon and then replicate their performance into the Eastgate Centre (Id. 13) (5) [65,109] (Fig. 4.a, and 4.b). However, although the Eastgate is a beautiful example of what bioinspiration or biomimicry can promote, his analysis was eventually proved erroneous [66]. On the other hand, Bio-BS from ICD/ITKE/University of Stuttgart based their transdisciplinary research on existing academic knowledge in biology developed by the scientific community (40% of all cases); most of the inputs from biology were provided by researchers of the University of Tübingen and the Plant Biomechanics Group of the University of Freiburg. When launching new pavilion projects, collaborations starts in the early phases of the design process [101], and according to the interviews, lead to co-discoveries.

Table 6
Variables distribution of category *Step 2 – Understanding of biological concepts* for the 19 Bio-BS.

Variables	Parameters distribution in percentage
Knowledge	**58% Non-scientific sources** | 40% scientific source | 12% experimentation as part of the design process
Inputs of biologists from the design team	**47% No interaction with any biologists** | 31% Biologists integrated in the design process | 21% Biologists consulted
Tools for understanding biological models	**80% NA** | **20% none** | Database | Ontology | Taxonomy | Thesaurus | Method | Algorithm | Other
Model kingdom	**57% Animalia | 36% Plantae** | 7% Protista | 0% Archaea | 0% Fungi | 0% Bacteria
Number of models	**84% Single** | 16% Multiple

Tools for understanding biological model is a variable entirely based on parameters described in [110] depicting the current biomimetic types of tools in the literature existing to help understanding and selecting relevant of biological models, abstraction, and transfer to a design. The results can hardly be evaluated since the interviewees partially answered to that question. Interviewees from ICD/ITKE, whose projects benefited from the involvement of biologists, explained that biologists are usually much involved at the beginning of their design process, to help understand and select models with designers, then slowly fade away in favour of designers.

Model kingdom (according to the six kingdoms classification of [111]) – As highlighted by Figs. 5 and 6, the distribution of inspiring biological models is not proportionate to the distribution of biomass of estimated and described species on Earth; the species *homo sapiens*, for instance, was used as an inspiration for 15% of the Bio-BS with a 0.01% proportion in the biomass. Although these results convey a propensity by designers to use visible daily life biological inspirations (plants, animals), they could be explained by a problem of scale effect during the design process: the range of sizes of man-made technical devices are different from living organisms, and so are their constraints. This scale effect underpins technical problems mentioned in **3.3**; abstracting biological functions and implementing them into a functional design certainly is a challenge, even more with very small range living systems such as Protista, Bacteria and Archaea.

Number of models – 84% of the Bio-BS are based upon one biological model. Only three Bio-BS combined several principles abstracted from several biological systems (Ids. 10, 11, 13).

Combining the results led the authors to the following statements:

(i) The chosen biological models for bioinspiration are often from plant or animal kingdoms. We assume it is either because they are visible in humankind daily life or because other kingdoms present scale effects harder to abstract into designs. Exceptions exist when biologists are involved in the design process.
(ii) The inspiring biological model usually is chosen by instinct or perception when designers have specifications in mind. The use of biomimetic tools to understand or choose biological models seems rare or devolved to biologists. It is hard to tell if that is because the design teams did not express the

Fig. 4. Temperature measurements of termite mounds carried out by Mick Pearce (left), CC-SA-BY Licence, Mick Pearce. **(b)** Heat exchange floor under construction, abstraction of the biological principles of termite mounds, CC-SA-BY Licence, Mick Pearce.

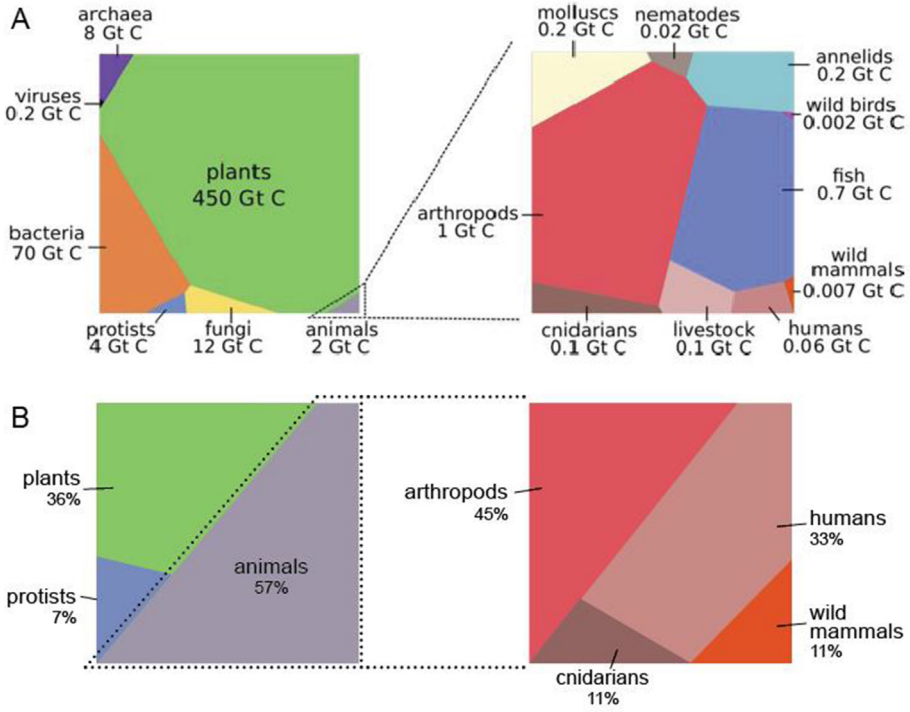


Fig. 5. (**A)** Distribution of the estimated biomass on earth in gigatons of carbon (GT C), reproduced with permission from [112]. (**B)** Distribution in percentage of the biological models which inspired the 19 Bio-BS.

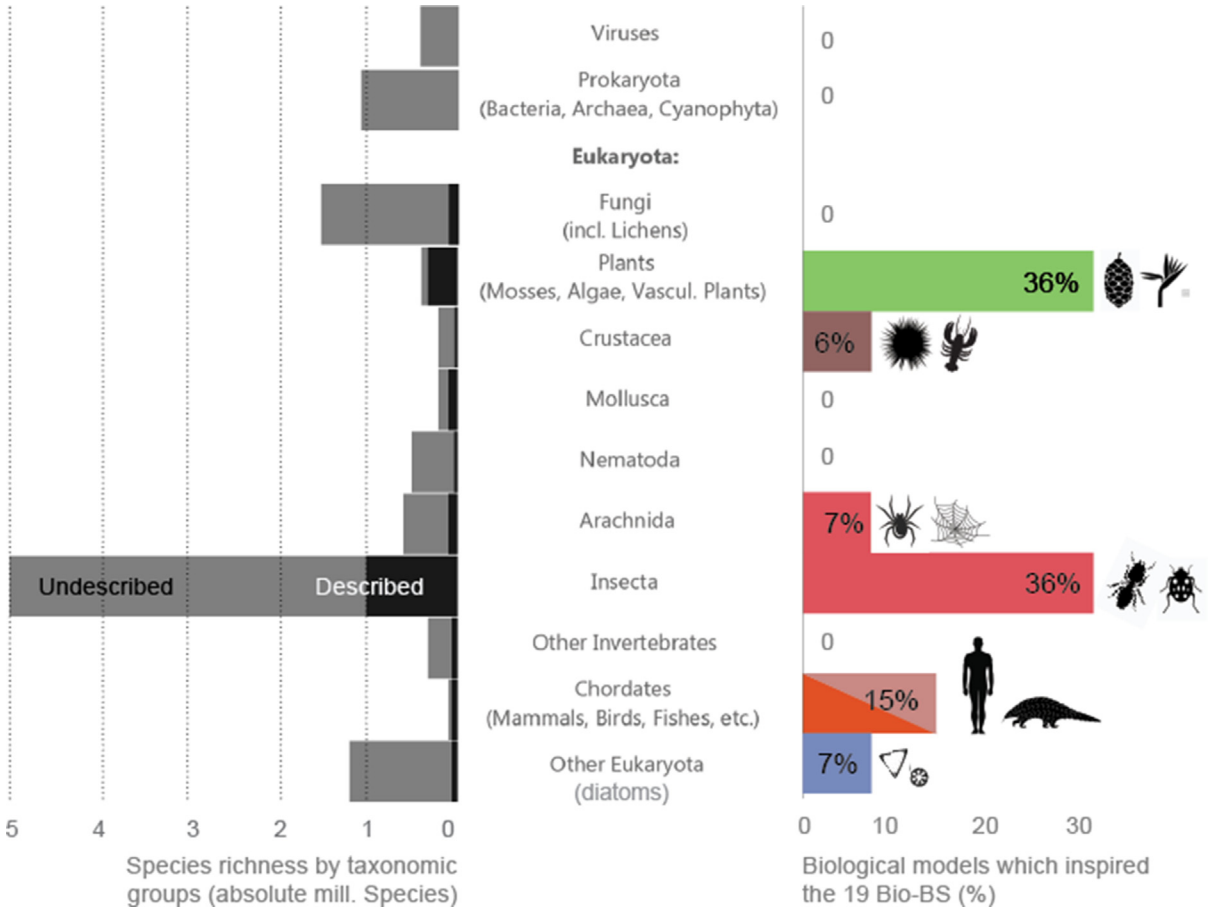


Fig. 6. Distribution of the major groups of biological models which inspired the 19 Bio-BS according to the distribution of estimated species on earth (absolute number of species on the left (grey = estimated number of yet to be described species, black = already described). This figure uses the same colour code as Fig. 5. Reproduced and adapted with permission from [113].

need to use existing ones, because they could not find suitable ones, or because the biologists actually use these tools and the authors would not be aware. The second explanation is valid when crossed with the lack of biomimetic tools expressed by some projects as a constraint.

(iii) Interdisciplinary collaborations allow teams to co-discover new properties of living organisms creating mutual benefits between academic research in biology and architecture, and design teams are aware of that; in that sense, an interview from ICD stated that some projects would have hardly gone through without the help of wood experts and biologists (Ids. 16, 17, Table 2).

4.6. Step 3 – abstraction

Tool for abstraction – The authors received few replies on this variable (n = 5); the interviews did not provide detailed information on this step since most of the designers described the abstraction as a creative step which can hardly be qualified. The few results suggested that none of the design teams abstracted biological principles using biomimetic tools, apart from the Sierpinski Forest (Id. 7, Table 2), which is the result of an opportunity during an abstraction phase [114,115].

Abstracted functions of regulation – Bio-BS mostly abstracted one or two functions. Fig. 7shows the distribution of regulated factors by number of abstracted functions. Almost half of them address mono-regulation, mostly mechanical stress (Ids. 1, 10–12, 18–27, Table 2). Then, multi-functions with light and heat regulations are comprehensively developed (Ids. 2–8, 13–17, 28–30). Only bio-inspired ventilation systems coupled with biomimetic skin provides multi-regulation of more than two factors, since ventilation systems regulate heat, light, humidity and air quality (Ids. 13–15). Among all Bio-BS, thermal comfort and visual performance are the most abstracted functions.

The authors found hard to assess the abstraction features since information was scarce Table 7. However, this section outlined the following results:

(i) The abstraction phase highly rests on the design team expertise and own creativity process. These results are aligned with recent research that highlighted limited tools to support the abstraction phases [22,116].

(ii) Since the characterization of the biological systems was found mainly mono model in step 2, the abstraction step followed the same trend. Design teams only abstracted one to two features of their inspiring model, often resulting in mono or bi-functional Bio-BS. Also, we noted that both thermal and visual comfort are interdependent and usually simultaneously targeted. There is a need for the development of building envelopes with multi-regulation capacities to address contradictory requirements as highlighted by [17,20]. For this purpose, several methodologies have been developed such as BioGen by L. Badarnah [26] and Kuru et al. [29]. However, as outlined by the variable 'use of design frameworks' in Table 4, none of these frameworks were used to design the Bio-BS studied in this paper. The interviews confirm that only the ISO Standard 18,458 was used for the 5% of Bio-BS that used a biomimetic framework.

Table 7
Variables distribution of category *Step 3 – Abstraction* for the 19 Bio-BS.

Variables	Parameters distribution in percentage
Abstracted functions of regulation	**47% One function** | **30% Two** | 7% Three | 13% more than three functions
Tools for abstraction	**73% NA** | 21% None | 6% Other | Database | Ontology | Taxonomy | Thesaurus | Method | Algorithm

Table 8
Variables distribution of category *Step 4 – Feasibility and prototyping* for the 19 Bio-BS.

Variables	Parameters distribution in percentage
Optimization tools	**44% CAD and numerical analyses software** | **44% models (mock-ups)** | 12% quick calculation
Design complexity	53% High | 47% Low
Construction complexity	**68% High** | 32% Low
Level of innovation	**74% Radical** | 26% Incremental

These findings encourage to increase the accessibility of biomimetic abstraction tools or to develop adapted tools to increase the development of multi-functional Bio-BS.

4.7. Step 4 – Feasibility and prototyping Table 8

Optimization tools – This variable was defined to give insight about tools used for Bio-BS modelling, prototyping, and design

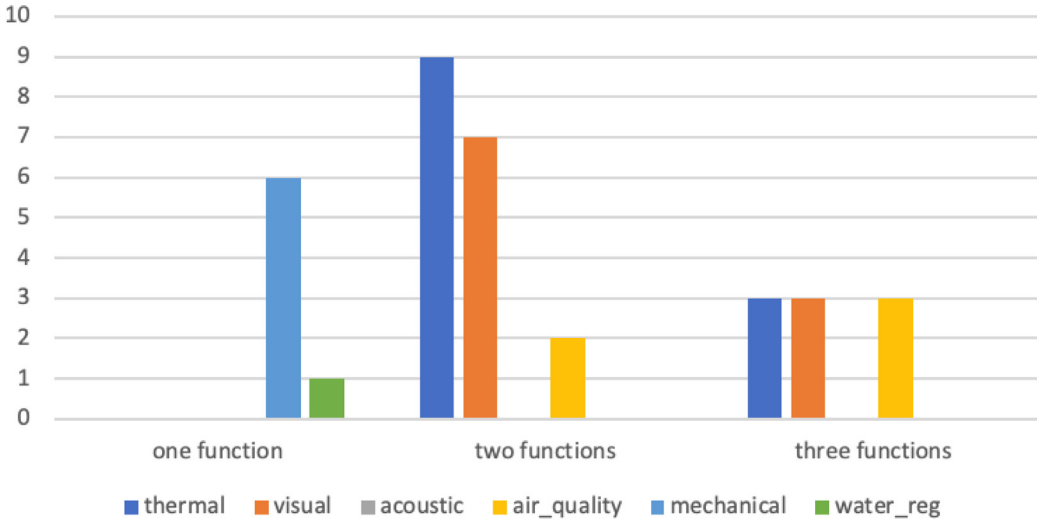


Fig. 7. Distribution of the function of regulation of the 19 Bio-BS.

optimization. The answers suggested a frequent use of the following:

- **CAD and numerical-analysis software** (Ids. 1,2,5,8,10,12,15–30, Table 2): form-finding/scale-finding (Id. 5), Rhinoceros and Grasshopper (Ids. 1,2,8), CATIA (Ids. 2, 10), Revit (Id. 10), AutoCAD (Id. 2), Ecotect (Id. 2), Structural Analysis (Id. 2).
- **Numerical analyses software** (Ids. 2, 10, 15–30, Table 2): Ecotect (Id. 2), FEM (Id. 10), Heliodon (Id. 15), unspecified software such as programming languages (Ids. 15–30).
- **Prototyping** (Ids. 1, 2) before final construction.

Design complexity – The authors distinguished whether the Bio-BS resulted from high or low design complexity. Applied to buildings, the 3D-modeling using parametric programs such as Grasshoppers or Rhinoceros was considered as high design complexity (Ids. 1,2,9,16–30, Table 2). On the other hand, low design complexity applied to construction refers to the use of conventional design methods and software (Ids. 11–15, Table 2).

Construction complexity – The construction complexity was introduced to assess the ease of implementation of the biomimetic solution. High construction complexity refers to the use of novel and uncommon manufacturing techniques, materials or technology in contrast to low construction complexity. 68% of the Bio-BS which resulted in high construction complexity are mostly research pavilions. For instance, the ICD/ITKE fibrous morphology research pavilions (Ids. 18–22, Table 2) are an exploration of a novel robotic fabrication process coupled with computational design.

Level of innovation – Radical and incremental describe two different types of technological process innovations. Radical innovations refer to fundamental changes that represent new changes in technology whereas incremental innovations are minor improvements or adjustments in current technology according to [117]. The results show that the number of radical innovations is twice higher for research pavilions than for public buildings.

The distribution of these four variables led to the following observations:

(i) Public building Bio-BS projects tend to use conventional design methods. Likewise, the induced design outcomes usually require common construction techniques only. The analysed projects were mostly designed using classic CAD modelling, and the technological transfer resulted in the design implementation through well-known construction systems (Ids. 6, 8, 12–15, Table 2).

(ii) The teams of Bio-BS research pavilions undertook the technological transfer using highly complex design and construction systems. Their research context led towards a high design complexity requiring advanced modelling tools for parametric design, and high construction complexity exploring new manufacturing methods using robotic assistance. More generally, the construction complexity naturally increases when the design materials are non-usual for building skins (e.g., fibreglass, carbon fibre, hygroscopic wood) and are not necessarily suited for real-world construction.

(iii) Biomimetic projects can benefit from internal *and* external collaborations, whatever level of innovation (incremental or radical). As explained during interviews with ICD/ITKE teams, new projects in their labs take less and less time because knowledge and technology add-on. There is little communication with biologists or scientific entities in public buildings projects (see section **4.5. Step 2**), hence scientific grounding or technological opportunities would be a worthwhile consideration to push forward further development in biomimetic architecture.

Table 9
Variables distribution of category *Step 5 – Outcome: improved or new design* for the 19 Bio-BS.

Variables	Parameters distribution in percentage
Integration scale of bioinspiration	**31% Shading system** | **26% Façade element** | 11% Material | 11% Roof | 21% Envelope | 0% Fenestration | 0% Wall
Technology readiness level - TRL	**30% TRL9** | 27% TRL8 | 23% TRL7 | 20% TRL6
Comfort	**35% Thermal comfort** | **28% Visual performance** | 12% Indoor air quality | 12% Mechanical stress resistance | 14% Other | 0% Acoustic quality
Assessment of energy and structural performances	**63% No** | 16% Yes | 21% NA
Operational state	**74% Still operating** | **21% Destroyed** | 5% Not operating yet
Main component	**26% Polymer** | **26% Alloys** | 21% Concrete | 11% Wood | 11% Textile | 5% Glass fibre
Adaptation to stimuli	**53% Yes** | 47% No
Adaptable to renovation	**58% No** | 42% Yes

4.8. Step 5 – Outcome: improved or new design Table 9

Spatial scale (classification according [118]) – Some Bio-BS were found hard to classify since the biomimetic system is both embedded in the roof, wall and fenestration (Ids. 9–11, 18–30). These projects were classified as "envelope".

TRL – The concept of TRL was defined by the ISO standard 16290:2013 [30]. This concept is widely used in all fields of engineering in order to measure the maturity level of a particular technology.

Assessment of energy and structural performances – This variable specifies if the performance of the Bio-BS, from an energy and structural point of view, was assessed. Very few quantitative assessments of the Bio-BS were found and they were all carried out for public building projects (hygrothermal performance assessment for Ids. 10,13,14 and structural assessment for Id. 23, Table 2).

Comfort – The distribution of targeted performance is shown on Fig. 8. Thermal and visual comfort were simultaneously addressed since most of the Bio-BS were shading systems. This result is consistent with previous studies [17].

Operational state – This parameter provided a qualitative evaluation of the biomimetic systems' performance after the building completion. Most of the research pavilions have been destroyed after completion, except BUGA Wood and Fibre pavilions exhibited

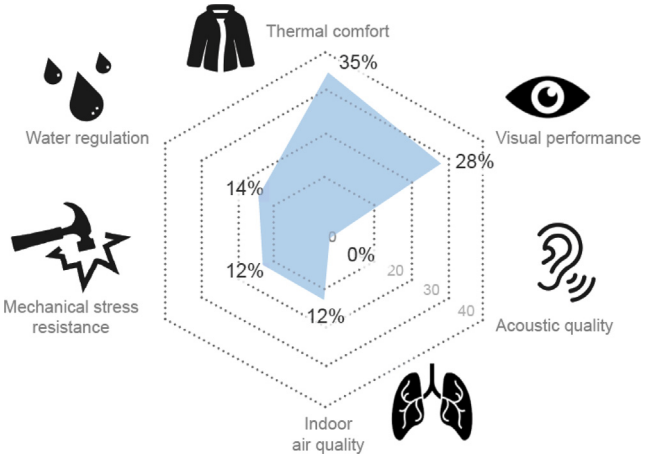


Fig. 8. Distribution of the Bio-BS according to the comfort.

Table 10
Costs of construction ranked in ascending order of cost / floor area according to project use.

Id	Bio-BS	Building use	Floor area (sqm)	Cost (k€)	Cost/floor area (€/sqm)
1	Shadow Pavilion	Pavilion	20	18	900
13	Eastgate Building	Private (office)	55 k	30 M	545
8	Esplanade theatre	Public (museum)	5.5 k	5.5	1 000
15	Nianing church	Private (church)	457	1 M	2340
9	Art Sciences Museum	Public (museum)	350 k	75	4 655
10	Eden project	Public (green house)	23 k	239	10 391
14	Davies Alpine House	Public (green house)	70	800	11 430

in Germany in Heilbronn, and the Laga pavilion (Ids. 23, 26–27). Note that their destruction allowed the research teams to test technical performances such as tensile and compressive strength.

Adaptation to stimuli – Almost half of the Bio-BS (47%) can adapt over time in response to external stimuli to improve the overall building performance. Referring to the definition of Loonen *et al.,* their adaptation was mostly extrinsic – *adaptation which implies first information retrieving and processing and then, actions to be taken* - rather than intrinsic – *self-adjusting automatically triggered by environmental stimuli* (Ids. 2, 5, 16–17) [118].

Main component – Polymer material and metal alloys, used on half of the Bio-BS, were mostly used for adaptive use, as they can more easily adapt their shape to respond to stimuli,

Adaptable to renovation – None of the Bio-BS were applied to new buildings. However, half of them can easily adapt to existing buildings. For instance, the shading components and adaptive materials could be applied to retrofitted building.

Cost – The cost of the solutions was specified for 7 Bio-BS, as shown in Table 10. Results show a wide disparity of costs among office building Bio-BS, i.e. from 900 €/sqm up to 11 k €/sqm while building cost average in Europe varies from 960 €/sqm in Moscow, 2 400 €/sqm in Paris and over 3 350 €/sqm in London [119]. These strong price variations can be explained by the innovative manufacturing process and use of new technologies for Bio-BS. In order to compare and quantify the cost of bioinspiration, further research will have to assess the details of the distribution of costs during the design process (staff time, resources, etc.), during the construction (materials, manufacturing technics) and afterwards (maintenance, renovation, cost of HVCA, etc.).

The distribution of these variables led to the following observations:

(i) There is a lack of qualitative data on the Bio-BS. It probably does not help the promotion of biomimicry as a lever to environmental and energy performance challenges. Since public authorities have no tangible data, they are not driven to advocate or encourage (e.g., by grants) public procurement to apply biomimetic approaches. Hopefully, with the current biomimetics emergence, more effort will be made in the future to provide performance assessments (in terms of life cycle assessment, comfort, etc.) when designing Bio-BS.

(ii) Thermal and visual comfort/performance are the most targeted performances, largely implemented into shading systems, while other regulation parameters are not ensured by the biomimetic design. There is a need for more multifunctional designs for the building skin, covering functions that also have a strong impact on the comfort and the energy efficiency of the building.

(iii) There was no case of renovation: it implies that possibilities of already existing designs are not considered enough by renovation stakeholders. This may be linked to points (i) and (ii); possibilities of multifunctionality are little-known, applied, and assessed.

5. Discussion

Some joint efforts between research media and public procurement could lead to new development in biomimetics. For public building projects where the available time is fairly often an irreducible constraint, biological progress such as the generation of knowledge, the creation of structuring tools and biological data mining, may considerably help biomimetic design process.

Selecting and abstracting the accurate biological model for a biomimetic solution is intricate. Even trained biomimetic practitioners, such as researchers of Stuttgart, need a preselection of groups of organisms with the involvement of biologists to help focus the research project. This approach has shown to stimulate co-discoveries, beneficial for technological breakthroughs and contribution in biological data. Therefore, it would be interesting to apply this multidisciplinary work specifically with a focus on several taxonomic groups at a time, and to assess the effects of hybridization of biological strategies on the design of a biomimetic envelope element with multi-regulation targets and specifications.

As seen in this study, the methodologies and tools used in thein bioinspiration design process are diverse, and yet, the number of projects in the literature reaching a TRL of 6 is low. Despite a high potential for product development, the implementation of Bio-BS elements in practice is challenging. During abstraction and technical feasibility steps, designers have to take into account market specifications, but they should also retrieve feedbacks and experience from the users afterwards, to allow scalable and repeatable models, and avoid successful but unique-application biomimetic designs.

In addition, we suggest that addressing multi-regulation requires mechanisms in the early-stage of the design process, assisted with data exploration and structuring tools. Further research from the authors is ongoing and focusing on the development of tools to access to biological data during the design process and help combine different biological strategies.

6. Conclusions

The presented study has given an overview of Bio-BS and their design process. Thirty built Bio-BS were analysed using two complementary methods: a univariate analysis to highlight the main trends of biomimetic design process and a multivariate analysis (MCA) as a complementary analysis to outlined main variables discriminating the different types of Bio-BS. Although recent studies have provided comparative analysis of adaptive biomimetic building skins, an overview, which assesses the correlation between the design process and the final result has been lacking so far. This study is the first qualitative and step-by-step evaluation of the biomimetic design process of existing Bio-BS.

Results from the multivariate analysis (MCA) - outlined two main types of Bio-BS where the final design highly depends of the context in which they were designed. The two main groups go as follow:

(A) **Academic projects** which present a strong correlation with the biology input in their design process; architects, engineers and biologists collaborate closely at an interdisciplinary level. The abstraction then the transfer of biomimetic principles into building constructions have mostly resulted in some radical innovations.
(B) **Public building projects** are mainly characterised by a scarce involvement of biologists during the design process and no thorough understanding of biological models. The projects used conventional design and construction methods for incremental innovation by improving existing building construction systems. The use of a biomimetic approach was motivated to provide neutral to positive impact design towards environmental issues, but almost none of them assessed the final impact of their implemented design.

The results demonstrated that the integration of biological knowledge has a strong influence on the following design steps and the final result since academic projects resulted in radical innovation whereas public buildings in incremental. These two main groups highlighted the gap between academic research and building applications as discussed by [120] as "the valley of the death".

Results from the univariate analysis showed that Bio-BS have limitation in:

(i) Being precisely described for the biomimetic design process.
(ii) Integrating scientific biological knowledge during the design process since inputs from biology are mostly based on knowledge for general public (58%). 82% of biomimetic projects are inspired by a single biological organism which belongs to the kingdoms of animals (53%) and plants (37%) kingdoms which represent a small part of the diversity of species on earth.
(iii) Addressing multi-regulation since 47% of the Bio-BS one function and 30% two functions. When the Bio-BS addressed more than one function, it is mostly thermal comfort and visual performance, which are correlated functions. Very few Bio-BS meet contradictory requirements.
(iv) Being evaluated with numerical analysis to quantify energy performances (thermal, visual, acoustic, mechanics). The authors founded quantitative data for only 16% of the Bio-BS.

CRediT authorship contribution statement

Estelle Cruz: Conceptualization, Investigation, Formal analysis, Visualization, Writing - original draft. **Tessa Hubert:** Conceptualization, Investigation, Formal analysis, Visualization, Writing - original draft. **Ginaud Chancoco:** Investigation. **Omar Naim:** Investigation. **Natasha Chayaamor-Heil:** Conceptualization, Investigation, Writing - review & editing. **Raphaël Cornette::** Methodology, Formal analysis, Writing - review & editing. **Lidia Badarnah:** Conceptualization, Methodology, Writing - review & editing, Supervision. **Kalina Raskin:** Conceptualization, Methodology, Supervision, Writing - review & editing. **Fabienne Aujard:** Conceptualization, Methodology, Supervision, Writing - review & editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This research project is funded by the CEEBIOS (French network in biomimetics), the Mecadev MNHN (National Museum of Natural History of Paris), the international cement group VICAT, the ANRT (French National Research Agency) and the international land developer ICADE. We are particularly grateful to the PhD school of the MNHN and the CEEBIOS which founded three weeks of research exchange at the lab ITKE in Stuttgart.

The authors would like to express their gratitude to the entire team of ITKE and ICD of the University of Stuttgart for their help to complete the data sheets during three weeks of research visiting of the corresponding authors. This includes the researchers Pr. Jan Knippers (ITKE), Axel Körner (ITKE), Valentin Koslowski (ITKE), Daniel Sonntag (ITKE), Tobias Schwinn (ICD), Niccolò Dambrosio (ICD), Monika Göbel (ICD), Dylan Wood (ICD) and Moritz Dörstelmann (ICD / FibR GmbH), Axel Larsson (ITKE).

The authors would like to gratefully acknowledge designers who shared time and data to complete the analysis of the Bio-BS, reviewed the associated project sheets and enriched discussions. This includes Mick Pearce (Pearce Partnership), Steven Ware (Art & Build Architect), Tobias Becker (University of Stuttgart), Karl Daubmann (DAUB), Nicolas Vernoux-Thélot (In Situ Architecture), Mathew Park (Atelier One).

The authors would also like to thank Hervé Lequay (MAP ARIA, ENSAL), Xavier Marsault (MAP ARIA, ENSAL), Clara Hozer (MNHN, MECADEV), Eliot Graeff (LCPI), Anneline Letard (LCPI & CEEBIOS), Kristina Wanieck (Deggendorf Institute of Technology), Pierre-Emmanuel Fayemi (IKOS), Antoine Dugué (NOBATEK/INEF4), Denis Bruneau (ENSAPBx), Tingting Vogt Wu (I2M) and Laura Magro (CEEBIOS) for valuable comments.

Declaration of interest

The authors confirm that there are no known conflicts of interest associated with this publication and there has been no significant financial support for this work that could have influenced its outcome. None of the sponsors or the co-authors of this research have been closely or remotely involved in the design or construction of the thirty analysed Bio-BS.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111034.

References

[1] T. Herzog, R. Krippner, and W. Lang, Facade construction manual.
[2] ISO 18458:2015 - Biomimetics – Terminology, concepts and methodology. .
[3] J.F.V. Vincent, O.A. Bogatyreva, N.R. Bogatyrev, A. Bowyer, A.-K. Pahl, Biomimetics: its practice and theory, J. R. Soc. Interface: 3 (9) (2006) 471–482, https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127.
[4] M. Pawlyn, Biomimicry in Architecture. Riba publishing, p 172, 2011.
[5] K.M. Al-Obaidi, M. Azzam Ismail, H. Hussein, A.M. Abdul Rahman, Biomimetic building skins: an adaptive approach, Renewable Sustainable Energy Rev. 79 (2017) 1472–1491, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.028.
[6] M. Pedersen Zari, Ecosystem services analysis: Mimicking ecosystem services for regenerative urban design, Int. J. Sustainable Built Environ. 4 (1) (2015) 145–157, https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.02.004.
[7] J. Knippers, T. Speck, and K. G. Nickel, "Biomimetic Research: A Dialogue Between the Disciplines," 2016, pp. 1–5.
[8] P. Gruber, "Biomimetics in Architecture [Architekturbionik]," 2011.
[9] G. Pohl, W. Nachtigall, "Products and Architecture: Examples of Biomimetics for Buildings," in Biomimetics for Architecture & Design, Springer International Publishing, 2015, pp. 179–312.
[10] T. A. Lenau, A.-L. Metze, T. Hesselberg, "Paradigms for biologically inspired design," vol. 1059302, March 2018, p. 1, 2018, doi: 10.1117/12.2296560.
[11] "COST Action TU1403 – Adaptive Facades Network – Webpage of COST Action TU1403." http://tu1403.eu/.
[12] P. Moseley, "EU support for innovation and market uptake in smart buildings under the horizon 2020 framework programme," 2017, mdpi.com, Available online: https://www.mdpi.com/2075-5309/7/4/105.
[13] I. Mazzoleni, Biomimetic Envelopes: Investigating Nature to Design Buildings, Biomimicry Institute, 2011.

[14] P. Gruber, S. Gosztonyi, Skin in architecture: towards bioinspired facades, Trans. Ecol. Environ. 138 (2010) 1743–3541, https://doi.org/10.2495/DN100451.
[15] J. Knippers, K.G. Nickel, T. Speck, Biomimetic Research for Architecture and Building Construction: Biological Design and Integrative Structures, Springer, 2016.
[16] S. Schleicher, G. Kontominas, T. Makker, I. Tatli, Y. Yavaribajestani, Studio one: a new teaching model for exploring bio-inspired design and fabrication, Biomimetics 4 (2) (2019) 34, https://doi.org/10.3390/biomimetics4020034.
[17] A. Kuru, P. Oldfield, S. Bonser, F. Fiorito, Biomimetic adaptive building skins: energy and environmental regulation in buildings, Energy Build. 205 (2019) 109544, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109544.
[18] M. López, R. Rubio, S. Martín, B. Croxford, How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes, Renew. Sustain. Energy Rev. 67 (2017) 692–703, https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018.
[19] N. Svendsen, T.A. Lenau, How does biologically inspired design cope with multi-functionality?, Proc Int. Conf. Eng. Des. 1 (1) (2019) 349–358, https://doi.org/10.1017/dsi.2019.38.
[20] L. Badarnah, "Towards the linving envelopes: biomimetics for building envelopes," 2012.
[21] E. Cruz, "Multi-criteria characterization of biological interfaces: towards the development of biomimetic building envelopes," 2021.
[22] K. Wanieck, P.-E. Fayemi, N. Maranzana, C. Zollfrank, S. Jacobs, Biomimetics and its tools, Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials 6 (2) (2017) 53–66, https://doi.org/10.1680/jbibn.16.00010.
[23] L. Badarnah, U. Kadri, A methodology for the generation of biomimetic design concepts, Architectural Sci. Rev. 58 (2) (2015) 120–133, https://doi.org/10.1080/00038628.2014.922458.
[24] E. Graeff, N. Maranzana, A. Aoussat, Engineers' and biologists' roles during biomimetic design processes, towards a methodological symbiosis, Proc. Int. Conf. Eng. Des. 1 (1) (2019) 319–328, https://doi.org/10.1017/dsi.2019.35.
[25] T. Hubert, "Designing bioinspired building envelopes : literature review, challenges and objectives," 2020. Accessed: Mar. 22, 2021. Available online: https://www.researchgate.net/publication/345943375_Designing_bioinspired_building_envelopes_literature_review_ challenges_and_objectives.
[26] L. Badarnah, Form follows environment: biomimetic approaches to building envelope design for environmental adaptation, Buildings 7 (2) (2017) 40, https://doi.org/10.3390/buildings7020040.
[27] M.L. Fernández, R. Rubio, S.M. González, "Architectural envelopes that interact with their environment," Conf. Exhib. - 2013 Int. Conf. New Concepts Smart Cities Foster. Public Priv. Alliances, SmartMILE 2013, no. November 2015, 2013, doi: 10.1109/SmartMILE.2013.6708189.
[28] N. Chayaamor-Heil, N. Hannachi-Belkadi, "Towards a Platform of Investigative Tools for Biomimicry as a New Approach for Energy-Efficient Building Design," mdpi.com, doi: 10.3390/buildings7010019.
[29] A. Kuru, P. Oldfield, S. Bonser, F. Fiorito, A framework to achieve multifunctionality in biomimetic adaptive building skins, Buildings 10 (7) (2020) 114, https://doi.org/10.3390/buildings10070114.
[30] "ISO 16290:2013 – Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment." https://www.iso.org/standard/56064.html.
[31] R. Loonen et al., "Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization," 10th Conf. Adv. Build. Skin, 2015.
[32] "Transregio | SFB TRR 141 | Biological Design and integrative structures.", avaliable online https://www.trr141.de/.
[33] "COST Action TU1403 – Adaptive Facades Network – Webpage of COST Action TU1403", avaliable online: https://tu1403.eu/.
[34] S. Gosztonyi, P. Gruber, "BioSkin – Research potentials for biologically inspired energy efficient façade components and systems," Potentials, January, pp. 1–5, 2013.
[35] "Shadow Pavilion – daub-lab." https://www.daub-lab.com/Shadow-Pavilion.
[36] "Shadow Pavilion Informed by Biomimicry / Ply Architecture - eVolo | Architecture Magazine." http://www.evolo.us/shadow-pavilion-informed-by-biomimicry-ply-architecture/.
[37] "Shadow Pavilion / PLY Architecture | ArchDaily." https://www.archdaily.com/192699/shadow-pavilion-ply-architecture/.
[38] R. M. Fortmeyer, "Kinetic architecture : designs for active envelopes", p 123.
[39] "Bloom | DOSU Studio." https://www.dosu-arch.com/bloom.
[40] "Doris Kim Sung: Metal that breathes | TED Talk." https://www.ted.com/talks/doris_kim_sung_metal_that_breathes.
[41] M. Decker, January 2013, "Emergent futures: nanotechology and emergent materials in architecture," Conference Tectonics Teach. - Build. Technol. Educ. Soc. (BTES).
[42] D. Yeadon, "Homeostatic Façade System," 2010.
[43] Material transformations: Martina Decker at TEDxNJIT - YouTube. TEDxNJIT, 2014.
[44] "Breathing skins technology – breathing skins." available online: https://www.breathingskins.com/.
[45] "CIRC-IARC Lyon - International Agency for Research on Cancer | Art and Build Architect." Avaliable online: https://www.artbuild.eu/projects/laboratories/circ-iarc-lyon-international-agency-research-cancer.
[46] B. Architectes, L. Identité, and B. Pearl, ArchiSTORM.
[47] "Tensinet." https://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=4114.
[48] "Startseite - SL Rasch." https://www.sl-rasch.com/de/.
[49] S. Ikegami, K. Umetani, E. Hiraki, S. Sakai, S. Higashino, "Feasibility study of fractal-fin heat sink for improving cooling performance of switching power converters," 2019, doi: 10.1109/INTLEC.2018.8612377.
[50] S. Sakai, Sierpinski's forest: new technology of cool roof with fractal shapes, Energy Build. (2012), https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.052.
[51] S. Sakai, "Urban Heat Island and Fractal Sunshade," 2016, pp. 1–15.
[52] "Singapore Arts Center - Esplanade Theatres on the Bay - e-architect." https://www.e-architect.co.uk/singapore/singapore-arts-center.
[53] "Singapore Arts Centre — atelier one." Avaliable online: http://www.atelierone.com/singapore-arts-centre.
[54] "Safdie Architects." Avaliable online: https://www.safdiearchitects.com/projects/marina-bay-sands-artscience-museum.
[55] "Marina Bay Sands ArtScience Museum in full bloom - Arup." Avaliable online: https://www.arup.com/news-and-events/marina-bay-sands-artscience-museum-in-full-bloom.
[56] "Space Structures 5 - Google Books."
[57] N. Grimshaw, "Eden Project for the Eden Project Ltd. in Cornwall, United Kingdom," 2001.
[58] R. Jones, "Eden Project," Education, vol. 58, no. 2, pp. 515–521, 2005.
[59] "Top eco visitor attraction – rainforest, gardens & educational charity – Eden Project Cornwall UK." Avaliable online: https://www.edenproject.com/.
[60] J. Knippers, "From Minimal Surfaces to Integrative Structures – The SFB-TRR 141 in the Light of the Legacy of Frei Otto and the SFB 230 'Natürliche Konstruktionen,'" 2016, pp. 7–10.
[61] B. Burkhardt, Natural structures – the research of Frei Otto in natural sciences, Int. J. Sp. Struct. 31 (1) (2016) 9–15, https://doi.org/10.1177/0266351116642060.
[62] P. Drew, Frei Otto : form and structure, Westview Press, 1976.
[63] "International Terminal Waterloo – Projects – Grimshaw Architects." https://grimshaw.global/projects/international-terminal-waterloo/ (accessed Mar. 14, 2020).
[64] "Blue 01: Water, Energy and Waste by Grimshaw - issuu." Avaliable online: https://issuu.com/grimshawarchitects/docs/blue_01.
[65] Mick Pearce, "Eastgate Building Harare." Avaliable online: http://www.mickpearce.com/Eastgate.html.
[66] J. Turner, "Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building," 2008, First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction (I3CON).
[67] D.J. Brown "The arup journal 4/1997," pp. 1–24, 1997.
[68] "Environment – Davies' Alpine House.", Avaliable online: https://daviesalpinehouse.weebly.com/environment.html.
[69] P. Bellew, "Going Underground," no. 28, pp. 41–46, 2006.
[70] "Church Nianing | IN SITU architecture - Rethinking The Future Awards." https://awards.re-thinkingthefuture.com/gada-winners-2019/church-nianing-in-situ-architecture/.
[71] "IN SITU Architecture : Project." http://www.insitu-architecture.net/en/projets/12404-church.html#.
[72] A. Menges, S. Reichert, Performative wood: physically programming the responsive architecture of the *HygroScope* and HygroSkin projects, Archit. Des. 85 (5) (Sep. 2015) 66–73, https://doi.org/10.1002/ad.1956.
[73] "HygroScope: Meteorosensitive Morphology | achimmenges.net.", Avaliable online: http://www.achimmenges.net/?p=5083.
[74] D. Correa, O. D. Krieg, A. Menges, S. Reichert, "HygroSkin: A prototype project for the development of a constructional and climate responsive architectural system based on the elastic and hygroscopic properties of," 2013.
[75] ITKE, "HygroSkin: Meteorosensitive Pavilion | Institute for Computational Design and Construction.", Available online: http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869.
[76] D. Correa, O. D. Krieg, A. Menges, S. Reichert, "HygroSkin: A Climate Responsive Prototype Project Based on the Elastic and Hygroscopic Properties of Wood," ACADIA 2013 Adapt. Archit., pp. 33–42, 2013.
[77] "ICD/ITKE Research Pavilion 2012 | achimmenges.net.", Avaliable online : http://www.achimmenges.net/?p=5561.
[78] J. Knippers, R. La Magna, A. Menges, S. Reichert, T. Schwinn, F. Waimer, ICD/ITKE Research Pavilion 2012: Coreless filament winding based on the morphological principles of an arthropod exoskeleton, Archit. Des. 85 (5) (2015) 48–53, https://doi.org/10.1002/ad.1953.
[79] A. Menges, J. Knippers, "ICD/ITKE research pavilion 2012," 2012, 2020. Avaliable online https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/74922/2/44648.pdf#page=85.
[80] "ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15 | achimmenges.net.", Avaliable online: http://www.achimmenges.net/?p=5814.
[81] M. Doerstelmann, ICD/ITKE Research Pavilion 2014–15: fibre placement on a pneumatic body based on a water spider web, Archit. Des. 85 (5) (2015) 60–65, https://doi.org/10.1002/ad.1955.
[82] T. van de Kamp, M. Doerstelmann, T. dos Sanots Rolo, T. Baumbach, A. Menges, J. Knippers, Beetle elytra as role models for lightweight building construction, Entomol. heute 27 (November) (2015) 149–158.
[83] M. Doerstelmann, J. Knippers, A. Menges, S. Parascho, M. Prado, T. Schwinn, ICD/ITKE Research Pavilion 2013–14: modular coreless filament winding based on beetle elytra, Archit. Des. 85 (5) (2015) 54–59, https://doi.org/10.1002/ad.1954.
[84] M. Prado, M. Dörstelmann, J. Solly, Elytra filament pavilion: robotic filament winding for structural composite building systems, JSTOR (2017).
[85] "Elytra Filament Pavilion climate maps.", Avaliable online: http://www.elytra-pavilion.com/#movement

[86] "ICD/ITKE Research Pavilion 2016-17 | achimmenges.net.", Avaliable online: http://www.achimmenges.net/?p=19995.
[87] J. Solly, N. Frueh, S. Saffarian, 2018, "ICD/ITKE Research Pavilion 2016/2017: integrative design of a composite lattice Cantilever," ingentaconnect.com.
[88] "BUGA Fibre Pavilion 2019 | achimmenges.net.", Avaliable online: http://www.achimmenges.net/?p=21027.
[89] J. Solly, 2017, "The skeleton of the sand dollar as a biological model for segmented shells in building construction View project ICD/ITKE Research Pavilion 2016/2017: Integrative Design of a Composite Lattice Cantilever.
[90] "ICD/ITKE Research Pavilion 2011 | achimmenges.net.", Avaliable online: http://www.achimmenges.net/?p=5123.
[91] O. D. Krieg, K. Dierichs, S. Reichert, T. Schwinn, A. Menges, "Performative Architectural Morphology Robotically manufactured biomimetic finger-joined plate structures," 2011.
[92] "ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16 | achimmenges.net.", Avaliable online: http://www.achimmenges.net/?p=5822.
[93] "Landesgartenschau Exhibition Hall | Institute for Computational Design and Construction | University of Stuttgart." Avaliable online: https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/landesgartenschau-exhibition-hall/.
[94] D. Garufi, H. Wagner, 2019, "Fibrous Joints for Lightweight Segmented Timber Shells," books.google.com, Accessed: Mar. 14, 2020.
[95] "BUGA Wood Pavilion 2019 | achimmenges.net.", Available online: http://www.achimmenges.net/?p=20987.
[96] D. Sonntag, "Lightweight segmented timber shell for the Bundesgartenschau 2019 in Heilbronn," 2019.
[97] J. Lienhard, S. Schleicher, 2011, "Flectofin: a hingeless flapping mechanism inspired by nature," iopscience.iop.org, Accessed: Jan. 28, 2019. Available online: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-3182/6/4/045001/meta.
[98] T. Speck, J. Knippers, O. Speck, Self-X materials and structures in nature and technology: bio-inspiration as a driving force for technical innovation, Archit. Des. 85 (5) (2015) 34–39, https://doi.org/10.1002/ad.1951.
[99] K. Schinegger, S. Rutzinger, M. Oberascher, G. Weber, and Soma (Firm), 2012. Soma : theme pavilion Expo Yeosu : One ocean.
[100] "One Ocean, Thematic Pavilion EXPO 2012 / soma | ArchDaily.", Avaliable online: https://www.archdaily.com/236979/one-ocean-thematic-pavilion-expo-2012-soma/.
[101] J. Knippers, A. Menges, H. Dahy, 2018, "The ITECH approach: Building (s) to learn," ingentaconnect.com, Accessed: Dec. 02, 2019. Avaliable online: https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2018/00002018/00000010/art00006.
[102] "ITECH Research Demonstrator 2018-19 | Institute for Computational Design and Construction | University of Stuttgart." Avaliable online: https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/itech-research-demonstrator-2018-19/.
[103] "CEEBIOS – Centre d'études et d'expertises en biomimétisme." Avaliable online: https://ceebios.com/.
[104] S. Attia, Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe, Energy Build. 155 (2017) 439–458, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.043.
[105] O. Speck, D. Speck, R. Horn, J. Gantner, K.P. Sedlbauer, "Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments," Bioinspiration and Biomimetics, vol. 12, no. 1, Feb. 2017, doi: 10.1088/1748-3190/12/1/011004.
[106] F. Antony, R. Grießhammer, T. Speck, O. Speck, Sustainability assessment of a lightweight biomimetic ceiling structure, Bioinspiration Biomimetics Bioinspir. Biomim 9 (1) (2014) 15, https://doi.org/10.1088/1748-3182/9/1/016013.
[107] E. Graeff, N. Maranzana, A. Aoussat, Science Arts & Métiers (SAM) Biomimetics, where are the biologists?, Taylor Fr 30 (8–9) (2019) 289–310, https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1642462.
[108] P. Fayemi, K. Wanieck, C. Z.-... & biomimetics, and undefined 2017, "Biomimetics: process, tools and practice," iopscience.iop.org.
[109] J. Turner and R. Soar, 2011, "Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building," digital.library.adelaide.edu.au.
[110] K. Wanieck Dipl-Biol, N. Maranzana Assistant Professor, C. Zollfrank Professor, and S. Jacobs Assistant Professor, "Biomimetics and its tools," icevirtuallibrary.com, vol. 6, no. 2, pp. 53–66, Aug. 2016, doi: 10.1680/jbibn.16.00010.
[111] G. Lecointre and H. Le Guyader, The tree of life: a phylogenetic classification. 2006.
[112] Y.M. Bar-On, R. Phillips, R. Milo, The biomass distribution on Earth, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. (2018), https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115.
[113] A.D. Chapman, "Numbers of Living Species in Australia and the World," Heritage, vol. 2nd, no. September, p. 84, 2009, doi: 10.1177/135.
[114] H. Tsuiki, Y. Tsukamoto, "Imaginary Hypercubes," 2014, pp. 173–184.
[115] B.W. Tour, "Estelle Cruz Biomimicry World Tour," pp. 1–4, 2016.
[116] N. Svendsen, T. . Lenau, "How does biologically inspired design cope with multi-functionality?," Proc. Int. Conf. Eng. Des. ICED, vol. 2019-Augus, no. AUGUST, pp. 349–358, 2019, doi: 10.1017/dsi.2019.38.
[117] J.E. Dutton, "The Adoption of Radical and Incremental Innovations: An Empirical Analysis," researchgate.net, vol. 32, no. 11, pp. 1422–1433, Nov. 1986, doi: 10.1287/mnsc.32.11.1422.
[118] R. Loonen, J. Rico-Martinez, 2015, "Design for façade adaptability–Towards a unified and systematic characterization," research.tue.nl, 2015.
[119] "Cost of building in selected European cities 2018 | Statista.", Avaliable online: https://www.statista.com/statistics/898188/cost-of-building-in-selected-european-cities/.
[120] J. Chirazi, K. Wanieck, P. Fayemi, C. Z.-A. Sciences, and undefined 2019, "What Do We Learn from Good Practices of Biologically Inspired Design in Innovation?," mdpi.com.

1.2.1.1.2 Points clés de l'article

- **Démarche** - Les données recueillies sont issues de séries de questions adressées aux équipes de conception de 30 enveloppes bio-inspirées lors de visites, de discussions et d'échanges écrits.
- **Analyse multivariée** - L'analyse multivariée des données montre que les principaux types d'enveloppes bio-inspirées dépendent fortement du contexte dans lesquelles elles ont été conçues (académique ou publique).
- **Analyse mono-variée** - L'intégration des connaissances biologiques a une forte influence sur les étapes suivantes de la conception et sur le résultat final.

1.2.1.2 Discussion

L'étude présentée est la première évaluation qualitative et étape par étape du processus de conception d'enveloppes du bâtiment bio-inspirées. Visant à identifier les méthodologies de conception utilisées pour la réalisation de cas pratiques, elle souligne l'absence systémique d'un cadre commun pour la conception bio-inspirée parmi les équipes conceptrices. En sus, elle indique que peu des outils trouvés dans la littérature et décrits en 1.1.3.2 sont utilisés en pratique, apportant des interrogations sur l'utilisation d'outils pluridisciplinaires, leur pertinence, leur visibilité et le besoin de nouveaux outils plus adaptés.

1.2.1.2.1 Validité et interprétation des données

Les données récoltées présentent quelques lacunes et ambiguïtés qui rendent leur interprétation complexe. Si la très grande majorité des données a été directement recueillie auprès de concepteurs, beaucoup de réponses aux questions posées restent incomplètes. Cela s'explique d'une part par l'externalisation de certaines étapes de conception, notamment celle de faisabilité technique et d'intégration du produit, pour lesquelles les équipes n'ont pas été interrogées pour ce papier, et d'autre part, par des questions déjà spécifiques aux recherches bibliographiques menées en amont. En suggérant des réponses pour les outils utilisés par exemple, les auteurs ont possiblement induit un biais chez les concepteurs interrogés.

1.2.1.2.2 Implication du biologiste

Le rôle du biologiste dans la démarche de conception se distingue dans les projets de recherche où les collaborations interdisciplinaires, lorsqu'elles existent, permettent aux équipes de codécouvrir de nouvelles propriétés des organismes vivants, créant ainsi des bénéfices mutuels entre la recherche académique en biologie et en architecture. Tous cas confondus, les modèles biologiques choisis sont très souvent issus du règne végétal ou animal lorsque les autres règnes

présentent des effets d'échelle plus difficiles à transférer vers une solution technologique. Il existe des exceptions lorsque des biologistes sont impliqués dans le processus de conception.

1.2.1.2.3 Multi-modèle et multifonctionnel

Une grande majorité des équipes de conception questionnées semble se limiter à un modèle biologique sur lequel s’appuyer, résultant souvent en un concept mono fonctionnel. Il serait donc intéressant d'appliquer ce travail multidisciplinaire en se concentrant spécifiquement sur plusieurs groupes taxonomiques à la fois, et d'évaluer les effets de l'hybridation des stratégies biologiques sur la conception d'un élément d'enveloppe bio-inspiré.

1.2.2 Proposition d’une approche

Malgré une riche production dans la littérature, la mise en œuvre d'éléments d’enveloppes bio-inspirées est un défi dans la pratique. Au cours du processus de conception, les concepteurs doivent tenir compte des spécifications du marché, anticiper l’acceptabilité de leur design afin de permettre des modèles évolutifs et reproductibles, avec des ressources en temps et financières souvent équivalentes à celles d’une conception non bio-inspirée. Ils utilisent également un cadre méthodologique pour la conception qui leur est propre, en support de leur processus créatif, cela sans s’appuyer sur des outils adaptés, structurants, qui pourraient être facilitateurs pour la conception.

Dans le contexte de ces travaux, et de la volonté d’exploration d’un processus de conception, ce premier chapitre permet d’aiguiller vers une démarche à adopter. Pour la conception de systèmes d’enveloppes qui gèrent les transferts multiples entre l’intérieur et l’extérieur, les approches fonctionnelles – tel que le modèle FBS – semblent naturellement appropriées. Celles-ci permettent aux concepteurs de faciliter le transfert de connaissances d’un domaine biologique à un domaine technique, pour aider à la sélection et l’abstraction de modèles pertinents.

Si intrinsèquement notre démarche est orientée problème, puisque la bio-inspiration est une réponse à des problématiques environnementales et à des contraintes spécifiques à l’enveloppe, la démarche adoptée dans la suite de ces travaux peut être qualifiée de mixte. A la façon d’un processus itératif où problèmes et solutions co-évoluent conjointement, le processus doit à la fois permettre d’être à l’écoute des besoins industriels, pour permettre la définition de problèmes potentiels pouvant définir les intrants de notre processus de conception, et avoir un cadre biologique spécifique, sur lequel orienter des efforts pour un outil méthodologique adapté aux profils variés entre ingénierie et architecture. Sur ce dernier aspect, l’utilisation de DSC dans plusieurs méthodologies destinées à des applications architecturales bio-inspirées suggère un intérêt et une facilité de prise en main de ce type d’outil pour les acteurs du bâtiment. La disproportion entre les nombreux outils décrits dans la littérature et leur faible utilisation en pratique corrobore cette intuition.

Chapitre 2

Caractérisation biologique pour l'idéation de concepts

L'état de l'art réalisé a suggéré le développement d'un cadre de conception structurant, et l'intégration d'outils facilitateurs pour la conception d'enveloppes bio-inspirées. Le domaine du vivant étant extrêmement vaste, nous choisissons dans ce chapitre de n'intégrer à l'exploration du processus que quelques types de modèles biologiques, en liens directs avec l'enveloppe et ses exigences. Une description des exigences et attentes relatives au bâtiment et à son enveloppe aide à sélectionner les enveloppes biologiques et constructions animales comme périmètres biologique pertinent pour ces travaux.

La méthodologie utilisée pour décrire ce panel de modèles biologiques est ensuite explorée : dans un premier temps à l'aide d'approches fonctionnelles théoriques, introduites dans le précédent chapitre, puis par applications sur un échantillon de constructions animales décrites dans la littérature. Cette approche est décrite dans un chapitre publié dans l'ouvrage de Bionics and Sustainable Design, intitulé : *« Exploiting the potential of Nature for sustainable building designs: A novel bioinspired framework based on a characterization of living envelopes »* (Hubert et al. 2022).

Sommaire

2.1 Notions générales sur le vivant ... 59
2.1.1 Définitions ... **59**
2.1.1.1 Le vivant ... 59
2.1.1.2 Biodiversité ... 59
2.1.1.3 Evolution et sélection naturelle ... 60
2.1.1.4 Systématique des espèces ... 60
2.1.2 Concepts liés à l'environnement ... **62**
2.1.2.1 Tolérances au biotope ... 62
2.1.2.2 Facteurs biotiques ... 62
2.1.2.3 Facteurs abiotiques ... 63
2.2 Caractérisation de modèles biologiques ... **63**
2.2.1 Formulation du « problème » ... **64**
2.2.1.1 Exigences pour la qualité environnementale intérieure ... 64
2.2.1.2 Exigences relatives à l'enveloppe ... 65
2.2.1.3 Sélection du périmètre d'étude d'organismes et écosystèmes vivants ... 68
2.2.2 Exploration des approches pour la description des modèles biologiques ... **69**
2.2.2.1 Approche fonctionnelle ... 69
2.2.2.2 Approche fonctionnelle-causale ... 70

2.2.2.3 Approche *Structure-Behavior-Function* 70
2.2.2.4 Chapitre – Bionics and Sustainable Design 72
2.2.3 Synthèse 117

2.1 Notions générales sur le vivant

Les outils méthodologiques destinés aux concepteurs doivent faciliter voire participer à leur créativité et leur permettre de proposer des concepts innovants basés sur des propriétés, actions ou processus du vivant. Pour ce faire, ces derniers doivent être intelligibles, détaillés selon des termes et une structure compréhensibles pour le concepteur. La compréhension du vivant est donc primordiale dans la démarche bio-inspirée. Or, la biologie, ou science du vivant, est un domaine très large, incluant de nombreuses sous-disciplines et concepts, ce qui rend difficile sa compréhension globale. La partie qui suit est une brève introduction à quelques notions qu'il est nécessaire d'introduire pour comprendre et justifier l'approche empruntée pour la suite de ces travaux.

2.1.1 Définitions

2.1.1.1 Le vivant

Le vivant (ou les « systèmes vivants ») regroupe les organismes caractérisés par une structure interne complexe et une activité autonome. En chercher une définition absolue est difficile, car le vivant est une notion empirique que les hommes eux-mêmes expérimentent (Bernard et Canguilhem 1966). Les nombreuses définitions proposées par la littérature se recoupent néanmoins sur un certain nombre de grands principes : la capacité d'un système à s'auto-reproduire à partir d'énergie ou d'éléments extérieurs, à se développer ou croître, et à s'auto-conserver, c'est-à-dire se maintenir en vie via des processus tels que l'assimilation, la respiration, et la nutrition. Les critères donnés maintiennent des parts d'ombres sur certaines espèces ; les virus, par exemple, ne grandissent pas et n'ont pas de métabolisme, mais contiennent de l'ADN (information génétique contenue par les acides désoxyribonucléiques) et font preuve de mécanismes leur permettant de se reproduire dans des cellules hôtes. S'ils ne sont à ce jour pas considérés comme des espèces vivantes, leurs caractéristiques soulèvent quelques ambigüités.

2.1.1.2 Biodiversité

La diversité biologique est la variabilité des organismes vivants de toute origine, et inclut la diversité au sein des espèces, entre les espèces, et des écosystèmes (Nations Unies 1995). On distingue plusieurs types de diversités : intraspécifique, interspécifique, et écosystémique. La diversité intraspécifique est liée aux différences trouvées au sein d'une même espèce. Une espèce se définit comme une population ou un ensemble de populations dont les individus peuvent effectivement ou potentiellement se reproduire entre eux et engendrer une descendance viable et féconde (Mayr 1999). La diversité interspécifique correspond donc aux différences entres des espèces différentes. Enfin, la diversité écosystémique est contenue dans la biosphère et englobe deux éléments qui interagissent ensemble ; la biocénose (les organismes vivants) et le biotope (le lieu de vie de ces espèces). La diversité biologique ne se limite donc pas à

l'énumération des espèces mais à la compréhension de leur interaction avec leur environnement.

2.1.1.3 Evolution et sélection naturelle

La variation génétique constatée entre deux individus d'une même espèce est liée à deux facteurs que sont les mutations, et les recombinaisons génétiques liées à la reproduction (Gene 2019). Ainsi, la biodiversité est soumise à des mécanismes d'évolution, via des changements phénotypiques sur des générations. Lamarck au XIXe propose deux principes d'évolution complémentaires, que sont la complexification de l'organisme (sous des effets propres à son métabolisme), et la diversification adaptive (de leur comportement ou organe à un milieu particulier) (Lamarck 1873). Ce n'est que plus tard que Darwin complètera ses idées avec le principe de la sélection naturelle (Darwin 1859) qui stipule que la diversité des espèces résulte d'un tri des espèces par sélection et éliminations successives liées à un avantage ou un désavantage reproductif, procuré par la présence ou l'absence de variations génétiques propices ou défavorables. Les théories évolutionnistes se sont ensuite affinées au cours des décennies, bien que nombres de mécanismes soient à ce jour partiellement expliqués.

Sous les effets de la sélection naturelle, les espèces se sont donc adaptées de multiples façons à leur milieu et leurs contraintes. Ainsi, certains caractères initialement naturellement sélectionnés pour des fonctions spécifiques (aspects anatomique, physiologique, moléculaire ou comportemental), se voient changer de fonction de façon opportuniste par un phénomène appelé exaptation ; par exemple, les membres locomoteurs (ou pattes) servaient initialement de pagaies et d'accroche, avant finalement de servir – de façon opportuniste – à la marche et à la conquête du sol ferme. A très faible échelle temporelle, les espèces savent aussi adapter leur phénotype[2] (par phénomène d'autoadaptation aussi appelé plasticité phénotypique) de sorte à survivre aux changements de saisons par exemple. L'hermine revêt un poil blanc l'hiver pour se dissimuler des prédateurs dans la neige (Harris, Yalden, et Mammal Society 2008). La perte du pelage d'hiver des mammifères prépare elle, entre autres, aux chaleurs estivales (Rougeot 1981).

2.1.1.4 Systématique des espèces

La mesure de la diversité du vivant nécessite la catégorisation des espèces. La systématique est une discipline à l'intersection des sciences naturelles et de l'histoire naturelle, qui vise à trier les espèces vivantes d'aujourd'hui et celles ayant un jour existé. En plus de les nommer et de les détailler, elle les rassemble selon une hiérarchie (définie en genres, familles, ordre, classes, divisions, règnes) et les regroupes en taxons.

Après son introduction par le naturaliste Carl von Linné au XVIIe siècle, l'apparition des concepts d'évolution mène à des classifications arborescentes, puis à l'introduction d'une

[2] Le phénotype est l'ensemble des caractères observables d'un individu.

classification phylogénétique ou « cladistique[3] ». Basée sur la phylogénie[4], celle-ci intègre les relations de parentés entre taxons (Hennig 1950). Ces travaux, communément adoptés aujourd'hui, font débat sur l'utilité d'une classification phylogénétique comparée à la classification linnéenne. Si les différentes classifications sont présentées comme des outils à des fins différentes (Hennig 1999), le nouveau système a été majoritairement adopté par la communauté scientifique au détriment de celui basé sur la morphologie.

La Figure 2.1 est un exemple d'arbre phylogénétique basé sur le génome de plus de trente mille organismes des trois domaines du vivant.

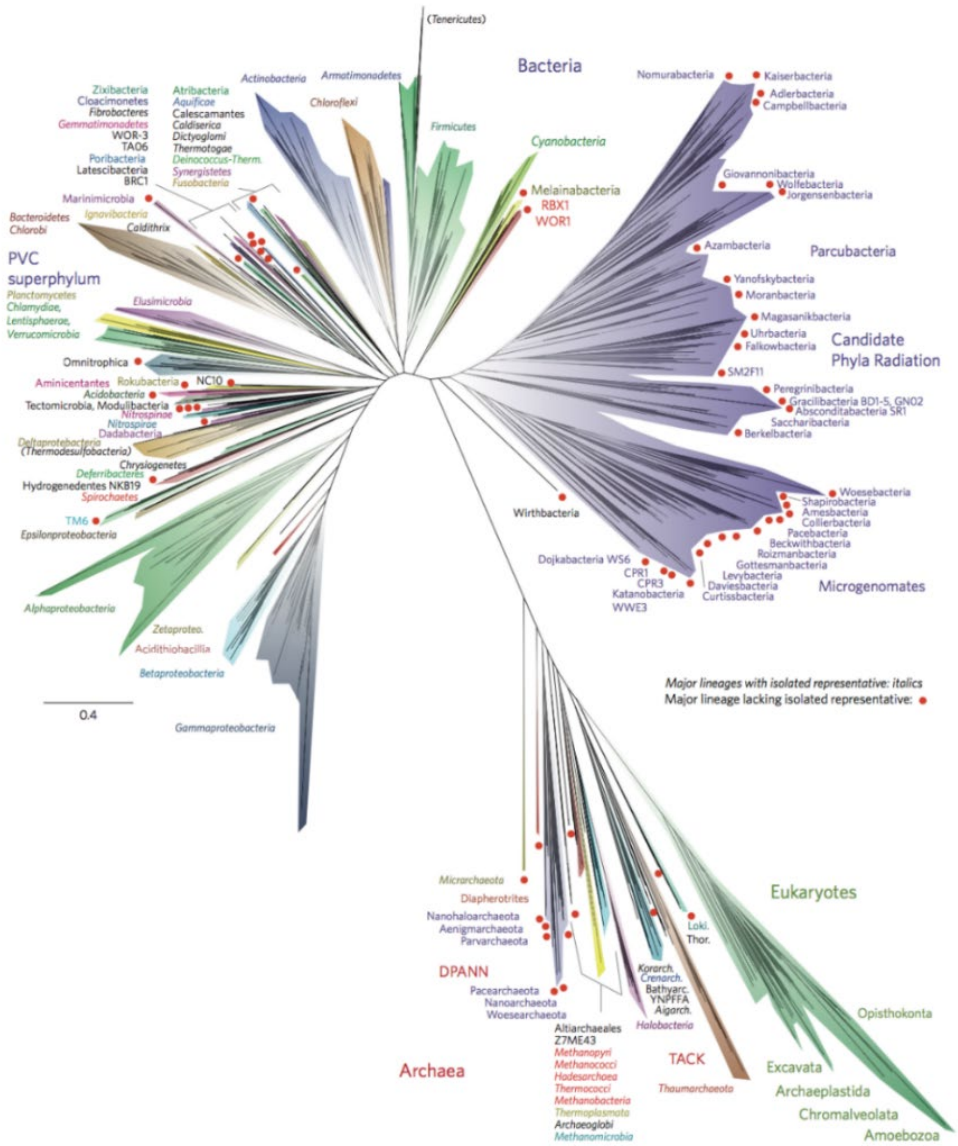


Figure 2.1 - Arbre phylogénétique du vivant, selon Hug et al. (2016) construit à partir de génomes[5].

[3] Le clade est considéré comme l'unité de base dans la classification phylogénétique des espèces.

[4] La phylogénie est l'étude des liens de parenté (relations phylogénétiques ou phylétiques) entre les êtres vivants et ceux qui ont disparu.

[5] Le génome est l'ensemble de l'information génétique d'un organisme contenu dans chacune de ses cellules sous la forme de chromosomes.

La classification adoptée à ce jour sépare le vivant en trois domaines, premiers niveaux de rangs devant le règne (Woese, Kandler, et Wheelis 1990) : *Bacteria*, *Archaea* et *Eukaryota*. Les règnes les plus connus des non biologistes sont les animaux (*Animalia*), les végétaux (*Plantae*) et la fonge (*Fungi* ou *Mycota*), tous rassemblés dans le domaine des Eukaryotes. La distance de chaque branche sur la Figure 2.1 est proportionnelle à la quantité de changement évolutif inféré. Chaque lignée, correspondant à l'ensemble des taxons dérivant d'un taxon donné, est nommée et repérée d'une couleur arbitraire.

2.1.2 Concepts liés à l'environnement

La description d'espèces biologiques et de l'origine de leur traits observables relève de deux concepts généralement opposés ; phénotype et génotype[6]. Bien qu'il en permette une estimation, le génotype n'est pas suffisant pour prédire tous les caractères observables d'un individu, car ceux-ci sont impactés par l'environnement dans lequel il évolue. Si le phénotype est intrinsèquement lié au génome d'un individu, au point que les deux notions peuvent paraitre redondantes, la diversité de morphologie, physiologie et comportements est à retranscrire dans un environnement précis.

2.1.2.1 Tolérances au biotope

En science de la vie, l'environnement est un ensemble de conditions naturelles « susceptibles d'agir sur les organismes vivants » (*Le Grand Robert,* 2001). Contenu dans un biome ou dans une partie de la biosphère, il se distingue en deux types d'éléments physiques, chimiques ou biologiques : biotiques ou abiotiques. Certains concepts rattachés à ces facteurs écologiques permettent de prédire si un organisme va tolérer ou non un biotope. La valence écologique, par exemple, permet de juger de la faculté d'une espèce à supporter les variations du milieu dans lequel elle évolue. La loi de tolérance de Shelford (Shelford 1931), met, elle, en avant des limites de tolérance à des facteurs limitants par leur excès ou carence. Les limites de tolérances et *preferendum* dépendent des espèces et de leur localisation, certaines populations étant plus habituées à des facteurs typiques de zones géographiques. Notons également que cette tolérance n'est pas nécessairement fixe, puisqu'elle peut varier selon les saisons, ou le stade de développement d'un organisme (graine, état larvaire, adulte, etc.).

2.1.2.2 Facteurs biotiques

Les éléments biotiques, complémentaires aux facteurs abiotiques, sont les éléments vivants qui affectent les organismes vivants. Qu'elles soient intraspécifiques ou interspécifiques, les relations entre espèces s'expriment de multiples façons. Elles peuvent être positives pour l'un et/ou les deux organismes concernés, comme c'est le cas avec la symbiose, le mutualisme ou le

[6] Le génotype est le patrimoine génétique d'un individu, et décrit l'ensemble des allèles contenu dans chaque cellule.

commensalisme (Davidson et McKey 1993), ou négatives avec par exemple le parasitisme ou bien la compétition, rivalité entre deux espèces pour avoir accès à la même ressource.

2.1.2.3 Facteurs abiotiques

Les éléments abiotiques sont des éléments non vivants de l'environnement qui affectent les organismes vivants. Comme la température ambiante peut affecter les conditions intérieures d'un bâtiment, elle affecte également les conditions de confort des espèces vivantes. La pluie, le vent, le rayonnement solaire, la salinité, le pH, l'atmosphère, sont autant de facteurs physico-chimiques auxquels les organismes vivants doivent s'adapter pour survivre (voir Figure 2.2).

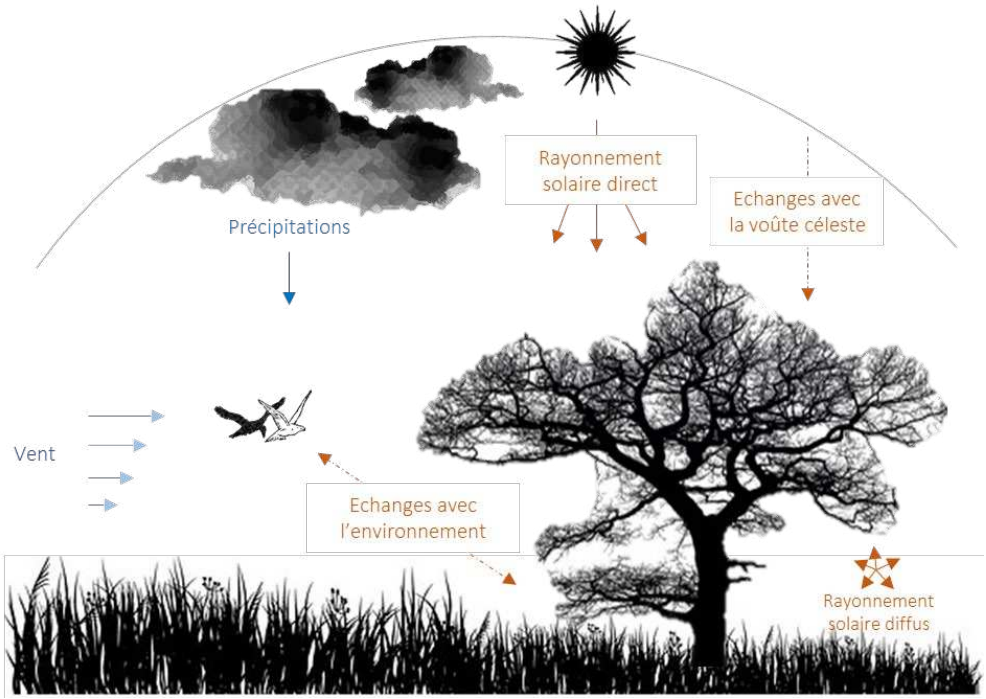


Figure 2.2 - Exemples de facteurs abiotiques divers qui affectent tous systèmes vivants. Inspiré de Mitchell & Skinner (2004).

2.2 Caractérisation de modèles biologiques

La complexification des systèmes vivants, sa diversification, et son fonctionnement sont exemplaires pour l'inspiration de systèmes et produits d'enveloppes du bâtiment. Le vivant a réussi à s'adapter aux multiples pressions de son environnement, à partir de briques élémentaires formées de seulement quelques atomes (carbone, hydrogène, oxygène, et azote). Ces adaptions, à échelles temporelles courtes et longues, sont ainsi le résultat de mécanismes complexes liés à la biologie évolutive qui malgré des sauts relativement récents grâce à la découverte de la génétique (Anon 2006) et un consensus scientifique (Kutschera et Niklas 2004) sur le sujet, garde des ombres à éclaircir. L'exemple même de l'exaptation indique que morphologies, organes, voire même des comportements actuels sont la trace de caractères autrefois dévolus à des fonctions spécifiques, aujourd'hui dérivés ou obsolètes. Pour une démarche bio-inspirée rigoureuse et efficiente, la phylogénétique et son évolution mériteraient d'être intégrées dans la compréhension et description des systèmes vivants. Les travaux

présentés ici n'ont pas la prétention d'un tel niveau de détail temporel. Les fonctions actuelles de la biodiversité et les adaptations qui lui sont associées, au-delà de la connaissance des évolutions passées, représentent en soi une source d'information immense. Les nombreuses attentes au regard de l'enveloppe du bâtiment, liées à son adaptation aux facteurs environnementaux, correspondent à la richesse d'adaptation du vivant.

2.2.1 Formulation du « problème »

La démarche bio-inspirée passe par une compréhension suffisante de phénomènes biologiques, aidant à l'inspiration de concepts inscrits dans un domaine technique. L'établissement d'un cadre biologique spécifique requiert en amont de poser un regard sur les attentes et besoins liés au bâtiment.

2.2.1.1 Exigences pour la qualité environnementale intérieure

Les exigences pour le bâtiment et son environnement intérieur s'appuient sur la notion de qualité environnementale intérieure (QEI) afin d'assurer le confort des occupants. Ce confort inclut de nombreux critères (Certivéa, CSTB 2008) : le confort hygrothermique, lié à la température et à l'humidité de l'air, ainsi qu'au métabolisme de l'occupant et à sa dissipation de chaleur ; le confort visuel, devant assurer une luminosité suffisante sans éblouissement et une vue satisfaisante sur l'extérieur ; une qualité de l'air, primordiale en matière de risques sanitaires ; une qualité d'ambiance sonore ou acoustique, afin d'éviter les perturbations de l'environnement extérieur mais garder une contact auditif pour percevoir les signaux jugés pertinents.

Pour être acceptables, ces critères se situent dans des gammes propres à chaque individu. Comme beaucoup d'autres organismes vivants, l'humain suit la loi de tolérance de Shelford, car sa tolérance est variable selon son biotope et climat. La Figure 2.3 traduit cette loi par une gaussienne indiquant une zone optimale et deux zones de stress avec de plus faibles densités en réponse aux stress environnementaux.

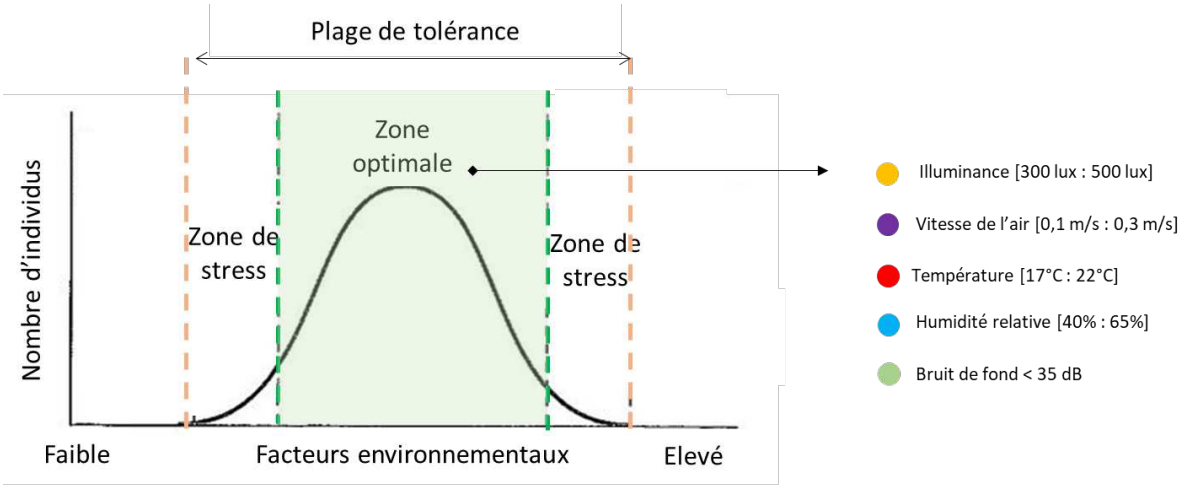


Figure 2.3 - Représentation graphique de la loi de tolérance de Shelford adaptée de Costamagno et al. (2016), accompagnée d'exemples de gammes QEI.

Cette représentation est donnée en deux dimensions, mais il faut comprendre que chaque critère de QEI peut avoir sa propre plage selon laquelle les occupants sont plus ou moins confortables, et que certains d'entre eux sont interdépendants. En outre, les plages indiquées sont variables dans le temps. Par exemple, l'éclairement lumineux et le bruit de fond sont attendus à des valeurs plus faibles la nuit, en période de sommeil. Une température intérieure plus élevée l'été sera, elle, mieux tolérée, les conditions extérieures étant différentes de l'hiver.

Aux critères donnés peuvent aussi s'ajouter des cibles bien distinctes et sans variabilité temporelle, telles que la gestion des déchets, de l'eau, ou encore le confort olfactif. Enfin, l'entretien et la maintenance du bâtiment doivent permettre la pérennité du bâtiment sans pour autant être trop coûteuse en énergie.

2.2.1.2 Exigences relatives à l'enveloppe

Afin de répondre aux exigences intérieures du bâtiment, l'enveloppe doit permettre de contrôler ou filtrer tout apport externe et interne. Elle doit faire office d'isolant thermique, de sorte à gérer les apports solaires et variations de températures externes à échelles temporelles journalière et saisonnière, ainsi que gérer les transferts d'eau, à l'état liquide ou gazeux, les transferts lumineux, acoustiques, et d'air. Tout comme la QEI, les exigences au regard de l'enveloppe varient selon la localisation, car fixées par des normes de constructions qui dépendent du pays où l'on se trouve. La répartition géographique des populations et les différences climatiques, culturelles et de ressources disponibles a donné lieu à une diversité d'enveloppes conséquente, tant sur leur morphologie, les matériaux utilisés et les transferts qu'elles gèrent (quelques exemples en Figure 2.4).

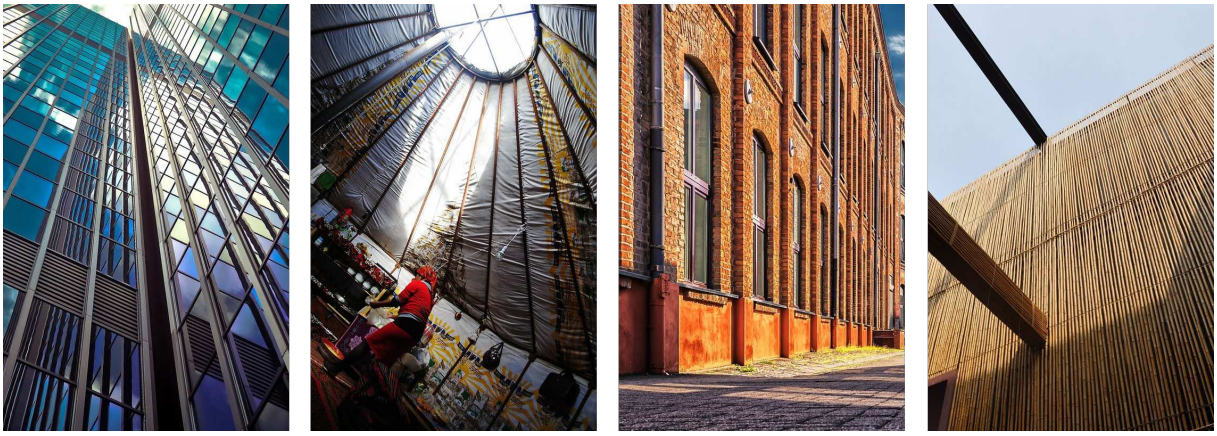


Figure 2.4 - Diversité d'enveloppes. De gauche à droite : façade vitrée, textile (yourte), en brique, en bambou (Licences Pixabay).

Notons qu'outre la gestion des éléments évoqués, l'enveloppe est également attendue sur des critères sécuritaires, telles son intégrité physique ou sa résistance au feu. Ce dernier point est peu évoqué dans ces travaux, car moins pertinent à l'égard de considérations énergétiques et environnementales.

2.2.1.2.1 Gestion de la chaleur

Un isolant thermique est caractérisé par sa conductivité thermique, i.e., sa capacité à opposer au flux thermique qui le traverse une résistance thermique, et son déphasage thermique, c'est-à-dire sa capacité à ralentir les transferts de chaleur. La partie isolante de l'enveloppe est traditionnellement trouvée sous la forme de mousse pulvérisée, de matelas, couvertures et panneaux rigides, insérée dans une structure porteuse. Leurs caractéristiques d'isolation sont directement liées à la structure chimique et physique de leur composition, très souvent inorganiques (laine minérale, blocs de béton cellulaire, mousse de verre) car facile à produire. On observe cependant un intérêt croissant pour des solutions moins toxiques et plus écologiques (laine de bois, cellulose, caoutchouc expansé, fibre de bois ou encore laine de mouton) (Asdrubali, D'Alessandro, et Schiavoni 2015), ainsi que le développement de nouvelles technologies, moins conventionnelles dans leur fonctionnement, leur principe, voire leur installation dans la paroi : isolation sous vide (VIP), panneaux remplis de gaz, aérogel, matériau à changement de phase (MCP), ou encore les isolants dynamiques (Imbabi 2012).

2.2.1.2.2 Gestion de l'humidité

L'humidité contenue dans les parois de l'enveloppe provient de l'environnement extérieur (infiltration d'eau de pluie, humidité relative), et intérieur, produite métaboliquement par les occupants ou leurs diverses activités (douche, cuisine, etc.). La volonté de diminuer l'impact énergétique d'un bâtiment conduit à améliorer l'étanchéité à l'air de celui-ci, diminuant de fait l'évacuation naturelle de l'humidité contenue dans les parois. L'utilisation de pare-vapeur dans les parois est courante, mais peut paradoxalement parfois entrainer une accumulation d'eau sous forme liquide ou gazeuse (Viitanen et Ojanen 2007). Celle-ci pose de multiples problèmes : d'une part, elle favorise le développement d'organismes fongiques, néfastes pour la santé humaine et fragilisant la structure du bâtiment si celle-ci est sensible à l'eau (structures bois) ; d'autre part, elle dégrade l'efficacité thermique de l'isolant contenu par la paroi. Pour éviter cela, certains matériaux poreux tels que la terre crue, naturellement régulateurs d'hygrométrie peuvent être préconisés. Il existe également des solutions de pare-vapeurs intelligents, dont la perméabilité à la vapeur augmente avec le taux d'humidité dynamique (Künzel 1998). L'utilisation d'isolants qui ne craignent pas l'humidité (roseaux naturels, par exemple) permet une autre approche mais ne solutionne pas la problématique de gestion des transferts. Par ailleurs, l'enveloppe peut aussi tenir le rôle de collecteur d'eau (humidité relative de l'air (Caldas et al. 2018), eau de pluie) pour un usage ne nécessitant pas sa potabilité.

2.2.1.2.3 Gestion de l'air

L'étanchéité à l'air est l'ensemble des dispositifs mis en place pour que le bâtiment soit étanche à l'air, et donc pour qu'il empêche toute fuite ou pénétration d'air. Une mauvaise étanchéité peut être source d'inconfort pour les usagers, augmenter les déperditions thermiques, et favoriser la condensation dans les parois. De façon préventive, l'utilisation d'un pare-vapeur fait généralement office de membrane d'imperméabilité à l'air, accompagnée de multiples points d'attention aux endroits à risque (calfeutrages, joints, bandes d'étanchéité). En parallèle, le renouvellement d'air est assuré par des systèmes de ventilation, mécaniques contrôlés,

naturels (exploitation des forces motrices naturelles) ou hybrides. L'enveloppe « respirante » est une notion introduite dans la littérature dans les années 1950 (transferts d'eau d'abord (Straube et al. 2003), puis transferts d'air (Fathy 1986)), mais dont les principes étaient déjà appliqués il y a plus d'un millénaire tels que les habitats mobiles des Bédouins (Elghawaby 2013). Si cette notion n'est pas nouvelle, des propositions de solutions innovantes émergent, focalisées sur la porosité de l'enveloppe, sa morphologie ou son adaptabilité (Latifi et al. 2016; Sung 2011).

2.2.1.2.4 Gestion de la lumière

L'apport de lumière naturelle dans un bâtiment est conditionné par plusieurs aspects : la position, forme et proportions des ouvertures, les états de surface, et l'orientation du bâtiment. La réglementation française actuelle impose une surface minimale de vitrage 1/6 de la surface habitable ; l'augmentation des surfaces des ouvertures, pour le bien-être visuel, peut induire une dégradation ou amélioration des performances thermiques du bâti en hiver, dépendant des pertes induites par la menuiserie associée au vitrage. Il existe une quantité notable de solutions – internes, externes et intermédiaires, c'est à dire dans la paroi même (Bellia et al. 2014) – pour réduire l'apport solaire, en été pour des raisons thermiques et à tout autre moment de l'année pour limiter l'éblouissement. Certaines d'entre elles sont même adaptatives, avec des vitrages « intelligents » (dispositif avec cristaux liquides, électrochimiques), des ombrages cinétiques ou qui intègrent des systèmes de production d'énergie renouvelable (Al Dakheel et Tabet Aoul 2017; Öncel, Köse, et Öncel 2016).

2.2.1.2.5 Interdépendance des critères d'exigence

Ces gestions sont pour la plupart interdépendantes, à la fois sur leur principe et sur leur mise en œuvre. La difficulté pour l'obtention d'une enveloppe efficiente réside dans la combinaison de plusieurs fonctions au sein d'un même élément. Celle-ci résulte souvent en une superposition de couches monofonctionnelles, alors que le vivant fonctionne par multifonctionnalité. Une couche isolante performante nécessite par exemple des apports en eau et en air contrôlés, ce qui est fréquemment résolu par l'ajout d'un pare-vapeur à un matériau isolant, et l'assurance d'une forte étanchéité à l'air par ailleurs. Face aux mêmes exigences, les organismes vivants privilégieront l'utilisation de matériaux aux propriétés géométriques hétérogènes (Knippers et Speck 2012) c'est-à-dire ayant des différenciations géométriques résultant en plusieurs fonctions. A travers des formes et structures variées au sein d'un même élément, et ce à différentes échelles spatiales, ils peuvent accomplir les fonctions recherchées pour un minimum de ressources utilisées. Par exemple, les papillons morpho sont dotés d'ailes micro- et nano-structurées par des écailles alvéolées, apportant respectivement des propriétés d'hydrophobie ne déstabilisant par leur vol, et une couleur structurelle. Grâce à cette dernière, l'espèce s'économise en pigments pour afficher un bleu métallique, supposément dissuadant pour les prédateurs ou à caractère d'exhibition pour la communication intraspécifique. Par analogie plus directe avec le bâtiment, la construction de nids par certains oiseaux démontre comment la transformation et l'assemblage de matériaux, plus que leur superposition, permet d'obtenir des enveloppes qui permettent d'accueillir et de protéger leur progéniture.

Dans sa gestion de la multifonctionnalité, le vivant intègre la notion de concessions, qui sont des compromis entre des exigences partiellement contradictoires. Ainsi, face à certaines contraintes de son environnement, il priorise certaines fonctions au détriment d'autres. Les enveloppes du bâtiment connaissent certaines contradictions, compensées par l'utilisation de systèmes énergétiques ou l'ajout de systèmes complexes ; par exemple, augmenter la taille d'un vitrage pour un confort lumineux et visuel optimal, quitte à compenser les gains thermiques l'été par l'utilisation excessive d'un système de climatisation.

2.2.1.3 Sélection du périmètre d'étude d'organismes et écosystèmes vivants

Les systèmes vivants ont été précédemment définis par des processus leur permettant de se maintenir en vie (2.1.1). Leur enveloppe externe, c'est-à-dire l'interface qui délimite l'organisme avec son environnement, est sujette à de nombreuses variations et contraintes. Les critères attendus pour l'enveloppe du bâtiment, notamment le contrôle des transferts d'un environnement à un autre, se retrouvent donc naturellement dans les enveloppes biologiques.

Par ailleurs, certains organismes vivants nécessitent, à l'instar de l'humain avec ses vêtements puis avec le bâtiment aussi appelé « troisième peau », une protection additionnelle à celle que leur procure leur enveloppe et/ou leur métabolisme. Au travers d'ouvrages qu'ils créent ou modifient, aux formes et fonctions multiples, ils trouvent un refuge ou habitat pour se protéger d'un environnement externe qui peut leur être délétère (voir Figure 2.5a).

Le vivant présente une très grande diversité sur laquelle s'appuyer pour la démarche bio-inspirée (2.1.1.4). Pour faciliter les analogies entre les fonctions présentées par la biodiversité et celles recherchées pour l'enveloppe (voir 2.2.1.2), il semble raisonnable de restreindre le domaine d'étude à une portion plus faible et spécifique du vivant. Les travaux se focalisent donc sur les enveloppes biologiques et les constructions animales comme sources d'inspiration potentielles dans le domaine biologique. Les organismes des domaines des bactéries et des archées ont été exclues, n'intégrant finalement plus que les Eucaryotes : plantes, animaux, et fonge. Notons que les Eucaryotes unicellulaires sont exclus de l'étude, car moins décrits dans la littérature (exemple montré en Figure 2.5b).

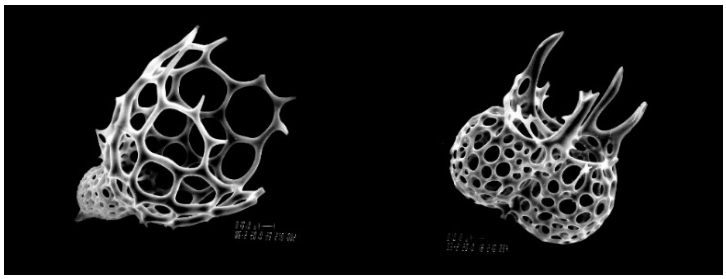
(a) (b) 

Figure 2.5 - (a) Nid construit par un oiseau tisserand (Licence Pixabay).
(b) Squelettes de radiolaire à base de plancton siliceux adapté au monde marin (© Annick Baudrimont, Laboratoire de géologie et d'océanographie, Université Bordeaux I).

Ces travaux de thèse s'intègrent dans la continuité de travaux menées sur la caractérisation multicritères d' « interfaces biologiques » (Cruz 2021) et visent à compléter la base de données

des enveloppes biologiques du vivant. Cruz a ainsi caractérisé les enveloppes biologiques, et nous élargissons ici le champ d'investigation aux constructions animales.

2.2.2 Exploration des approches pour la description des modèles biologiques

L'abstraction est cruciale dans les premières étapes du processus de conception de la bio-inspiration, car elle consiste à analyser les systèmes biologiques et à créer des parallèles entre la biologie et son propre domaine. La biologie couvrant un très large domaine des sciences de la vie, elle inclut des informations et sémantiques hétérogènes ; néanmoins, des outils d'abstraction (modélisation fonctionnelle par ontologies, des thésaurus et méthodes comme présentés en Chapitre 1) existent afin de combler le fossé entre les différents domaines et construire une biologie intégrative à travers ses sous-catégories. La représentation fonctionnelle permet de créer un support de conception permettant aux concepteurs d'accéder à des principes biologiques qui ne relèvent pas de leur expertise personnelle.

2.2.2.1 Approche fonctionnelle

Un système vivant peut être représenté comme un système ouvert, ayant des intrants et des extrants, et des processus permettant de passer de l'un à l'autre. Les interactions au sein du système sont interdépendantes et peuvent être complexes. Elles sont configurées selon un modèle d'organisation. La Figure 2.6 est un exemple de représentation du modèle boîte noire d'un système et de l'une de ses fonctions ; les intrants et extrants sont connus sans que tous les processus, au sein du système et de ses sous-systèmes, soient parfaitement décrits ou compris. Les intrants et extrants sont de la matière, de l'énergie, et de l'information, et la boîte noire représente les conversions et transformations ayant lieu au sein du système.

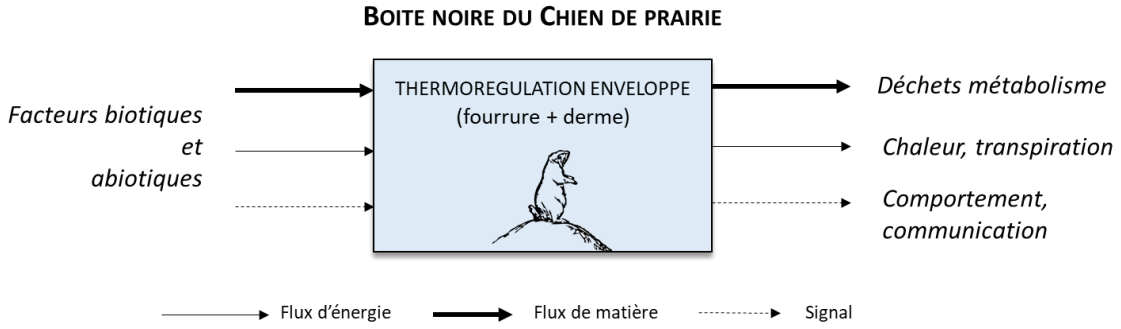


Figure 2.6 - Modèle boîte noire du système chien de prairie pour la fonction thermorégulation. Basé sur Nagel, Nagel, et al. (2010).

Les processus d'un système sont nombreux et imbriqués. L'exemple de la thermorégulation du chien de prairie indique que son enveloppe joue le rôle d'isolant grâce à sa fourrure et aux graisses présentes sous le derme. Les graisses brunes, également appelées tissus adipeux bruns, brûlent un stockage de lipides pour lutter contre le froid (Giralt et Villarroya 2013). Leur abondance et activation sont variables selon la période de l'année, conditionnées par les conditions climatiques et le métabolisme.

2.2.2.2 Approche fonctionnelle-causale

Les systèmes régulant les échanges thermiques dans le vivant sont très complexes à modéliser. Dans le cas d'espèces homéothermes[7], comme le chien de prairie, ces processus comprennent la structure de l'enveloppe, des phénomènes de vasoconstriction et de vasodilatation, une régulation physiologique interne complexe, et bien d'autres aspects. Pour nos objectifs de représentations fonctionnelles, nous avons fait le choix de réduire cette analyse.

Sur la base de paires entre fonctionnalité primaire (importer, réguler, etc.) et flux (d'énergie, de matière ou signaux), une représentation est proposée pour l'organisme complet du chien de prairie en Figure 2.7. Bien que déjà très simplifiée, elle met en évidence un modèle d'organisation complexe dans lequel s'enchevêtre l'enveloppe, et qui fait intervenir le métabolisme de l'organisme, sa perception du temps et de son environnement, et le comportement qui en résulte.

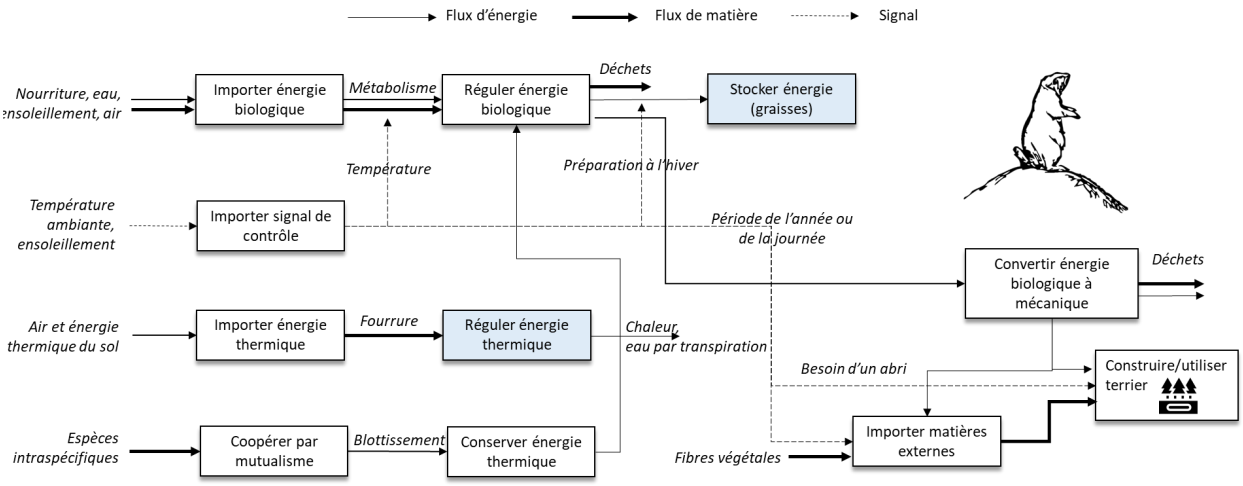


Figure 2.7 - Approche fonctionnelle de la thermorégulation du chien de prairie.

2.2.2.3 Approche *Structure-Behavior-Function*

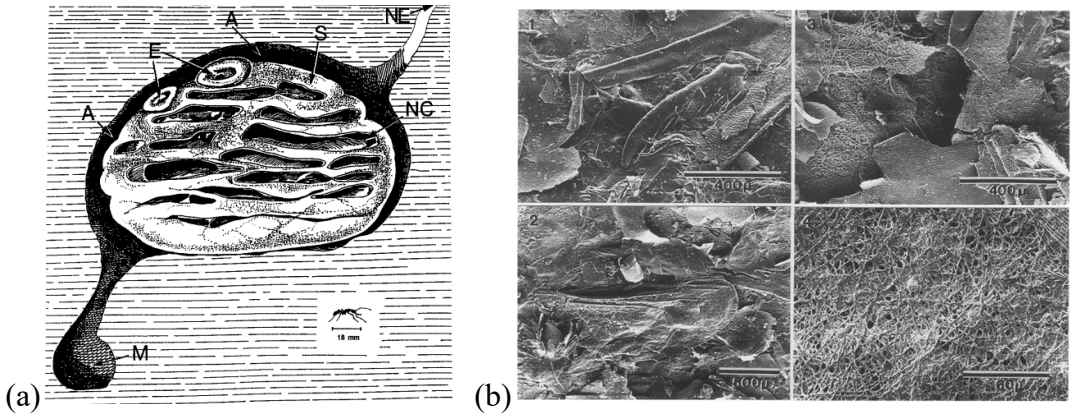
Les modèles fonctionnels-causaux de type SBF trouvés dans la littérature pour la structuration de la connaissance biologique présentent une structure relativement similaire, et incluent certaines notions, unifiées par Rosa et al. (2015) :

- Phénomène physique : interaction entre le système et son environnement.
- Entrée ou stimulus : variable physique qui traverse la frontière du système et qui est essentielle pour une interaction entre le système et son environnement.
- Etat : ensemble de propriétés du système (ou de son environnement) qui est impliqué dans une interaction.

[7] Une espèce est homéotherme si son milieu interne conserve une température constante indépendamment du milieu externe.

- Effet : principe de la nature qui régit une interaction et qui s'incarne dans un phénomène physique spécifique.

Celles-ci aident à la contextualisation d'un phénomène physique ; un intrant ou stimulus modifie ou impacte l'état d'un organisme par des effets liés à des phénomènes physiques. Ces stimuli, ou interactions avec l'environnement, peuvent être de nature biotique ou abiotique, tels qu'introduits dans 2.1.2.2. A partir des travaux de Badarnah and Kadri (2015a) et Cruz (2021), les phénomènes physiques peuvent pour leur part être décrits selon une structure qui décompose les phénomènes physiques en processus, et qui lie ceux-ci à des caractéristiques – géométrique, d'état, de composition – du système. La Figure 2.9 présente l'application de ces principes au travers de l'exemple des fourmis sauteuses indiennes et de leur système d'imperméabilisation à l'eau. Au sous-continent indien, de grands volumes d'eau peuvent être absorbés par le sol en période de mousson, et menacent les nids de fourmis peu profonds. La structure des nids de *Harpegnathos saltator*, faite d'une coquille compacte et d'espaces plus ou moins profonds, permet l'écoulement de l'eau qui s'infiltre et détourne donc l'eau des chambres habitées (Figure 2.8a). La coquille est tapissée d'éléments divers – cuticule d'insectes, ailes, végétaux – rendant imperméable à l'eau la paroi et facilitant l'évacuation de l'eau.



(a) (b)

Figure 2.8 - Images extraites de Peeters et al. (1994).
(a) Dessin du nid souterrain des *Harpegnathos saltator* avec A : atrium ; NE : tunnel d'entrée ; S : sphère de nidification ; E : ouvertures dans la sphère ; M : fosse ; E : chambres de nidification.
(b) Photographies au microscope électronique à balayage du "papier peint" tapissant les chambres du nid.

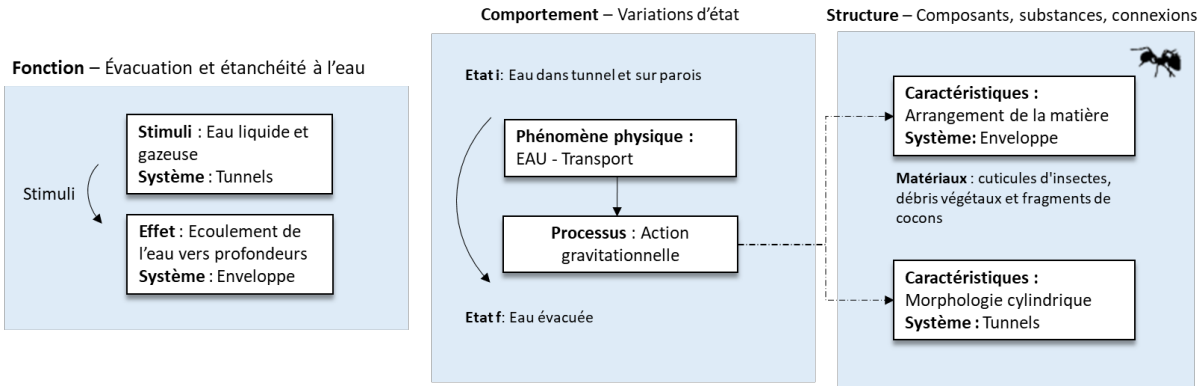


Figure 2.9 - Modèle SBF appliquées aux colonies des *Harpegnathos saltator*.

Le modèle proposé en Figure 2.9 suit ainsi une structure SBF, et permet la compréhension d'une fonction spécifique au nid d'un organisme vivant. Il pourrait suggérer l'implémentation d'un revêtement ou système d'écoulement d'eau basé sur un arrangement de matières trouvées localement et recyclées (molécules de chitine dans le cas des cuticules des arthropodes).

Notons par ailleurs que les systèmes à abstraire ont différentes échelles ou niveaux d'organisation biologique. L'évacuation de l'eau dans le nid de fourmi se fait par exemple à échelle macroscopique dans le système tunnel, via l'écoulement d'un fluide dans un volume spécifique. Elle peut cependant être considéré à l'échelle microscopique de la coquille, par l'analyse de ses caractéristiques surfaciques. Certains niveaux d'organisation biologique inspirent naturellement à une échelle similaire alors que l'inspiration de concepts pourrait bénéficier d'une analyse multi-échelle.

2.2.2.4 Chapitre – Bionics and Sustainable Design

La partie qui suit a été publiée dans l'ouvrage Hubert *et al.* (2022) sous la forme d'un chapitre intitulé « *Exploiting the potential of Nature for sustainable building designs: A novel bioinspired framework based on a characterization of living envelopes* ». Il a été accepté en février 2022, et publié en mai 2022.

2.2.2.4.1 Présentation de l'article

Ce chapitre présente la caractérisation d'échantillons d'enveloppes biologiques et de construction animales.

Le référencement et la caractérisation des constructions animales étudiées sont issues d'une recherche bibliographique conséquente (une centaine de références a été trouvée dans la littérature, conduisant à une liste de 50 constructions analysées de façon plus ou moins détaillée). Les références trouvées décrivent généralement une ou plusieurs constructions animales selon un axe d'analyse bien précis : taille du nid pour la progéniture, stratégie de protection contre les prédateurs, processus de construction, etc. La description de certains mécanismes de régulation en jeu a par exemple nécessité de nombreuses recherches additionnelles au document initial trouvé, de façon à compléter notre connaissance de la construction animale étudiée. L'enrichissement de la base de données est un processus évolutif, et le travail de recherche bibliographique effectué a permis de fournir un support significatif pour concevoir l'outil proposé lors des ateliers. Cet outil est illustré en Figure 2.10 : une base de données sous forme de tableur, dans laquelle il est possible de naviguer par sélections de catégories ou recherches par mots clés. En outre, le tableur est accompagné d'arborescences, liées aux facteurs de régulation, permettant aux concepteurs de reformuler leurs besoins ou « problème » pour en faciliter l'exploration. Un extrait plus détaillé de cette base de données et de l'arborescence est proposé en Annexe B.2.

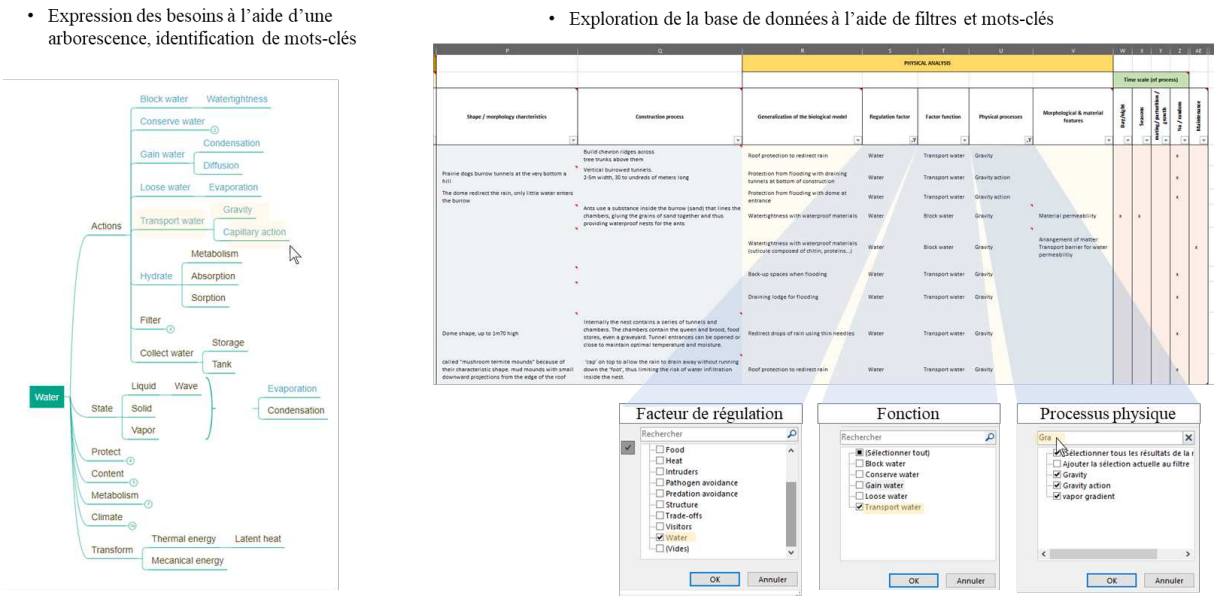


Figure 2.10 – Outils proposés en atelier : arborescences pour l'identification de mots-clés et base de données.

Un échantillon final, contenant cinquante construction animales choisies selon des critères variés, est proposé, décrit et structuré selon une analyse mixte, entre architecture et ingénierie, sur l'exploration réalisée et décrite en 2.2.1.3. Il constitue ainsi une base de données exploitée par des concepteurs d'enveloppe du bâtiment, pour chercher et sélectionner des modèles pertinents à leurs enjeux.

Bien que toujours fonctionnelle, la démarche de caractérisation est décrite comme une approche systémique, composée d'un système et de ses sous-systèmes, de besoins biologiques de maintien de ses systèmes, et de perturbations possibles (ou stimuli) de l'environnement. Les réponses (ou effets) sont décrites par des phénomènes physiques, regroupés dans 6 grandes catégories correspondant aux exigences relatives à l'enveloppe décrite dans 2.2.1.2 : chaleur, eau, air, lumière, son, et structure. Le processus employé lors de la caractérisation d'un organisme, qu'il soit une enveloppe biologique ou une construction animale, est détaillé à travers l'exemple des terriers de chiens de prairie, rongeurs d'Amérique du nord. Appliquée à tout l'échantillon, la caractérisation réalisée permet de proposer une multitude d'exemples de fonctions du vivant en réponse à un environnement externe sollicitant. Celles-ci sont synthétisées sous le prisme de l'enveloppe multifonctionnelle et de techniques constructives.

Ce chapitre s'ouvre sur l'intégration de cette caractérisation au processus de conception d'enveloppe, comme support pour l'identification et la compréhension des caractéristiques biologiques lors d'ateliers d'idéation. Ingénieurs et architectes ont dû s'appuyer sur la base de données issue de cette caractérisation pour proposer des concepts d'enveloppes bio-inspirées. Le cas d'étude du papillon morpho et de l'inspiration de ses diverses propriétés pour la génération d'un concept d'enveloppe adaptative multifonctionnelle est ici détaillé. Le concept issu de ce modèle, et sur lequel s'appuie le cas d'étude de ces travaux, sera plus détaillé dans le Chapitre 3.

Exploiting the Potential of Nature for Sustainable Building Designs: A Novel Bioinspired Framework Based on a Characterization of Living Envelopes

Tessa Hubert, Antoine Dugué, Tingting Vogt Wu, Denis Bruneau, and Fabienne Aujard

Abstract Living envelopes, such as biological skins and structures built by animals, are functional and sustainable designs resulting from years of evolution, conditioned by biological and physical pressures from the environment. When building a home, animals demonstrate inspiring strategies to protect themselves from predator threats and external climatic conditions. As for human buildings, temperature, humidity, air quality, light, are some of the various factors they have to manage for optimal conditions. Facing the climate emergency, growing efforts to build durable designs have led designers to search for more efficient or alternative solutions by observing Nature. The emerging field of bioinspiration including animal architecture has already brought few but rare exemplary innovations that were integrated into building designs. Data on animal architecture are scattered among various biological domains, from observation of species habitats by zoologists such as entomologists or ornithologists, to bioindicator studies by climatologists. Data collected by scientists is available in eclectic idioms, a challenge to be fully comprehended by building designers. This

T. Hubert (✉) · A. Dugué
NOBATEK/INEF4, National Institute for the Energy Transition in the Construction Sector, 64600 Anglet, France
e-mail: tessa.hubert@u-bordeaux.fr

A. Dugué
e-mail: adugue@nobatek.inef4.com

T. Hubert · T. Vogt Wu
Institute of Mechanical Engineering (I2M), UMR CNRS 5295, Université de Bordeaux, 33400 Talence, France
e-mail: tingting.vogt-wu@u-bordeaux.fr

T. Hubert · D. Bruneau
Ecole Nationale Supérieure d'Architecture et Paysage de Bordeaux, 33405 Talence, France
e-mail: denis.bruneau@bordeaux.archi.fr

F. Aujard
MECADEV UMR CNRS 7179 —National Museum of Natural History, 91800 Brunoy, France
e-mail: fabienne.aujard@mnhn.fr

© The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2022

F. L. Palombini and S. S. Muthu (eds.), *Bionics and Sustainable Design*, Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes,
https://doi.org/10.1007/978-981-19-1812-4_10

chapter presents a characterization of living envelopes aiming at facilitating the transposition of some relevant biological features into innovative and sustainable architectural designs. The approach is architecture and engineer oriented, assessing biological functions and strategies, using criteria that are meaningful to building designers: functional and temporal analyses of spaces and materials, physical factors regulated through envelopes, behaviors, and interactions of species. Applied to a sample of species and animal-built structures, the characterized biological role models put forwards multi-functionality and efficiency through relevant construction techniques, the use of local resources, as well as behavioral adaptation. Examples of applications inspired from the characterized species are described, from theoretical proposals to a very practical application of an adaptive envelope skin inspired by the Morpho butterfly.

Keywords Bioinspired design · Adaptive skin · Biological characterization · Animal construction · Living skin · Building envelope · Design framework · Sustainable designs

1 Introduction

Living species have evolved for 3.8 billion years under environmental pressures [1] such as geographic and climatic conditions, competition of material resources, or predation. Observable variations in organisms are called the phenotype and it includes morphology, physiology, and behavior characteristics [2]. Through phenotypic adaptation to maintain viable conditions in regard to the varying external environment, species resulting with the best selective advantages and characteristics have a higher probability to survive.

As the living species found today on Earth are the outcome of a continuous natural selection process while facing varying and extreme conditions, they can prove to be resourceful and very effective, and as such, they have much to teach us in a time where resilience to climate change has become a necessity for our own survival [3]. In Europe, most countries present an ecological deficit, meaning that their population's footprint CO_2 emission with fossil fuel use exceeds the biocapacity of the area available to that population [4]. Concerns about climate change are rising, while new environmental requirements are emerging in the building sector. As it accounts for around 40% of the global energy consumption, sustainable advances in the built environment are essential to reduce greenhouse gas emissions. And more specifically for the building envelope as it has a key role to play in the overall building energy consumption [5].

The envelope is a widely used term to define the interface of a building between its internal and external environment. It includes the roof, façades, floor, openings such as windows or doors, and even transitional spaces such as atria or lobbies. Transposed to Nature, envelopes can be described at different scales. First, on a living organism scale, with biological skin such as the human dermis or the shell of a snail. Second, on

a macro scale with constructions built by organisms, such as bird nests or tunnels of ant colonies. Both types of envelopes act as filtering barriers between two fluctuating environments and demonstrate multi-functional properties which could help inspire human designs. The feathers of penguins, for instance, act as a thermal insulation while being superhydrophobic and anti-icing [6], which allows them to daily dive in sub-freezing waters. Combined to a natural oil with water-repelling properties, nano-scaled ridges on the feathers make it impossible for microdroplets to form ice. This envelope could inspire resistant insulated designs while offering water and ice-repellant properties.

Bioinspiration has recently emerged as an interdisciplinary field to lead to innovative, efficient, and durable designs [7]. Research on the area is growing, resulting in several cases of bioinspired building envelopes inspired from species described in the literature by biologists [8–11]. The current description of living organisms would account for 1.7 million species out of 10 million left to describe [12]. Even for quite a small ratio, the amount of potentially inspiring species described in the literature is substantial. However, practice in architecture shows that the selected biological models are often picked among commonly known species, from animal or plant kingdoms [13]. The abstraction of the species also rarely led to multi-functional designs, whereas the feature of the species which provided inspiration usually is involved in several regulatory roles. This pattern could be related to a scarce involvement of biologists during the design process [14], driving the design team to construct inspired designs on biological shallow knowledge.

Yet, even though rarely developed by biologists [15], several tools exist to facilitate the bioinspiration process [16, 17]. More specifically, thesaurus [18], ontologies [19–21], or taxonomies [22] are being developed to help the understanding of the properties and functioning of living species and selecting the relevant case study for the purpose of the application. However, they do not focus on living envelopes hence might not provide a characterization with terminology and semantic oriented toward architects and engineers. Only few methodologies for characterizing multi-regulation capacities of biological envelopes or for proposing multi-functional building envelopes were developed in the literature [10, 23–26]. This chapter presents a characterization of living envelopes derived from the methodologies of [23, 24], further developed using biotic, space, and time-scale criteria. A proposed framework backbone the innovation process, integrating this characterization as a support for the identification and understanding of relevant biological features. They are then explored and transposed into bioinspired concepts. The chapter proposes the description of some general principles for building envelope emerged from this methodology, as well as an actual design.

2 Living Envelopes

2.1 Building Designs in Needs of Bioinspiration?

To respond to climatic challenges, extensive research in the building field is focusing on improving the envelope's efficiency. Yet, this is not a recent trend, as the building envelope at various periods of time has been adapted to the occupants' needs, along with construction techniques and technologies. Pioneers of bioclimatic buildings in the 1960s were already targeting reductions in energy consumption of the whole building, considering the overall design of the envelope without the use of separate or additional equipment [27]. Ever since the building envelope was more than a load-bearer structure and a thermal shield, additional layers for specific functions were added, rather than providing a new design based on holistic analysis and resulting in a multi-functional feature.

Consideration of harvesting solar energy using passive systems and influencing the user behavior [28] also goes back and highlights multiple perspectives of the envelope. The approach given above is mainly engineer-oriented, but the building envelope definition changes according to the observer. For the occupants, the envelope elements surrounding them are managing heat and light transfers that result in visual and thermal comfort and delimiting private from public space. For an architect, it can represent a contact surface between the building and the city, while for the energy-focused engineer, the envelope acts as an interior/exterior separation. Therefore, the list of expectations for the building envelope can be broad. Adding to this, the regulations and standards are numerous and complex, and can depend on the countries, but put together they define a regulatory framework that allows characterizing the expected indoor controlled conditions. Those integrate thermal, light, noise, and air comfort for the occupant while being exposed to varying outdoor conditions [29].

In that sense, living envelopes face very similar needs to which they are highly responsive. Despite being inert like buildings, some plants for instance can demonstrate dynamic mechanisms at different scales. They might respond to water through tropism and nastic macro-movement and manage their carbon dioxide needs by opening and closing their stomates [30]. Species have discomfort ranges where their metabolism and physiology are not properly functioning, which will push them to try to reach better or optimal conditions.

The field of examples in biology being very broad, the authors narrowed down their study of biological organisms to samples including structures built by animals and biological skins only, in order to find responsive and multi-functional inspiring properties.

2.2 Biological Skins

Biological skin refers to the envelope separating the internal environment of living organisms from external conditions. As the diversity of biological skins is wide, some research reduced the sampling of their study using various selection criteria [24]. reduced the sampling of their study [13] using various selection criteria. For instance, only the outermost envelopes are taken into account, meaning the study excluded partition envelopes such as blood vessel walls or nervous tissue. Though arbitrary, this choice makes sense since biological skins were selected by analogy with the building envelopes as they are both exposed to similar external conditions (sun radiation, wind, daily temperature variations…) and encompass the whole system. In addition, only pluricellular Eukaryotes are studied; unicellular species, as well as *Bacteria* and *Archaea* domains [2] are excluded because their description in literature is scarce. At last, no living organisms from marine environments were selected as their range of environmental conditions was considered too distinct from the classical terrestrial environment of buildings. Although existing or in their design phase [31], resilient architecture as marine and underwater habitats worthy of Jules Verne is not the norm yet.

2.2.1 Selection Among the Diversity of Skins

The selection criteria described above resulted in a list of 10 types of biological skins [24] defined by their base skin and appendages, i.e., their natural prolongation. The base often includes several layers of tissues, such as the hypodermis, dermis, and epidermis of the human skin. Appendages can be various as shells, scales, feathers, fur, and provide many additional functions to the skin.

For our own characterization, a few species corresponding to those types of envelopes were selected, based on the available data in the literature, on the various climate range of their habitat, but mostly on the diversity of functions their envelopes provide to keep them alive (sample in Table 1).

Chameleons were chosen among the horny scale species for their known color modifications, a property provided by their dermis. This ability, although associated with camouflage and display for social interaction, would help them thermoregulate themselves by changing the configuration of the nano-crystals contained in one of their dermis, reflecting more in the near-infrared (IR) range of the spectrum [33]. Likewise, Silver ants have high reflective properties in the near-IR range, and high emissivity in the mid-IR, thanks to their appendages. Their setae, microscopic hairs triangular-shaped in the case of silver ants, allow them to cool down by a few degrees [34], just enough to find food for the colony by going outside under the desertic Saharan climate. On a nano-scale, the wings of the Morpho butterflies provide self-stabilization in temperature: they emit in the IR when they are too warm, and absorb it again when they cool down [35, 36].

Table 1 Selected species from various types of envelopes

Selected species	Type of envelope [24]	Reign/class/order	Climate (Köppen classification [32])
Chameleon	Skin, scale	Animal/Reptile/Squamata	Temperate/mesothermal: humid subtropical
Garden snail	Skin, shell	Animal/Gastropod/*Stylommatophora*	Temperate/mesothermal
Mouse lemurs	Skin, fur	Animal/Mammal/Primate	Tropical to temperate
Silver ant	Cuticle, setae	Animal/Insect/*Hymenoptera*	Dry climate: hot desert
Morpho butterfly	Cuticle, scale	Animal/Insect/*Lepidoptera*	Temperate to tropical
Pine cone	Plants' bark	Vegetal/*Pinopsida*/*Pinales*	Various

Mouse lemurs (*Microcebus sp*) are nocturnal species among the smallest lemurs. They have the ability to enter into states of torpor, i.e., they can reduce their metabolism and their body temperature [37]. As appendage, their dense fur of down allows for avoiding water and heat losses. They also have a mechanism of active heating, thermogenesis without shivering, which uses a particular tissue containing a specific protein, commonly called brown fat, and also present in humans [38].

The Garden snails were selected for their high sensitivity to hygrometric variations. When hibernating, they retract inside their shell and seal it using a temporary mucous veil called epiphragm, avoiding desiccation [39]. When active, they can hydrate by absorbing humidity on surfaces through their mucous until they have reached satisfactory hydration [40]. Pine cones are also very hygro-reactive as they open when the ambient air is dry enough to ensure the dissemination of their seeds.

2.2.2 Existing Applications

The species in our sample show functionalities expressed by their base skin, their appendages, or the combinations of both, all relevant in regard to the building envelopes' expectations. But they also come with other regulating functions which will not be all cited here; breathability (Silver ant), hydrophobia (Morpho butterfly), arrangement of matter following the golden angle (Pine cone), etc. When used as inspiring models, it is probable that only one dominant function is transposed into a technology, whereas they demonstrate much more regulation assets.

Several buildings and building envelopes were inspired by biological skins [9–11, 13]. As outlined by [13]—a study on the design process of 30 built bioinspired envelopes including designs inspired by biological skins—few cases address multi-regulation apart from coupling light and heat transfers. The latter are interdependent phenomena and quite often simultaneously targeted by the designers.

Likewise, most of the implemented or currently being implemented designs that were inspired by our chosen models were found to result from the abstraction of one function from their biological models. The silver ants inspired a passive radiative cooling under direct solar radiation, using seven layers of HfO2 and SiO2 resulting in high reflectivity in the solar spectrum and emissivity in mid-IR [41]. The applied photonic approach is actually very close to the phenomenon at the root of the Chameleon change of color, functioning with periodic nano-structures [42]. In line with photonic crystals, the Morpho butterfly has inspired the design of solar panels for improved efficiency [43, 44] through for instance anti-reflection properties [45]. More generally, the potential on radiative cooling using Morpho-inspired nanostructures has been investigated and could be implemented into building applications [46].

Note that like heat and light mentioned above, functionalities expressed by these designs are sometimes coupled; for instance, the morphological features of the scales of the Morpho wings provide thermal regulation, but also hydrophobic properties. By closely mimicking the structuration, using technologies such as nano-printing, both properties might get achieved even though only one was targeted.

2.3 Animal Constructions

Animal constructions, also called animal architecture in the literature, are structures built by animals. Though the designation *animal architecture* is meaningful for architects, it could be confused with biological fields such as molecular architecture; hence the authors will prefer animal construction over this appellation.

The functions of animal constructions are described in the literature as protection from a hostile environment such as predators or climatic conditions, trapping preys, and intraspecific communication [47]. These structures usually are destined for themselves, for their offspring or family, but they can be taken over by predators, co-occupied with other species, or even re-adapted later on by other species for new purposes. Constructions abound in nature under diverse forms—burrows, nests, webs, tubes, caves—and embed sophisticated functions.

By analogy, these envelopes built by living organisms resemble in many ways to human buildings: they serve a similar function of shelter while being exposed to uncontrolled varying factors from the outside environment. And while humans build structures with very energy-consuming techniques and most of the time imported materials, animals only use local resources that are processed with soft chemistry and are biodegradable (Fig. 1).

2.3.1 Primary Functions

Endothermic animals, such as mammals, can maintain their body at a certain temperature, mostly through metabolic mechanisms. By opposition, ectothermic animals

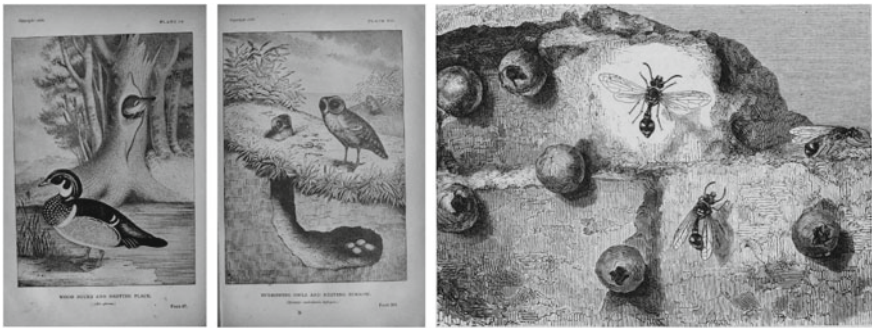


Fig. 1 Examples of animal constructions: from left to right, wood ducks, owls, and wasps. *Credit* Public domain, images from Davie [48] and Abbott et al. [49]

such as reptiles, also known as *cold blood* species, have none or very few internal heating sources, hence they rely on environmental sources to be at favorable temperatures. Regardless of their physiological resources, they all have optimum temperatures. Many of them were reported to create shelters to filter, store or dissipate heat. These shields come with managing other vital factors—air renewal, humidity level, water flows such as floods—while undergoing environmental variations.

Animal constructions are also exposed to predation, and threats can be managed in different ways. Camouflage helps animals stay hidden; for instance, some species are suspected to use branches with lichen to blend in the background when constructing their nests [50]. Another technique would be preventing the invasion either by using signals or defensive elements; the nest Chimpanzees build every day as a platform to sleep would include paralytic compound and thorny leaf stems as protection and dissuasive elements from potential predators [51].

Storage and cultivation in constructions help animals endure seasons or periods of time where food is scarce. Kangaroo rats would store seeds in their mounds, as it would have a more favorable environment to make them moldy [52], a seed characteristic they would prefer [53]. Animals sometimes even build special storage rooms but at a higher cost, mostly because of maintenance and a higher threat from predators and thieves [47].

For this study, communication (such as display by the Male Satin bowerbirds build to impress females) and transportation constructions were excluded. Although resourceful and instructive, they appeared out of our scope during our research.

2.3.2 Perimeter of Study

Specific references in the literature give overviews on multiple animal constructions [47, 54–60]. Most of them contain descriptions, drawings, photographs of construction processes, used materials, and operating principles of animal constructions. The descriptive and narrative discussions are all specific to their authors and are mostly

qualitative in their characterizations. To find specific data, e.g., the hygrothermal properties of some construction envelopes, it was necessary to search specific literature about the builder species. Despite this process, very little quantitative data was found and they usually mostly cover the thermal aspects of the nests.

The authors selected 50 constructions from species with diverse needs and constructions techniques, to have a diversified sample. For this, they chose various animal classes, including marine species. The resulting sample contains constructions made through all four processes mentioned above, with various shapes, materials, and features (synthesis in 3. Take-aways from animal constructions).

2.4 Taxonomic Bias

The distribution of our samples does not reflect the diversity of described nor estimated species on Earth. To approximate research activities according to 24 taxonomic classes, a study calculated the occurrence of data from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF) database, i.e., the biggest biodiversity data repository available proportionally sampled to its number of known species [61]. They found that land plant classes and animal classes including birds, mammals, amphibians, and reptiles, are over-represented, while arachnids, fungi, and insects are under-represented, the latter having the worst occurrence. They underline the fact that classes such as birds were known as over-represented in many disciplines for a long time [62] and the gap with the rest of the species is barely decreasing since the 1950s.

The authors' sampling of biological skins is limited as it excluded many species, hence it cannot be properly confronted with the expected taxonomic biases investigated in the cited references. On the other hand, the sampling of animal constructions confirms some arguments: birds and fungi are respectively over and under-represented, which is consistent with the literature. As for insects, arachnids, and mammals, the trend seems to be reversed and matches the authors' occurrences of animal-built structures in the literature: indeed, construction for birds and insects were presented as the most occurent by Hansell [47].

The difference of occurrence in research and publications—hence of taxonomic biases—between species and built structures of species—is not surprising. First, all species do not build homes; arthropods apart from arachnids and insects are not much reported as builders, neither are reptiles, which explains their absence in the sample. Secondly, research has established a strong link between societal preference and scientific productions [63]. It is understandable that most of the built structures found in the literature are either built from birds (already popular) or burrows from arthropods as they might attract curiosity. As for mammals, the examples of constructions might be fewer since they are endothermic and can manage their internal conditions with sole metabolisms and behavior strategies. The difference with birds, endothermic as well, would be their size: following the square-cube law [64], the heat losses of birds are higher than larger animals, since they have a

higher surface-to-volume ratio; hence more surface area to lose heat compared to their volume.

3 An Engineer/Architecture-Oriented Characterization

The use of bioinspiration in the building sector has led some researchers to focus on design processes, frameworks, and tools to facilitate the design of technological solutions based on biological models [8, 10, 65]. In support, an ISO standard was proposed to homogenize existing design processes [66], and methods and tools such as databases, thesauri, or taxonomies were recently developed [16]. However, practices of bioinspiration in architecture have shown that most of the bioinspired designs do not rely upon these tools and design processes proposed in the literature, and that bioinspired designs are most of the time monofunctional [10]. Many concepts are never implemented in buildings and stay stuck at the stage of concept or patent [67]. It underlines the challenge of the transposition from the biological models to technical solutions, which can then be applied to a building. More advanced interdisciplinarity during the design process would certainly help the transferability of a biological principle into technologies, by providing a better understanding of the phenomena at stake.

One of the challenges is that although a broad range of papers proposes descriptions of living envelope features (behavioral biology, anatomy…), the information is not structured to clearly identify the causes or triggers of the involved phenomena, and what it can accomplish in physical terms. Moreover, existing tools to describe these phenomena lack the involvement of biologists as they are usually developed for and by engineers [15]. Thus, structuration of the available data on living envelopes is necessary, as this is the biological starting point that will then be exploited during the design process.

3.1 Existing Tools for Abstractions

Structuration of biological data to support bioinspiration is found in abstraction tools. Abstraction is crucial in the early steps of the bioinspiration design process as it consists in analyzing the biological systems and creating parallels between biology and their own domain. The way models are abstracted plays a key role in the conceptual phase; hence it requires relevant tools to ensure reliable understanding and connection to our own design domain.

Biology covers a very broad field of life sciences and can be divided into multiple subcategories such as mycology, botany, zoology, themselves including other fields of study (entomology, ornithology, etc.). Even in the biological domain, heterogeneous information and vocabulary and semantic issues do exist [68]. As highlighted in [69], the structuration of knowledge using tools such as ontologies is becoming valuable

in bridging the gap between different domains and constructing integrative biology across its subcategories. Likewise, it could help structure knowledge across multiple domains such as engineering or architecture.

Whether they are biological or technological, representing systems through functions is already commonly used to abstract problems in engineering. It provides a systemic way of specifying the functionalities of one model while contributing to its continuous improvement. Several tools tackle functional modeling in the literature, proposing ontologies, thesauri, and methods in the frame of bioinspiration processes. Table 3 presents tools mostly using structural and functional representations or descriptions. It puts forwards various approaches, such as behavior, strategy, and causality which could make sense for the characterization of complex structures interacting with their occupants, such as animal-built structure.

Only one of the listed tools is dedicated to an ontology for bioinspired architecture, but the project is currently focusing on the energy component although they plan to extend their study to more parameters such as water management or structural properties of buildings [70].

3.2 Systemic Approach

No tool was found to help build systemic descriptions and representations of animal-built structures in the literature. To structure their biological characterization, the authors first set a list of commonly accepted requirements for the building envelope and for the indoor conditions to provide comfort.

Human perception of comfort is related to three main factors: physiology, behavior, and psychology. The physiological is related to the metabolism, i.e., the body's mechanisms to keep acceptable conditions such as perspiration or metabolic heat. Behavioral mechanism represents actions taken by the person to reach a more comfortable state, such as getting dressed or doing physical activity. The last factor has been shown to be very variable according to the people, their culture, and their geographical origins; for instance, the habit of a certain type of climate increases the body's tolerance to this same climate in terms of temperature. As such, it is hard to set standards on indoor environmental quality (IEQ). However, optimal conditions can be approximated using the following factors:

- Stable temperature usually appreciated in a range from 17 to 22 °C [81];
- Relative humidity in the 40%–65% range [81];
- Illuminance during the day between 300 lx [81] and 500 lx, and limited illuminance during the night;
- Carbon dioxide concentration under 1000 ppm and VOCs (Volatile Organic Compounds) under their respective TLVs (Threshold Limit Values);
- Airspeed higher than 0.1 m/s for renewal and below 0.3 m/s to avoid thermal discomfort;
- Background noise below 35 dB [82].

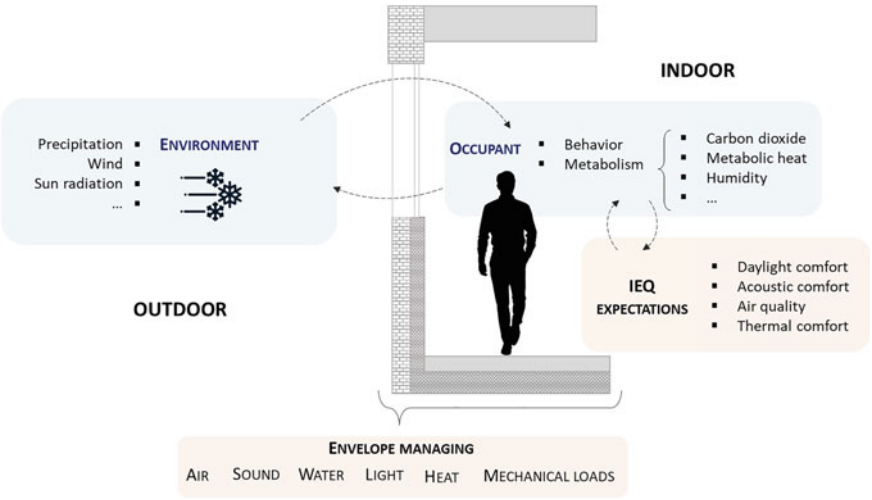


Fig. 2 Connections between outside and inside inputs on the IEQ expectations

The variations of these internal conditions are either due to environmental inputs, such as the temperature or relative humidity from the external ambient air or to the occupants and users. Indeed, the occupants unintentionally unbalance conditions through exchanges between their own body with their close media (heat exchanges, perspiration, breathing). Also, they usually can action commands that operate the building (HVAC systems, openings, etc.) and can modify conditions by their behavior. Figure 2 illustrates environmental factors and occupants as influencing indoor conditions. They highlight the regulation functions the building envelopes should manage: air, water, light, and heat transfers, as proposed by [23], completed by [24] with sound transfer and resistance to mechanical loads.

This representation of the interaction between building comfort and functionalities of the envelope foresees the complexity of characterizing living envelopes, whether they are organisms or built structures. They are part of a system whose inputs and outputs are interconnected. This angle directly refers to a systemic approach, i.e., an analysis method to handle systems from a global point of view. Commonly used in biology or engineering without being cited as such, it aims at understanding complex systems through three main concepts [83]. First, a system is governed by loops balancing or unbalancing each other. In the building, these loops were identified as indoor variations due to the occupants and environmental factors, in time scales of hours, days, or seasons. Second, all parts of a system are connected to each other. This can relate to the interconnection of the system elements: for instance, the temperature felt in a room depends on many factors, such as the air velocity, depending on itself on the shape of the room, on the user movements, on the airtightness of the envelope, and so on. Third, the different parts of a system working together result in synergy. The combined effect is greater than the sum of their separate effects. This concept also implies the dynamic and evolutionary properties of the system.

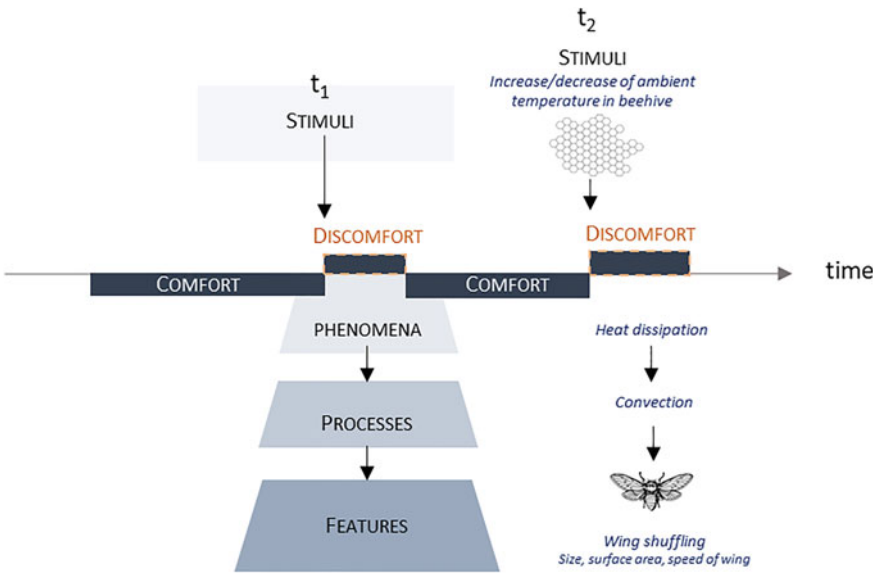


Fig. 3 Structure of proposed characterization for living envelopes. The "Comfort" zone in dark blue stands for the optimal range for one specific biological need. Disruptive elements at time t_2 are an illustration of the concept illustrated for time t_1

All three concepts are complementary and helped the authors define characterization criteria for understanding and describing biological skins and animal constructions. The chosen structure for the characterization is presented in the scheme of Fig. 3. Stimuli, such as environmental factors or interaction with other species, unbalance the system. The response of the system can be either the direct effect of stimuli on the system (e.g., the sun radiation leads to a rise of body temperature of a species) or readjustment of the system to return to comfortable conditions (e.g., discomfort in the rise of temperature induces the species to reach a shaded area).

Responses of various stimuli occur along different temporalities and locations of the system. For a bee, stimuli can have an impact either on their wings, their scales as a sub-part of the wings, or a completely different area as the thorax. Responses to these disturbances can be described through physical phenomena which are the very same heat, light, air, water, sound transfers, and structural properties expected to be managed in the building envelope.

3.2.1 Physical Phenomena and Features

Physical phenomena can be expressed through functions, physical processes, and features (see Table 4). For instance, the wool of some animals prevents them from losing heat with low conduction. This is due to the composition of matter, keratin, and its arrangement, as it traps air which has low conductivity compared to most

solids. This phenomenon can then be described under the structure: HEAT (retain) > Conduction > Composition and arrangement of matter.

The list of features given in Table 4 is not comprehensive, as living organisms have developed extensive behavioral, physiological, or morphological [84] adaptation strategies. They are the essence of the multiple functionalities found in nature. As they are categorized similarly as an architect or engineer would describe the envelope properties, this depiction of physical phenomena should assist the design of bioinspired systems.

3.2.2 Stimuli

The description of biological models is not complete without determining the elements that influence and interact with them. These elements are part of their direct surrounding environment and can be dissociated into two main categories: biotic and abiotic factors, listed in Table 5 for biological skins and animal constructions.

The abiotic factors [85] are non-living elements of the environment that affect living organisms. As the ambient temperature can affect the indoor conditions of a building, it also affects the comfort conditions of living species. Rain, wind, solar radiation are all factors that living organisms need to comply with.

The biotic factors [86], complementary to abiotic factors, are the living elements affecting living organisms. For instance, behavior mechanisms or metabolism are biotic factors affecting the species' internal conditions. A mechanical behavior from the organism such as the pilomotor reflex, commonly called goosebumps, makes hair raise and traps air for a thin layer of insulation when some mammals are cold. This mechanism has a direct impact on the species, as well as on the indoor condition of a volume, as the occupant provides heat, air, water gains into the air (see Fig. 2). Inter and intraspecies relationships, e.g., mating or predation, are also considered biotic factors as they unbalance living systems.

3.2.3 Synthesis

The resulting characterization is aimed at being elaborated into a functional structure that fits the architect and engineer ideation language, structuration, and process. The characterization is schematized in Fig. 4 and consists of a systemic approach, determining for each case the following elements:

– **A system** (biological skin or animal construction) **and its sub-systems**: these are either layers of the biological skins (such as the "skin" or base coupled with an appendage as described in Sect. 2.2.1), parts of the organism envelopes (wing vs. thorax for *Lepidoptera*), or partitions of the animal constructions. For the latter, in the same way that humans compartmentalize buildings, some animal constructions are dissociated into partitions providing food production, waste

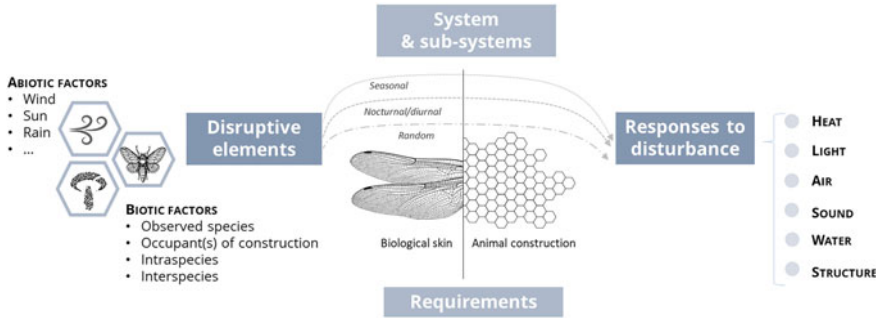


Fig. 4 Schematic representation of a system of animal architecture: disruptive elements and functioning predictions

disposal, or storage. Note that chambers ("incubation area", "inner construction", "room") were spaces described predominantly in the literature, mainly for parturition, brood, and juvenile growth implying very specific temperature ranges requirements.

– **Requirements for the system**: they correspond to the biological needs of the living organisms (needs in water, internal temperature, etc.), to the indoor comfort conditions for animal constructions with ranges that meet the biological needs of the construction users, or to the sociological needs of the species (interactions, e.g., communication or reproduction).
– **Stimuli** as abiotic and biotic factors impacting the internal conditions of the system. Biotic factors are more numerous for animal constructions, as it adds up with the biotic factors of the structure occupants.
– **Responses to the stimuli** to stay in or return to optimal conditions for survival: these responses can be described using processes, and most importantly features (Sect. 3.2.1), which are key to understanding the underlying functioning of the system. Note that it is common that multiple phenomena take place at the same time or co-operate at different levels: hence, their features and corresponding spatial scales must be thoroughly described. Likewise, disturbances and responses operate at different time scales: random stimuli might not trigger the same mechanisms than expected disturbances, such as daily or seasonal events.

The description of time and spatial scales for the various physical phenomena and their linked features provides a multidimensional vision of the analyzed system. Although not easy to grasp, this complexity is what brings emergence to the whole. Inspiration from biological models can happen at different levels or scales, and it is up to the designers to choose what is relevant for their own purposes.

4 Take-Aways from Animal Constructions

For a better understanding of the proposed characterization, the next section illustrates an example of the characterization process through the prairie dog burrows. Applied to the entire sample (list in Table 2), several main take-aways have been identified regarding multi-functionality of building envelopes as well as construction modes. Those are worth addressing as guidelines or as research areas to further explore toward more efficient, responsible, and durable buildings and will be briefly described in the following.

4.1 Example of Characterization: The Prairie Dog Burrows

Prairie dogs, from the Genus *Cynomys* of the squirrel Family (*Sciuridae*), are mammals from the *Rodentia* Order. They are so-called *prairie dogs* because of their habitat—open vegetation with herbs and grasses mainly—and their alarm calls when they see danger, which are similar to the barking of a dog. This endothermic species mainly lives in North America under two subgroups recognized by mammologists, black-tailed & white-tailed, and they co-habit in groups in burrows (photograph of a burrow entrance in Fig. 5). While some of them are believed to hibernate continuously during winter, others would facultatively enter torpor during winter, spring, and summer [87]. The Black-tailed prairie dogs, for instance, rather choose winter rest over hibernation, i.e., they will have a rest interrupted by numerous awakenings, with moderate but not drastic hypothermia.

Although some areas they live in can get as warm as 38 °C in the summer and as cold as—37 °C in the winter [88], they do not rely on hibernation to survive winter, but depend on their burrows for protection from the weather and predators. Hence, the characterization of the prairie dog burrows might bring relevant insights on how to ensure thermal comfort and sufficient air renewal using elaborate tunnels.

Following our established characterization process, various elements were investigated in literature documents (note that the information provided here is not comprehensive):

Systems and **sub-systems**. The burrows are dug straight down in soil by the prairie dogs. They are made of openings, circulation areas, rooms, and an envelope, i.e., the ground in which there are dug. The openings are several entrances, "back doors", and plugged emergency exits in case of intrusion. The entrances are mound shaped, to be a lookout and to redirect water during heavy rain. The rooms serve diverse functions: chambers for the offspring and adults, rooms for feces, or for storing food.

Comfort requirements. The prairie dogs require an internal temperature of around 36 °C. Their body temperature can decrease down to 10 °C during deep torpor episodes [87]. They mostly eat vegetation from the prairies they live in and hydrate through the moist of the eaten food, i.e., they do not specifically drink

Table 2 Selection of building species ($n = 50$)

Animal class	Animal order	Family, genus, or species (Scientific or common names)
Actinopterygii (Ray-finned fishes)	*Gobiiformes*	*Periophthalmodon schlosseri (*Mudskipper)
Arachnida (Arachnids)	*Araneae*	*Argyroneta aquatica* (Water spider), *Micrathena gracilis* (Orb-weaver)
Insecta (Insects)	*Blattodea*	*Allomerus decemarticulatus*, *Amiterme meridionalis* (Compass termite), *Cubitermes*, *Macrotermes natalensis*, *Macrotermes subhyalinus*, *Noditermes lamanianus*, *Odontotermes transraalensis*, *Procubitermes*, *Thoracotermes macrothorax*
	Hymenoptera	*Vespidae*, *Formica rufa* (Red wood ant), *Harpegnathos saltator* (Indian jumping ant), *Iridomyrmex* (Rainbow ant), *Brachymyrmex* (Rover ant), *Leguminivora glycinivorella, Macrotermitinae, Vespa orientalis* (Oriental hornet), *Zeta abdominale*
	Lepidoptera	*Eriogaster lanestris* (Small Eggar), *Gynaephora groenlandica* (Arctic woolly bear moth), *Tinea pellionella* (Case-bearing clothes moth)
Aves (Birds)	N/a	*[1]Early breeding bird species in Europe
	Apodiformes	*Swiftlet birds, *Calypte anna* (Anna hummingbird), *Glaucis aeneus* (Bronzy hermit)
	Passeriformes	*Ploceus philippinus* (Baya weaver), *Spermestes bicolor* (Black-and-white manakin), *Campylorhynchus brunneicapillus* (Cactus wren), *Petrochelidon pyrrhonota* (Cliff swallow), *Delichon urbicum* (House martin), *Picathartes gymnocephalus* (White-necked rockfowl), *Turdus merula* (Common blackbird), *Furnarius rufus* (Red ovenbird), *Aegithalos caudatus* (Long-tailed tit), *Philetairus socius* (Sociable weaver), *Ploceus cucullatus* (Village weaver)
	Procellariiformes	*Thalassarche melanophrys* (Black-browed Albatross), *Thalassarche chrysostoma* (Gray-headed Albatross)
	Charadriiformes	*Himantopus mexicanus* (Black-necked Stilt)
	Bucerotiformes	*Ocyceros birostris* (Gray hornbill)
	Galliformes	*Leipoa ocellata* (Mallee fowl)
	Columbiformes	*Treron vernans* (Pink-necked green-pigeon)
Mammalia (Mammals)	*Primates*	*Pan* (Chimpanzee)
	Rodentia	*Cynomys* (Prairie dog), *Burrowing mammals

(continued)

Table 2 (continued)

Animal class	Animal order	Family, genus, or species (Scientific or common names)
Polychaeta (Bristle worms)	*Terebellida*	*Pectinaria koreni*

[1]The asterisk * stands for unspecified families in the literature

Table 3 List of bioinspired tools for helping abstraction

References	Bioinspired tools	Principle
Chakrabarti and Sarkar [71]	SAPPhIRE (State change, action, part, phenomenon, input, oRgan and effect model)	Structural and functional description of biological and technical systems Based on FSB (Function, Behavior, Structure) [72]
Vattam et al. [73]	DANE (Design analogy to nature engine) interactive tool	Functional representation: box diagrams linked together by behavioral causal explanations Based on FBS [72]
Rosa et al. [21]	Uno-BID	Hybridization of SaPPhIRE [71] and DANE [73]
Goel et al. [74]	Ontology of biomimetics	Functions Referring to the TRIZ method [75]
Yim and Wilson [76]	Ontology for bioinspired design	Use of bioinspired designs Physical architectures, behavior, function, strategy
Chayaamor-Heil et al. [70], BiomimArchD—UMR MAP 3495 [77]	Ontology of BiomimArchD	Ontology focusing on building energy
Nagel et al. [78]	BioM (Biological modeling)	Functional representation of biological systems Models with different levels of granularity Using engineering-to-biology thesaurus [79]
Helms and Goel [80]	Four-box method	Description of a model of biological and technical systems: operational environment, functions, specifications, and performance criteria

Table 4 Regulation factors, principles, and features

Phenomena	Processes	Features
Heat (Gain, retain, transmit, prevent)	Conduction, convection, radiation, metabolic rate, electromagnetism, phase change	Macro-geometry Surface states Composition of matter Arrangement of matter Movement Surface-to-volume ratio Fluid properties Property of mechanical wave […]
Light (Absorb, reflect, transmit, diffuse)	Transmission, reflection, absorption, refraction	
Sound (Absorb, transmit, dissipate)	Transmission, absorption, reflection	
Water (Conserve, filter, gain, loose)	Diffusion, gravitational action, capillarity, sorption, absorption, condensation	
Air (Move, retain)	Pressure difference, induced flow, air renewal, convection	
Structure (Balance, integrity, comfort)	Absorption, transmission	

Adapted from Badarnah and Kadri [23], Cruz [24]

Table 5 Abiotic and biotic factors, identified as disruptive elements

Abiotic factors (environmental conditions)	Biotic factors		
	Interspecies	Intraspecies	Individual
	Behavior	Behavior	Behavior
Wind Sun radiation Environment radiation Precipitation Relative humidity Medium tectonic Mechanical load Flooding Electromagnetic radiation Material	Competition Predation Symbiosis Mutualism Commensalism	Competition Predation Reproduction Resources Space Cooperation Cohabitation Mating Brood/juvenile protection	Feeding Resting Mating Hibernation Thermoregulation Metabolism Metabolic rate Hibernation Thermoregulation

Fig. 5 Prairie dogs above and in front of their burrow entrance. *Credit* Pixabay, Licence CC0

water. They are diurnal species but are more active in the morning and evenings during hot summer days. Their burrows are meant for rest, protection from cold or hot weather, and are located next to vegetation for food supply.

Social requirements. They are social animals. They live in families or colonies with a range of up to 68 individuals per hectare for some species [89]. They breed once a year, and the litter of 2 to 8 pups requires a lot of attention as they are born blind and without fur. They are kept hidden in low chambers until they are strong enough to venture out. In addition to abiotic protection to meet their comfort requirements, the burrows require protection from predation, either by behavioral mechanisms from the prairie dogs, or using structural adaptation in the burrows, such as partition walls or narrowing the tunnels.

Disruptive elements are listed in Table 6 and are categorized into abiotic and biotic factors.

Table 7 shows examples of some relevant **physical responses** from the burrows and their occupants. To ensure thermal comfort for themselves and their offspring, prairie dogs demonstrate several behavioral adaptations: snuggling to keep warm, using vegetal fibers in chambers as insulation material, storingage feces for heat production through organic decay, but also choosing their resting rooms for optimum temperature according to the altitude. Those are strategies that aim at benefiting from the environment when physiological responses alone might not have been enough.

The distribution of the strategies between all parts of the systems also helps understand what features are to be described: the shape of the tunnels, the porosity of the envelope, the added materials into the chambers, etc. To mimic the general thermoregulation strategies of the prairie dogs, one would have to consider a combination of heterogeneous heat sources and their spatial distribution. For the inspiration of one feature only, the use of inputs, spatial and time scales should help grasp the elements at stake: for instance, adapting the altitude for optimum temperature involves multiple phenomena: air convection from bottom to top of burrow varying

Table 6 List of potential disruptive elements and inputs

Abiotic factors	Biotic factors		
	Interspecies	Intraspecies	Individual
	Behavior	Behavior	Behavior
• Sun radiation, wind, heat energy from soil, precipitation, relative humidity, air • Mechanical loads, medium tectonic	• Predation (hawks, eagles, snakes) • Matter (vegetal: seeds, fibers, straws, rotten roots) • Other species (soil) • Cohabitation (squirrels)	• Cooperation (resources, nursing, snuggling, detecting threats) • Cohabitation (other families) • Brood/juvenile • Mating	• Lifespan (5–8 years) • Feeding (vegetarian) • Detecting predators • Maintaining burrow • Mating (once a year)
			• Metabolism
			• Metabolic rate • Hibernation, winter rest, torpor

Table 7 Example of strategies characterized following the approach described in Sect. 3.2

Disruptive elements (inputs)	Response	Phenomena and Processes	Features	Temporalities	
Heat (thermal regulation)					
Dormitories					
Air temperature rairie dogs (intraspecies)	Specific number of individuals in one room Snuggling [89]	Heat (gain)	Convection	Macro-arrangement Ratio of number of users per volume	Diurnal
Air temperature Prairie dogs Thermal energy from the soil	Adaptation of altitude for optimum temperature [90]	Heat (gain)	Conduction Convection	Spatial variation in the thermoregulatory benefits	Diurnal and seasonal
Dormitories and other rooms					
Vegetal matter Feces	Decay of matter for heat increase (up to 5 °C) [91]	Heat (gain)	Metabolic rate conduction	Organic decay (micro scale) fibrous material	Diurnal
Air (renewal)					
Tunnels and entrances					
Wind Indoor and outdoor air	Ventilation in the tunnels with the pressure difference between entrances [89, 92]	Air (move)	Pressure difference	Tunnels (15 cm of diameters, Rim crater (1 m-1, 5 m)	Diurnal
Water (protection from flood)					
Bottom					
Precipitations Prairie dogs	Protection from flooding with draining tunnels at bottom of burrow [93]	Water (transport)	Gravitational action	2–5 m width, 30–100 m long	Random

(continued)

Table 7 (continued)

Disruptive elements (inputs)	Response	Phenomena and Processes	Features	Temporalities	
Structure (physical integrity)					
All parts					
Prairie dogs	Continuous repair of cracks [94]	Physical integrity	Physical equilibrium	Macro sealing	Diurnal

with daily temperatures, conduction from the soil toward the burrow internal surface, and input geothermal energy, with seasonal variations.

Morphological features can also be mentioned on another scale. For maintenance, prairie dogs regularly repair cracks they find on the inner surface of their burrows, along with creating new tunnels and closing others. Structurally, their know-how on the integrity and hold of soil would benefit to research and experimentation on materials little used today, such as mud bricks, but which were once very common.

The air renewal of prairie dog burrows depends on ingenuity in the construction of burrows. Relying on chimney effect, the burrow entrances are built at different altitudes. With a slight air movement, the air is engulfed in the lower entrance then pulled out through the higher opening which has lower pressure. A concept of façade was found in the literature based on this principle to minimize cooling needs and urban heat island effect [95]. Also inspired by the Voronoi-like growth of Barnacles (from Group *Crustacea*), it combines a ventilated air gap with Voronoi pattern-shaped opening vents. To implement the principle found in prairie dog burrows, they combined it with a feature based on another biological model.

4.2 Toward Multi-functional Envelopes

Multiple properties for heat, air, water, and structure were identified in our analysis of animal constructions. Table 8 lists a couple of them and proposes their potential technical analogies for the building envelopes. These transpositions are commonly already applied in the building field but could be improved by exploring how biological species implement them with little resources and in a sustainable way. The authors do not propose practical solutions here but point out some features of interest for designers, architects, and engineers which emerged from our research.

Note that few features related to light management (daylight comfort management) were found in the literature for our sample—and when it was, it was mostly as optical features resulting in thermal properties—none was reported for sound regulation. However, it would seem feasible that species pay attention to acoustics in regards to predation and the danger of being loud. We can only assume that constructions are not only insulated for thermal properties but also to prevent noisy litters from

Table 8 Envelopes features, classified by animal classes and regulation factors

	Features found in animal constructions and their occupants	Example of transposition to human building envelopes
HEAT (Thermoregulation)		
Mammals *Birds* *Insects*	• Insulation with collected vegetal fibers [51, 89, 96] • Use of smaller leaves for higher insulation [51] • Brewing the soil for nest heat regulation [97] • Feathers added as a layer on envelope [50, 60] • Use of turf at bottom of habitat [56] • Multi-layering with silk to retain heat [98] • Use of electric charge in silk cap to heat up [98]	• Use of on-site vegetal resources • High insulation properties with dense material • Warmer envelope by enhancing conduction with an external source • Use of air-trapping material • Localized insulation reinforcement with on-site mineral material • Reduce heat loss with reflective material and convection • Integrate thermoelectric properties in the envelope
Air (Air renewal)		
Birds	• Air renewal from the environment by brewing the soil [97] • Air exchange ensured through clay envelope • Entrance enlarged when the breed is old enough	• Air renewal by extraction of air contained in the ground • Use of porous mineral material for breathing envelope • Adaptation to air renewal needs with modular openings
Water (Watertightness, relative humidity)		
Mammals *Birds* *Insects*	• Dome for rain protection at the entrance of burrow [96] • Interlocked forest-edge plant on envelope [50] • Rain protection with feathers or cuticula (Chitin /protein-based materials) [56] • Redirect drops of rain using thin needles [56] • Constant vapor flow through the envelope by homeostasis	• Water redirection for entrances on top (troglodyte or semi-buried habitats) • Use of dense fine-branching material to ease dry out • Use of hydrophobic material to redirect water (redirection, collection, or watertightness) • Water redirection with needle-shaped and water drop scaled material • Use of pressure gradient to control vapor flows
Structure (Physical integrity, mechanical resistance)		
Mammals *Birds & insects*	• Counterweight to keep the habitat leveled [60] • Saliva used as a material cement and joint [99] • Vegetal fibbers added to mud and or on-site chitin growth using fungi [100]	• Counterbalance compensators in seismic regions • Study of secretion composition as natural cement • Structure rigidity from the combination between mud (mineral) and vegetal or commensalism with fungi

being spotted by potential threats. The use of soft materials, such as vegetal fibers, or collected secreted materials as feathers or hairs, might bring acoustic absorption that was not interpreted as such in our readings.

Among the strategies we identified in living species, many are related to thermoregulation, the most common being the collection and use of local materials, i.e., vegetal, mineral, or secreted organic materials. As they are air-trapping materials, feathers appear to be the best insulators, compared to plant materials [101]. Localized insulation can also be used by species such as the *Formica rufa* ants forming a crown of poles reinforced with peat and turf in their half-buried nest made of twigs [56]. The Malle-fowl (*Leipoa ocellata*) bird has found a more active way to gain heat; when incubating their eggs in a large nest mound, they scratch the soil on or off their nest to keep optimal temperature by retrieving heat from plants they have buried [97]. This method relies on the same principle described for prairie dogs (see Sect. 4.1) using metabolic heat from plant decay and does not require an ingenuous structure to operate.

Bird nests envelopes can also manage functional air renewal need using a relevant choice of porous materials such as clay or by modifying the construction to adapt it to the new air renewal needs. The red ovenbird, (*Furnarius rufus*) for instance, is able to remodel the entry of its mud-clay nest without it collapsing when the offspring are of the age of leaving the nest. For watertightness, species are able to combine materials into watertight linings; for instance, the *Harpegnathos saltator ants* [56] can cover the internal envelopes of their galleries with a mixture made of plants, insect cuticles, and cocoons. The *Formica rufa* ants will cover their nest with needles to have the water run away from the structure [56].

Several strategies were found regarding the management of structural loads on the animal construction: secretion of saliva as only construction material [99], on-site growth material using fungi [100], counterbalance of a hanging structure with mud pellets [60], and specific selection of material for stiffness [51]. The latter is rather complex as the builder, the chimpanzee, builds basketweaves from twigs and branches [102] platforms on very specific trees; they would have small distances between branches, allowing a higher number of interlocking during the weaving, providing better integrity [51]. Chimpanzees would also select trees with repelling properties against mosquitoes, implying a pathogen avoidance strategy. The *Allomerus decemarticulatus* ants co-operate with spores living on the plant *Hirtella physophora*; the fungus possesses the enzymes necessary for the digestion of chitin, and rapidly grows on the plant, feeding on the remains of insects. As such, it produces filaments penetrating and binding together the tube, solid enough to be a trap device for the ants [100].

Other commensalism strategies in animal constructions such as the *Macrotermitinae* termites growing fungus for nutrients [56] were found in the literature. It highlights potential additional characterization elements to be integrated into our database which is rather focused on efficiency: food culture, pathogen avoidance, commensalism such as symbiosis, are approaches that might be in the future in the front line of the requirements for closed spaces with the recent sanitary crisis of the Covid19.

4.3 The Construction of Animal-Built Structures

The proposed characterization has revealed some morphological features provided by the used materials or macro-geometry of the constructions. They indicate specific site selection, orientation, choice of materials, and constructive modes.

4.3.1 Site Selection and Orientation

Successful nests, in terms of reproductivity, were found to be related to the choice of a safe nesting regarding predators [103], proper exposition to environmental factors [47], and available resources such as food or construction materials.

To minimize predation threats, animals might build their nest at places difficult to reach, such as high locations from the ground [51, 99], crevices on cliffs [104], on spiny cacti [50], or underground [105]. Others demonstrate more aggressive strategies such as positioning thorny leaf stems and jagged trunks at entrances of construction to discourage intruders and predators [51] or making associations with other species, more threatening to predators [106]. In opposition, constructions are also camouflaged, using surrounding materials such as lichen on trees [50], or just adaptively located in "safer" locations where predators or parasites even if it sometimes implies lower thermoregulatory benefits [103].

Despite this trade-off between optimal microclimates site for their offspring and predation abundance, animals chose their construction site orientation for best exposition to wind, precipitations, and solar radiation. For instance, "magnetic" *Amitermes meridionalis* termite mounds obtain a uniform temperature with a south orientation [107]. Likewise, the south orientation of webs benefits best to the *Micrathena gracilis* spider thermoregulation in shaded sites, while west orientation is better for opened sites [47]. An inappropriate choice of orientation can be very detrimental in regards to wind, as it could for instance end up with the fall of all eggs contained in the weaverbird nest because of a slight draught [108].

4.3.2 Material and Processes

Animals have to take advantage of the materials they can find in their surroundings. They have to be maneuverable by the builder during the design process for construction purposes; appendages of arthropods allow them to manipulate vegetal or mineral and claws of mammals help them dig burrows. However, it is not always possible to deduce the nest shapes with anatomical specializations. An example used in [54] shows that birds with very similar beaks might build distinct nests and conversely, differentiation is due to feeding habits.

The choice of material depends on several factors. Despite a careful selection of a site for nesting, trade-offs can be made because of predation (see Sect. 4.3.1) and the natural resources available are not always precisely optimal for the intended

construction. The animals might trade materials because of competitions, or choose materials by opportunism, randomly finding particular materials. As an example, with the increase in human activities, incorporation of debris in bird nests has been observed. Songbirds have for example used fibers from cigarette butts as lining; if it reduces the ectoparasite load, it is also genotoxic for the species [109]. Rather than collecting local resources, some species even develop their own building materials that are required to be specific for the intended structure: with silk for precise shape, with saliva for cement, joint or assembling materials, with integuments (such as hairs and feathers for thermal insulation, or cuticle for watertightness), etc.

The four main construction methods observed in the literature are sewing, secreting, excavating, assembling, or a combination of them. Assembling materials, whether they were collected or secreted by animals requires fastening methods; without using adhesive, species were found to use the Velcro method, stitches, entanglement [60], and weaving [47], the latter one described as the most complex fasten behavior, though common with some birds and arthropods.

Table 9 lists some processes used by a selection of species and a transposition of the resulting properties toward generic technological topics applicable to the building: drying out of materials and mechanical resistance, reinforcement with load addition of materials or weaving techniques, etc.

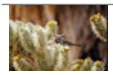
It also includes species relying on commensalism from living organisms other than plants, i.e., fungi for structural properties. This use is already explored in building applications such as self-repair concrete using bacteria [110] but could benefit from the inspiration of the *Allomerus decemarticulatus* ants.

As for the synthesis proposed in Sect. 4.1, this overview points out criteria that could be added to the characterization. First, the time needed for the construction could be an indicator of the complexity of the building process: for instance, swiftlet birds and *Vespidae* wasps can build dry structures made of secretion and secretion mashed with vegetal fibers with well-managed drying times. Also, temporality on the construction phases throughout the entire existence of the constructions might bring insights into our own renovation and densification strategies. The nests of sociable weavers end up forming a massing nest which actually provides better insulation than individual nests [111]. It gradually extends and is rebuilt with new material after any severe damage that could be caused by the weather or attacks of predators [112]. However, this gradual extension of the nest eventually reaches the limits of the tree to which it is attached.

4.4 Discussion

The information provided in this take-aways section is all qualitative. Our readings in the literature have shown that studies on more than one parameter among heat, air, daylight, sound, water, and structures are scarce, and not always adapted to our characterization. Using rodents as an example [113], explains that the microclimate of burrows lacks long-term temperature measurements and that they should

Table 9 Examples of construction processes and morphologies

Illustration	Species Used materials	Process Morphology features	Transposition to technology
1	**Black-and-white manakin** ***Plant****: Forest-edge plants*	***Weaved*** Open cup Dense interlocked panicles	Quick dry out and protective dense structure
2	**Chimpanzee** ***Plant:*** *Ironwood sticks, thick foliage*	***Weaved*** Open cup-shaped Crisscross pattern, small internodes Smaller/denser leaf distribution	Force stress decrease on pressure points
–	**Bronzy hermit** ***Plant****: Rootlets, moss, liverwort*	***Weaved*** Cone-shaped Attached on a branch beneath living leaves	Quick dry out after precipitation by loose open walls
1	**Sociable weaver** ***Plant****: Dried grass straw, twigs*	***Assembled*** Non-woven, thatch-like Huge communal nest made of several nests and materials Attached on tree	Variation of specific materials in superstructure
1	**Red wood ant** ***Plant****: Twigs, spruce needles* ***Mineral****: Soil, mud*	***Assembled & excavated*** Mud and twigs used instead of needles on the lower part of the nest	Load resistance reinforcement
3	**Swiftlet birds** ***Secretion****: Saliva, feathers*	***Secreted*** Half-bowl shape Adhesion to rock	Cement for material assembly or joint to rock-alike structures
3	**Water spider** ***Secretion****: Silk*	***Secreted and weaved*** Bowl web. Pattern Hierarchical arrangement of fibbers	Mechanical stress resistance
–	***Allomerus decemarticulatus*** ***Plant****: Hirtella host shrub* ***Fungi****: Spores* ***Other****: Nectar, preys*	***Weaved*** Tube-trap with a multitude of ant-sized holes Surfaces coated with fungi which grow with the remains of insects	Structural rigidity from openings using living fungi
 3	**Cactus wren** ***Plant****: Twigs, grass* ***Secretion****: Feathers*	***Assembled*** Build-in cacti Prolate spheroidal, inside nest lining with feathers	Heat retainer with feathers and dense structure

Credits [1] CC BY 2.0 license, Rui Ornelas, Gailhampshire, Festive Coquette, [2] CC BY-ND 2.0 Richard Toller, [3] Public domain

be performed with occupied nests. Indeed, many studies are either done on the body temperature or the burrow climatic conditions when they are empty, hence their data do not reflect real conditions.

The characterization of biological skins shows that finding information on the species itself is not an easy task either [24]; the amount of data is increasing every year with biology and biomimetic research and it is scattered in many research fields. We can conclude that there is a need for an access to structured, detailed information on both biological skins and animal constructions, that can be exploited for its integration in such a characterization.

5 Integration into a Design Process for the Building Envelope

The use of the characterization in the frame of a design process for building envelope designs can be considered following two approaches described in the literature. The first one, "technology-pull", starts from a technological problem and tries to solve it by learning from biological organisms. Quite logically, it is commonly used in the industrial area as it is more suited to provide solutions to existing problems. The second one, "biology push", consists in relying on discovery or established knowledge of a biological model for innovation. Both approaches are explored through multiple design processes, many of them being destined to the world of engineering and industry [74, 114–116].

In building design practice, the limit between technology-pull and biology push approaches is not so defined as the designers make iterations during the design process, between finding inspiring biology strategies and defining new functional requirements for the expected design [13]. When initiating the project, our approach was more technology-pull oriented, as living envelopes were selected by analogies with existing requirements and expectations regarding both the building envelope and the indoor conditions. However, the resulting characterization can be handled in both approaches, depending on whether designers are targeting one or several specific managing functions for the building envelope, or simply want to explore biological models for fresh new ideas. The framework described in the next section is suitable for the two approaches.

5.1 Technology-Pull Framework

The characterization was integrated into a full design process, with the final aim of the proposition and assessment of a multi-functional building envelope system. The idea was to confront the characterization of bioinspired practices and generate feedback

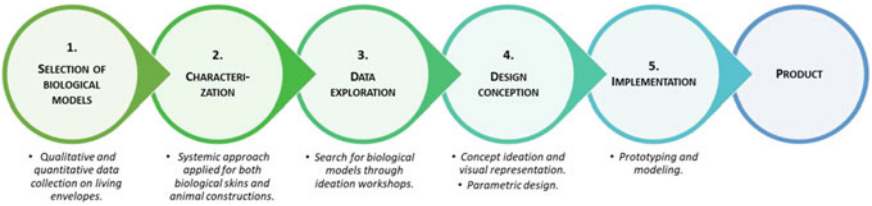


Fig. 6 Proposition of a design process using living envelopes as models

from professionals and actors in designing buildings, and from the assessment of the resulting designs. The design process is illustrated in Fig. 6 and includes five main steps.

Steps 1 and 2 were described in the previous sections. They consist in choosing biological models that could inspire technical solutions for the building envelope as a preliminary work of data exploration. As explained in 1. Living envelopes, the biological models were limited to living envelopes and chosen for their diversity regarding their taxa, their functionalities, and also the availability of data in the scientific literature. They were then characterized using building-oriented criteria as described in 2. An engineer/architecture-oriented characterization. The abstraction models that emerged from this characterization were stored in a database available to designers for Step 3.

The data exploration was performed during Step 3 by engineers, architects, and designers. They were asked during workshops to rely on the provided database to propose concepts of envelopes managing at least several functions for the envelope or indoor comforts of their choice. Ideas that emerged from this step were then further investigated through technical and feasibility considerations, and parametric design. The final step consisted in implementing at least one design, by the assessment of a prototype using measurements and modeling.

An adaptive bioinspired envelope, managing heat, air, and light transfers toward the building and inspired by the wings of the Morpho butterfly, emerged from this framework. The concept was prototyped and is currently being assessed (Step 4 of the process). The following section presents the process of Steps 3–5 that led to this design.

5.2 A First Case Study: The Morpho Butterfly

The Morpho butterfly is an insect from the *Lepidoptera* Order (Fig. 7a). The *Morpho* term stands for the Genus which includes a variety of subspecies [117]. Found in tropical forests of Central America and South America, they are known for their intense blue color, yet they contain no blue pigment. The reason is structural; at a nano-scale, light beams hit overlapping rows of scales, themselves forming ridges, and creating

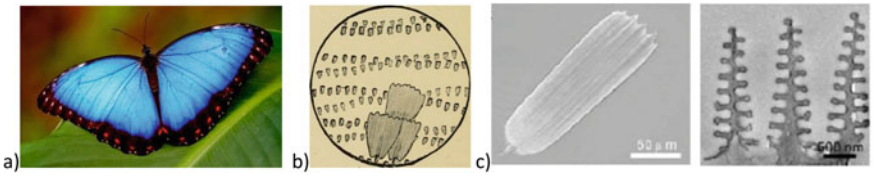


Fig. 7 **a** Morpho species photography, Credit: Pixabay Licence. **b** Drawing of the overlapping scales [118]. **c** Optical images of a butterfly wing scale and a transverse section of the scale showing ridges with lamella structures. *Credit* Adapted from He et al. [119], Licence CC BY-NC 3.0

constructive interferences (Figs. 7b and 7c). Specific wavelengths corresponding to the blue color are reflected, while others are canceled out.

As mentioned in Sect. 2.2.1, they were chosen to be characterized as they are part of one of the ten envelopes categorized by [24], i.e., a combination of cuticles and scales. They also live in temperate to tropical climates, meaning they probably have developed strategies and functions to survive warm external conditions. Finally, although insects are under-represented in the scientific publications (see Sect. 2.4 Taxonomic bias), morpho has recently attracted the spotlight of media [120–122] and research, hence data was more easily available in the literature than other insects from the same type of envelope.

5.2.1 Our Characterization

The anatomy of the morpho follows the anatomy of *Lepidoptera* from the phylum arthropods: it includes the head, with feeding organs and many sense organs, the thorax on which are attached the legs and the wings, and the abdomen. Our readings mostly focused on the wings as it is probably their colors that sparked people's curiosity about this species in the first place.

As performed for the prairie dog, a list of requirements, stimuli, and responses was first established. The resulting characterization is shown in Table 10.

5.2.2 Data Exploration During Workshops

This characterization was then introduced in a workshop, gathering different profiles: architects, engineers, and architect-engineers. The participants received a 2 h training on bioinspiration and were shown existing technological designs in architecture so they would be more familiarized with bioinspired processes. They were then given the database resulting from the characterization and asked to propose envelopes concepts inspired from one to several species skins, or animal constructions.

The database was provided as datasheets including general information on the species and the phenomena processes generated by various stimuli. Figure 8 illustrates the datasheet provided for the morpho species. Decision-support tools, e.g.,

Table 10 Characterization parameters applied to the wings of the morpho butterfly

Stimuli	Response	Phenomena and processes	Features	Temporalities	
Heat (thermal regulation)					
Wings (up and bottom)					
Daylight beam Sky Environment Morpho (behavior)	Orientation of wings for long-wave radiation toward the sky or near environment [123]	Heat (gain)	Radiation	Different matter arrangement and composition (pigments) between up and bottom sides	Diurnal
Air temperature Sun radiation Environment	Higher emission in near-infrared when overheating [35]	Heat (dissipate)	Radiation	Matter arrangement & matter composition (multi-scale organization)	Diurnal
Wings and thorax					
Air Metabolic heat from flight Morpho (behavior)	Wings shuffling for forced convection on thorax [123]	Heat (gain)	Convection	Movement of wings, macro scale	Random
Water (water repellent)					
Wings (up and bottom)					
Precipitation Water from environment	Self-cleaning surface [124]	Water (loose)	Gravitational action	Surface texture, matter arrangement and composition, hydrophobia from nano-structuration [125]	Random
Light (visual effect)					
Wings (up)					
Daylight beam	Structural blue color for iridescence with air/chitin [126]	Light (reflect)	Reflection	Surface structure	Surface structure
Structure (physical integrity)					
Wings (up and bottom)					
Morpho envelope	Flexible and ductal material, multi-structuration [127]	Physical integrity	–	Chitin-made [128]	Diurnal

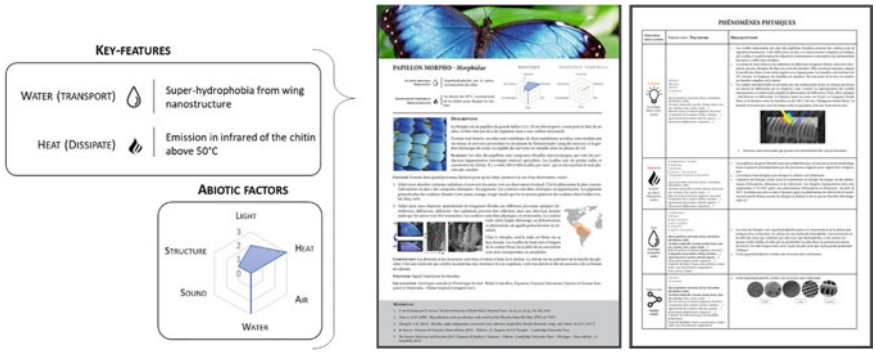


Fig. 8 Datasheet given to participants including graphs, texts, and tables. The left part is a zoom-in of the datasheet

illustrations, key features were included to help designers explore the characterized models and sort them according to their preferences. Among them, radar charts suggested by [24] indicated the phenomena involved in the skin functioning: for a scale from 0 to 3, it specifies low to the high contribution of the system or subsystem in managing heat, air, light, sound, water, and structural properties. This way, designers willing to consider specific factors for the building (e.g., water and air) can easily identify biological models to explore in priority.

5.2.3 Design Conception

After one week apart, we gathered with the workshop participants and brainstormed the emerged ideas of building envelope concepts.

- The emerged concepts had various operating spatial scales. For instance, proposing the rotation of human hands-sized or morpho wings-sized elements is considered a macro-operating scale. On the other hand, proposing the integration of an envelope element with emissive properties from its nano-structuration implies a nano-operating scale. The differentiation of these scales permitted the designers to understand what technical means would be required for the implementation of their ideas, and as such to link them with existing technical solutions (rotating systems, coatings, nano engraving, etc.).
- Then, these operating scales were confronted with the scales of the initial features they were inspired from. By doing so, it helped investigate other degrees of contextualization of the biological models, and so to think of new bioinspired ideas. As an example, a possible concept based on the Morpho is a building envelope with similar adaptability of its emissive properties. Obtaining these properties on a man-made element could imply reproducing the exact nano-structuration found on the wing scales, and therefore using advanced technologies such as nano 3D printing. This "low" abstraction level, although based on a thorough understanding

of the morphological features of the wings, could be transposed into alternative technological solutions less gray energy-consuming in their design and more low-tech if explored at different scales; for instance, manually alternating envelope elements whose emissive properties are different.

In parallel to the morpho, the same investigation occurred on concepts from other biological models. One of them caught our attention as it is inspired by the chameleon and proposes a deformable skin to manage daylight and heat transfers toward the building. As mentioned in Sect. 2.2.1, camouflage, display, and probable thermoregulation mechanisms in the chameleon are to change color: to do so, it turns into an excited state which makes the crystalline network contained in one dermis looser (see Fig. 9). The result is a change of interaction with light beams, reflecting the red color instead of the blue. Mixed with yellow pigment, the chameleon either appears in green or orange tones.

This feature of crystalline-network expansion affects the light flow hence the thermal properties were added to the final concept. As hybridization of two models, the resulting concept from the workshop combines the following principles: rotating elements to adapt to transient thermal conditions (macro), a smart-coating on these elements for similar adaptation (micro or nano), deformable and openable mesh (meso to macro), partial control on these adaptabilities given to the occupants of the building (macro). The smart-coating and rotating elements were both chosen to experience diverse scales of operations and means of implementation. The principle is represented in Fig. 10.

Merged into one principle, the concept is a deformable mesh of small opaque elements bonded by an elastic mesh. By stretching the mesh toward one side or the other of the surface envelope, the elements are pulled apart. It lets light and air go through these newly created apertures modifying the overall behavior of the envelope to external weather conditions (sun, air, rain, etc.).

The unitary elements are made of two layers; a base and a rotating flap (respectively gray and blue hexagons in Fig. 10). When the elements are pulled away from each other by the deformation, each of them initiates individual rotation of the flaps.

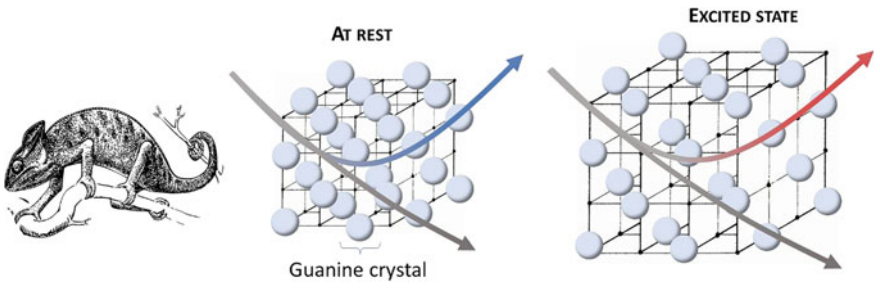


Fig. 9 Representation of the Chameleon crystalline network at rest and in an excited state. On the left network, all colors are absorbed except for the blue which is reflected due to interactions. On the right network, crystals are pulled apart, absorbing all colors except for the red

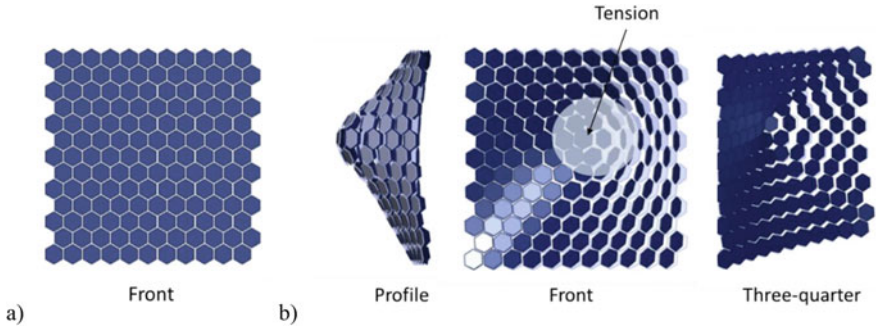


Fig. 10 Building envelope concept bioinspired on the morpho wing features and the chameleon: Flat (**a**) and deformed (**b**)

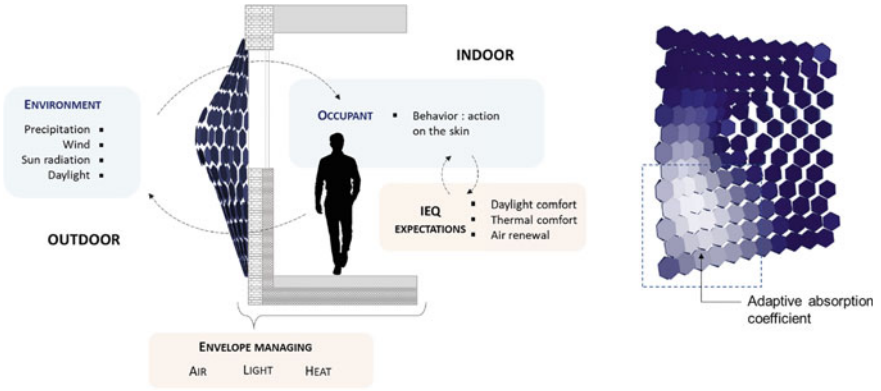


Fig. 11 (Left) Integration of the bioinspired concept into a building and (right) adaptive absorption coefficient represented by color change

It generates shadows on the surface and new orientations for the flaps. Additional functionality is achieved through a coating on the external surface of the unitary elements, i.e., on top of the flaps, that provides an auto-reactive behavior. Expected managed functions and impacts on the occupant comfort are schematized in Fig. 11.

5.2.4 Implementation

After parametric studies to determine shapes, sizes, and configurations of various elements of the design, we prototyped a flat but deployable version of the concept called Stegos. Manufactured to be modular, it was designed as an assembly of hexagonal aluminum pieces and 3D-printed material for the rotation systems.

The auto-reactivity of the Stegos, a feature inspired by the adaptive emissive properties of the butterfly, was technologically translated using a thermochromic

paint, i.e., whose color changes at a temperature threshold of 45 °C. From color blue to white, the coating absorptivity naturally decreases in the visible spectrum (40% average decrease between 400 and 700 nm). Since this wavelength range accounts for almost 40% of the total solar spectrum energy [129], such a change on a thermochromic-coated material should have a significant impact on its solar thermal absorption. Therefore, when exposed to constant solar radiation, the expected behavior of a coated sample is a slowdown in the increase of temperature around the threshold temperature (Fig. 12).

Measurements of heat and light transfers through the test-box envelope were performed on the prototype and confronted to simulations. A gray-box approach is currently ongoing, meaning that partial theoretical models are coupled with data from performed measurements to obtain a fully descriptive model of the phenomena taking place in the Stegos. It should help determine parameters such as the solar intakes.

A deformable version of the Stegos concept is planned to be prototyped and tested as well in a near future in terms of heat, light, and air transfers. A version with a rain-collector system added on the flaps combined with an evaporative-cooling system, maybe using porous material for the hexagonal bases, is also considered. A follow-up of these designs will be a generic methodology for the characterization of dynamic envelope elements such as the Stegos, based on calibration of a model against measurements on similar protocols. It will be applied to the new version of the Stegos allowing to validate an overall model, characterize the performance, and as such propose more efficient alternative designs.

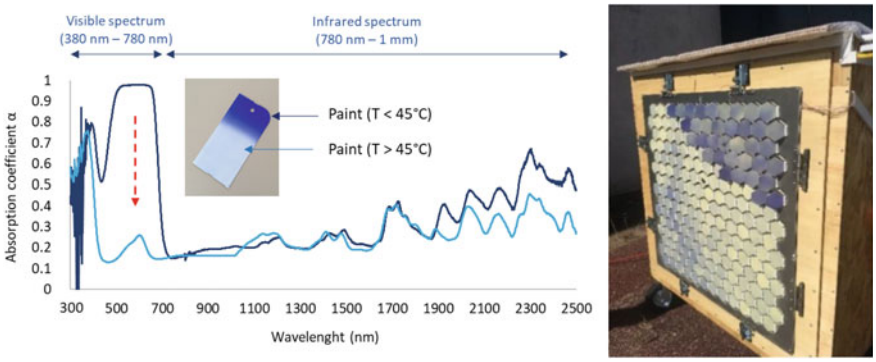


Fig. 12 (Left) Absorption coefficient of paint, measured at temperatures below and above 45 °C. (Right) Final prototype integrated into a test box. The difference of colors on the hexagons is due to differences in flaps orientations hence temperatures

5.3 Feedbacks and Analysis for This Framework

As mentioned in this chapter, it is uncommon to observe several factors managed by bioinspired designs apart from heat and daylight combination. Therefore, addressing several regulation factors was a key approach for the authors during the design process. The principle of the Stegos emerged from a workshop that had no specifications for the building envelope, and which provided illustrated datasheets as a support tool. Other workshops with new formats were organized afterward in order to evaluate the biases and benefits caused by the way the characterization was handed over to participants. The new participants were provided the following:

1. a characterization of our sample structured in a table, with a keyword search and a taxonomy based on the 6 managed functions by the envelope as support;
2. both the datasheets and the table, gathering all information.

If the first method seems more functional and is consistent with the current research conducted on ontologies and tools to help abstraction (see Sect. 3.1 Existing tools for abstractions), it appeared less ergonomic and illustrative for participating architects, who stated they preferred to rely on datasheets. However, engineer profiles reported finding the database useful though not illustrated enough as some biology terms were too technical. Hence, the main challenge in the use of the database relies on the sorting of the biological species, not on their understanding and abstraction.

Emerged concepts from these workshops, in particular those based on the characterization of animal constructions, will not be discussed in this chapter. However, they might be transposed in the near future into technological solutions for the building envelope, as done for the Stegos, which will permit us to bring new insights and improvement in our characterization.

From the emerged concept and the ongoing modeling and prototyping of the Stegos, we can also conclude that the characterization performed on the selected species and built structures by animals helped build a bridge between biology and architecture/engineer fields, and facilitated the proposals of simple to complex multiscale bioinspired concepts.

6 Conclusion and Future Work

This research aims at facilitating the design of efficient and durable building envelopes, inspired by features found in Nature. Because we identified the challenges of bioinspired design processes mostly in the abstraction and transposition phases, we chose to focus on the description and structuration of biological features in a way that would help designers ideate multi-functional and transposable concepts.

Our field of biological study is based on an existing work on biological skins and was enriched with animal-built structures. We intended to propose a characterization framework based on a systemic approach. For this, it includes several criteria

that the authors consider necessary to comprehend multi-functional features in living organisms: systems and sub-systems, their respective requirements for optimal conditions, stimuli, and responses. This characterization was illustrated in detail through the prairie dog burrows and put forward key guidelines and strategies from animal constructions that could be relevant for sustainable buildings.

In parallel, we developed a framework in order to experiment bioinspired design process and assess all its steps. This framework integrates the characterization as a functional database to explore for ideation. Workshops with mixed profiles (architects, engineers) led to several multi-functional principles, including one inspired by the wings of the Morpho butterfly. To assess the concept and improve the first design corresponding to the current version, measurements on a prototype and modeling are ongoing.

The proposed biological characterization helped combine multiple features into one main concept. The chosen criteria eased the transposition of the described features into one solution. Indeed, they suggested designers frugal to complex implementation solutions for their concepts. For instance, behavioral mechanisms described in the characterization inspired designers to assign to the building users some control over the envelope adaptability. A combination between the wings 'orientation and their nano-structuration also pointed to the use of both deployable low-tech systems and thermochromic paint. It resulted in a new principle of auto-shading elements coupled with adaptive properties of absorption. Though not yet entirely implemented or assessed, the prototyped concept is an innovative solution for the building envelope, which goes against the paradigm of a static and solid envelope.

Future work includes a new iteration of the workshops, and emerged concepts based on animal constructions will be driven to implementation, as it was done for the Stegos. Feedbacks from participants will help us work on the format of the database to provide a more user-friendly and versatile medium. Finally, new criteria for the characterization will be integrated (pathogen avoidance, construction time), as they were put forth throughout our analysis and appear relevant in the frame of sustainability and resilient building designs.

References

1. Capra F (2016) The systems view of life, Reprint edn. Cambridge University Press, Cambridge
2. Mason KA, Losos JB, Singer SR, Raven PH (2017) Biology, 11th edn. McGraw-Hill Education, New York, NY
3. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B (2021) Climate change 2021: the physical science basis. In: Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC
4. Open Data Platform. https://data.footprintnetwork.org/#/. Accessed 29 Nov 2021
5. Herzog T, Krippner R, Lang W (2017) Facade construction manual. DETAIL

6. Wang S, Yang Z, Gong G et al (2016) Icephobicity of Penguins *Spheniscus Humboldti* and an artificial Replica of Penguin feather with air-infused Hierarchical rough structures. J Phys Chem C 120:15923–15929. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b12298
7. Ricard P, Le biomimétisme, s'inspirer de la nature pour innover durablement, p 138
8. Knippers J, Nickel KG, Speck T (2016) Biomimetic research for architecture and building construction. Springer International Publishing, Cham
9. Gruber P, Gosztonyi S (2010) Skin in architecture: towards bioinspired facades. Pisa, Italy, pp 503–513
10. López M, Rubio R, Martín S, Croxford B (2017) How plants inspire façades. From plants to architecture: biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. Renew Sustain Energy Rev 67:692–703. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018
11. Kuru A, Oldfield P, Bonser S, Fiorito F (2019) Biomimetic adaptive building skins: energy and environmental regulation in buildings. Energy Build 205:109544. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109544
12. Strain D (2011) 8.7 Million: a new estimate for all the complex species on earth. Science 333:1083–1083. https://doi.org/10.1126/science.333.6046.1083
13. Cruz E, Hubert T, Chancoco G, et al (2021) Design processes and multi-regulation of biomimetic building skins: a comparative analysis. Energy Build 246:111034. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111034
14. Graeff E, Maranzana N, Aoussat A (2018) Role of biologists in biomimetic design processes: preliminary results, pp 1149–1160
15. Graeff E, Maranzana N, Aoussat A (2019) Biomimetics, where are the biologists? J Eng Des 30:289–310. https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1642462
16. Wanieck K, Fayemi P-E, Maranzana N, et al (2017) Biomimetics and its tools. Bioinspired Biomimetic Nanobiomater 6:53–66. https://doi.org/10.1680/jbibn.16.00010
17. Fayemi P-E, Innovation par la conception bio-inspirée: proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances, p 247
18. Hirtz J, Stone RB, McAdams DA et al (2002) A functional basis for engineering design: reconciling and evolving previous efforts. Res Eng Des 13:65–82. https://doi.org/10.1007/s00163-001-0008-3
19. Kozaki K, Mizoguchi R, An ontology explorer for biomimetics database, p 4
20. McInerney S, Khakipoor B, Garner A, et al (2018) E2BMO: facilitating user interaction with a biomimetic ontology via semantic translation and interface design. Designs 2:53. https://doi.org/10.3390/designs2040053
21. Rosa F, Cascini G, Baldussu A (2015) UNO-BID: unified ontology for causal-function modeling in biologically inspired design. Int J Des Creat Innov 3:177–210. https://doi.org/10.1080/21650349.2014.941941
22. Deldin J-M, Schuknecht M (2014) The asknature database: enabling solutions in biomimetic design. In: Goel AK, McAdams DA, Stone RB (eds) Biologically inspired design. Springer, London, pp 17–27
23. Badarnah L, Kadri U (2015) A methodology for the generation of biomimetic design concepts. Archit Sci Rev 58:120–133. https://doi.org/10.1080/00038628.2014.922458
24. Cruz E (2020) Multi-criteria characterization of biological interfaces: towards the development of biomimetic building envelopes. MNHN-CEEBIOS
25. Kuru A, Oldfield P, Bonser S, Fiorito F (2020) a framework to achieve multifunctionality in biomimetic adaptive building skins, p 28
26. López M, Rubio R, Martín S, et al, Adaptive architectural envelopes for temperature, humidity, carbon dioxide and light control, p 12
27. Nicolas F, Vaye M (1977) Recherches sur les enveloppes bioclimatiques
28. ADEME (2010) Histoire de la recherche sur l'enveloppe du bâtiment
29. Papadopoulos AM (2016) Forty years of regulations on the thermal performance of the building envelope in Europe: achievements, perspectives and challenges. Energy Build 127:942–952. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.051
30. Esau K (1977) Anatomy of seed plants, 2nd edn. Wiley, New York

31. The Jacques Rougerie Fondation. https://www.fondation-jacques-rougerie.com/homepage. Accessed 30 Nov 2021
32. Hufty A (2001) Introduction à la climatologie: le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine. Presses de l'Université Laval; De Boeck université, Saint-Nicolas, Québec: [Paris]
33. Teyssier J, Saenko SV, van der Marel D, Milinkovitch MC (2015) Photonic crystals cause active colour change in chameleons. Nat Commun 6:6368. https://doi.org/10.1038/ncomms7368
34. Shi NN, Tsai C-C, Camino F, et al, Keeping cool: enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants, p 5
35. Berthier S (2005) Thermoregulation and spectral selectivity of the tropical butterfly Prepona meander: a remarkable example of temperature auto-regulation. Appl Phys A 80:1397–1400. https://doi.org/10.1007/s00339-004-3185-x
36. Tsai C-C, Shi N, Pelaez J, et al (2017) Butterflies regulate wing temperatures using radiative cooling. In: Conference on lasers and electro-optics. Optical Society of America, p FTh3H.6
37. Vuarin P, Dammhahn M, Kappeler PM, Henry P-Y (2015) When to initiate torpor use? Food availability times the transition to winter phenotype in a tropical heterotherm. Oecologia 179:43–53. https://doi.org/10.1007/s00442-015-3328-0
38. Génin F, Nibbelink M, Galand M et al (2003) Brown fat and nonshivering thermogenesis in the gray mouse lemur (*Microcebus murinus*). Am J Physiol-Regul Integr Compar Physiol 284:R811–R818. https://doi.org/10.1152/ajpregu.00525.2002
39. Machin J (1968) The permeability of the epiphragm of terrestrial snails to water vapor. Biol Bull 134:87–95. https://doi.org/10.2307/1539969
40. Prior DJ (1985) Water-regulatory behaviour in terrestrial gastropods. Biol Rev 60:403–424. https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1985.tb00423.x
41. Raman AP, Anoma MA, Zhu L et al (2014) Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. Nature 515:540–544. https://doi.org/10.1038/nature13883
42. Luo C, Narayanaswamy A, Chen G, Joannopoulos JD (2004) Thermal radiation from photonic crystals: a direct calculation. Phys Rev Lett 93:213905. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.213905
43. Un papillon solaire | CNRS Images. https://images.cnrs.fr/video/4869. Accessed 1 Dec 2021
44. Heilman BD, Miaoulis Ioannis N (1994) Insect thin films as solar collectors. Appl Opt 33:6642–6647. https://doi.org/10.1364/AO.33.006642
45. Lou S, Guo X, Fan T, Zhang D (2012) Butterflies: inspiration for solar cells and sunlight water-splitting catalysts. Energy Environ Sci 5:9195. https://doi.org/10.1039/c2ee03595b
46. Didari A, Mengüç MP (2018) A biomimicry design for nanoscale radiative cooling applications inspired by Morpho didius butterfly. Sci Rep 8:16891. https://doi.org/10.1038/s41598-018-35082-3
47. Hansell MH (2005) Animal architecture. Oxford University Press, Oxford, New York
48. Davie O (1889) Nests and eggs of North American birds. Introd. by J. Parker Norris. Illus. by Theodore Jasper and W. Otto Emerson. Hann & Adair, Columbus [O.]
49. Abbott CC, Blanchard E, Conger PS, Duncan PM (1870) The transformations (or metamorphoses) of insects (Insecta, Myriapoda, Arachnida, and Crustacea): being an adaptation, for English readers, of M. Émile Blanchard's "Metamorphoses, moeurs et instincts des insects;" and a compilation from the works of Newport, Charles Darwin, Spence Bate, Fritz Müll by P. Martin Duncan. Claxton, Remsen, and Haffelfinger, Philadelphia
50. Collias NE, Collias EC (2016) Nest building and bird behavior. Princeton University Press Two Rivers Distribution [Distributor, Princeton; Jackson]
51. Samson DR, Hunt KD (2014) Chimpanzees preferentially select sleeping platform construction tree species with biomechanical properties that yield stable, firm, but compliant nests. PLoS ONE 9:e95361. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095361
52. Moroka N, Beck RF, Pieper RD (1982) Impact of burrowing activity of the Bannertail Kangaroo Rat on Southern New Mexico Desert Rangelands. J Range Manag 35:707. https://doi.org/10.2307/3898244

53. Frank CL (1988) The effects of moldiness level on seed selection by dipodomys spectabilis. J Mammal 69:358–362. https://doi.org/10.2307/1381386
54. Hansell M (2009) Built by animals the natural history of animal architecture. Oxford University Press, Nueva York (Estados Unidos)
55. Gould JL, Gould CG (2007) Animal architects: building and the evolution of intelligence. Basic Books, New York
56. Corbara B (2005) Constructions animales. Delachaux et Niestlé, Paris
57. Rennie J, Bliss E, Wood JG, et al (1830) Insect architecture. Lilly & Wait
58. von Frisch K, von Frisch O (1974) Animal architecture, 1st edn. Harcourt Brace Jovanovich, New York
59. Caras RA (1971) Animal architecture, 1st edn. Westover Pub. Co, Richmond, Va
60. Hansell MH (2000) Bird nests and construction behaviour. Cambridge University Press, Cambridge, New York
61. Troudet J, Grandcolas P, Blin A, et al (2017) Taxonomic bias in biodiversity data and societal preferences. Sci Rep 7:9132. https://doi.org/10.1038/s41598-017-09084-6
62. Bonnet X, Shine R, Lourdais O (2002) Taxonomic chauvinism. Trends Ecol Evol 17:1–3. https://doi.org/10.1016/S0169-5347(01)02381-3
63. Martín-López B, Montes C, Ramírez L, Benayas J (2009) What drives policy decision-making related to species conservation? Biol Conserv 142:1370–1380. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.01.030
64. Allen D (2014) How mechanics shaped the modern world, 1st ed. Springer International Publishing, Imprint, Springer, Cham
65. Mazzoleni I, Maya A, Bang A, et al (2011) Biomimetic envelopes: investigating nature to design buildings. In: Proceedings of the first annual biomimicry in higher education webinar, The Biomimicry Institute Webinar Document, pp 27–32
66. ISO/TC 266 Biomimétique (2015) ISO 18458 2015—Terminologie, concepts et méthodologie
67. Jacobs SR, Nichol EC, Helms ME (2014) "Where Are We Now and Where Are We Going?" The BioM innovation database. J Mech Des 136:111101. https://doi.org/10.1115/1.4028171
68. Donovan MP (1997) SCST: the vocabulary of biology and the problem of semantics: "Dominant," "Recessive," and the puzzling role of alleles. College Science Teaching 026
69. Courtot M, Juty N, Knüpfer C, et al (2011) Controlled vocabularies and semantics in systems biology. Mol Syst Biol 7:543. https://doi.org/10.1038/msb.2011.77
70. Chayaamor-Heil N, Guéna F, Hannachi-Belkadi N (2018) Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils. craup. https://doi.org/10.4000/craup.309
71. Chakrabarti A, Sarkar P, Leelavathamma B, Nataraju BS (2005) A functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas. AIEDAM 19. https://doi.org/10.1017/S0890060405050109
72. Gero JS, Design prototypes: a knowledge representation schema for design, p 11
73. Vattam S, Helms M, Goel AK, Biologically-inspired innovation in engineering design: a cognitive study, p 41
74. Goel AK, McAdams DA, Stone RB (2014) Biologically inspired design: computational methods and tools. Springer, London, New York
75. Vincent JFV, Mann DL (2002) Systematic technology transfer from biology to engineering. Philos Trans R Soc London Ser A 360:159–173. https://doi.org/10.1098/rsta.2001.0923
76. Yim S, Wilson JO, Development of an ontology for bio-inspired design using description logics, p 11
77. BiomimArchD—UMR MAP 3495. http://www.map.cnrs.fr/?portfolio_page=biomimarchd-4. Accessed 2 Dec 2021
78. Nagel JKS, Nagel RL, Stone RB (2011) Abstracting biology for engineering design. IJDE 4:23. https://doi.org/10.1504/IJDE.2011.041407
79. Nagel JKS (2014) A thesaurus for bioinspired engineering design. In: Goel AK, McAdams DA, Stone RB (eds) Biologically inspired design. Springer, London, pp 63–94
80. Helms M, Goel AK (2014) The four-box method: problem formulation and analogy evaluation in biologically inspired design. J Mech Des 136:111106. https://doi.org/10.1115/1.4028172

81. Molina F, Yaguana D (2018) Indoor environmental quality of urban residential buildings in Cuenca—Ecuador: comfort standard. Buildings 8:90. https://doi.org/10.3390/buildings8070090
82. Organisation mondiale de la Santé (1980) Critères d'hygiène de l'environnement 12: LE BRUIT. Genève
83. von Bertalanffy L (2009) General system theory: foundations, development, applications, Rev. ed. paperback print. Braziller, New York, NY, , p 17
84. Badarnah Kadri L (2012) Towards the LIVING envelope: biomimetics for building envelope adaptation. Delft University of Technology
85. Hogan CB (2010) Abiotic factor. In: Encyclopedia of earth
86. Society NG, Society NG Biotic Factors. http://www.nationalgeographic.org/topics/resource-library-biotic-factors/. Accessed 21 Jul 2021
87. Lehmer EM, Savage LT, Antolin MF, Biggins DE (2006) Extreme plasticity in thermoregulatory behaviors of free-ranging black-tailed prairie dogs. Physiol Biochem Zool 79:454–467. https://doi.org/10.1086/502816
88. Chace GE (1976) Wonders of prairie dogs. Dodd, Mead, New York
89. Hoogland JL (1995) The black-tailed prairie dog
90. Lovegrove BG, Knight-Eloff A (1988) Soil and burrow temperatures, and the resource characteristics of the social mole-rat *Cryptomys damarensis* (Bathyergidae) in the Kalahari Desert. J Zool 216:403–416. https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1988.tb02438.x
91. Begall S, Berendes M, Schielke CKM et al (2015) Temperature preferences of African mole-rats (family Bathyergidae). J Therm Biol 53:15–22. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2015.08.003
92. Vogel S, Ellington CP, Kilgore DL (1973) Wind-induced ventilation of the burrow of the prairie-dog, Cynomys ludovicianus. J Comp Physiol 85:1–14. https://doi.org/10.1007/BF00694136
93. Elliott L (1978) Social behavior and foraging ecology of the eastern chipmunk (Tamias striatus) in the Adirondack Mountains
94. Oliver F Exerpts from: "our comic friend the Prairie Dog and the story of Prairie Dog Town, Texas !" https://ci.lubbock.tx.us/storage/images/53jgCSj7PR8BIjAkRutTlTgkJyUNC6znOWQuo5AE.pdf. Accessed 5 Dec 2021
95. Paar MJ, Petutschnigg A (2017) Biomimetic inspired, natural ventilated façade—A conceptual study. FDE 4:131–142. https://doi.org/10.3233/FDE-171645
96. Cooke LA, Swiecki SR, Structure of a white-tailed prairie dog burrow, p 3
97. Weathers WW, Seymour RS, Baudinette RV (1993) Energetics of mound-tending behaviour in the malleefowl, Leipoa ocellata (Megapodiidae). Anim Behav 45:333–341. https://doi.org/10.1006/anbe.1993.1038
98. Ishay J (1973) Thermoregulation by social wasps: behavior and pheromones. Trans N Y Acad Sci 35:447–462. https://doi.org/10.1111/j.2164-0947.1973.tb01518.x
99. Viruhpintu S, Thirakhupt K (2002) Nest-site characteristics of the Edible-nest swiftlet Aerodramus fuciphagus (Thunberg, 1812) at Si-Ha Islands, Phattalung Province, Thailand. Natural
100. Dejean A, Solano PJ, Ayroles J et al (2005) Insect behaviour: arboreal ants build traps to capture prey. Nature 434:973–973. https://doi.org/10.1038/434973a
101. Mainwaring MC, Deeming DC, Jones CI, Hartley IR (2014) Adaptive latitudinal variation in common blackbird *Turdus merula* nest characteristics. Ecol Evol 4:851–861. https://doi.org/10.1002/ece3.952
102. Fruth B, Hohmann G (2010) Ecological and behavioral aspects of nest building in Wild Bonobos (Pan paniscus). Ethology 94:113–126. https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1993.tb00552.x
103. Mainwaring MC, Hartley IR, Lambrechts MM, Deeming DC (2014) The design and function of birds' nests. Ecol Evol 4:3909–3928. https://doi.org/10.1002/ece3.1054
104. Velando A, Márquez JC (2002) Predation risk and nest-site selection in the Inca tern. Can J Zool 80:1117–1123. https://doi.org/10.1139/z02-091

105. Karels TJ, Boonstra R (1999) The impact of predation on burrow use by arctic ground squirrels in the boreal forest. Proc R Soc Lond B 266:2117–2123. https://doi.org/10.1098/rspb.1999.0896
106. Quinn JL, Ueta M (2008) Protective nesting associations in birds: protective nesting associations in birds. Ibis 150:146–167. https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2008.00823.x
107. Grigg GC (1973) Some consequences of the shape and orientation of'magnetic'termite mounds. Aust J Zool 21:231–237
108. Collias NE, Collias EC (1962) An experimental study of the mechanisms of nest building in a weaverbird. Auk 79:568–595. https://doi.org/10.2307/4082640
109. Suárez-Rodríguez M, Montero-Montoya RD, Macías Garcia C (2017) Anthropogenic nest materials may increase breeding costs for urban birds. Front Ecol Evol 5. https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00004
110. Vijay K, Murmu M, Deo SV (2017) Bacteria based self healing concrete—A review. Constr Build Mater 152:1008–1014. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040
111. White FN, Bartholomew GA, Howell TR (2008) The thermal significance of the nest of the sociable weaver philetairus socius: winter observations. Ibis 117:171–179. https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.1975.tb04205.x
112. Maclean GL (1973) The sociable weaver, part 2: nest architecture and social organization. Ostrich 44:191–218. https://doi.org/10.1080/00306525.1973.9639159
113. Burda H, Šumbera R, Begall S (2007) Microclimate in burrows of subterranean rodents—Revisited. In: Begall S, Burda H, Schleich CE (eds) Subterranean rodents. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 21–33
114. Yen J, Helms M, Goel A et al (2014) Adaptive evolution of teaching practices in biologically inspired design. In: Goel AK, McAdams DA, Stone RB (eds) Biologically inspired design. Springer, London, pp 153–199
115. Fu K, Moreno D, Yang M, Wood KL (2014) Bio-inspired design: an overview investigating open questions from the broader field of design-by-analogy. J Mech Des 136:111102. https://doi.org/10.1115/1.4028289
116. Lepora NF, Verschure P, Prescott TJ (2013) The state of the art in biomimetics. Bioinspir Biomim 8:013001. https://doi.org/10.1088/1748-3182/8/1/013001
117. Callaghan CJ (2004) Atlas of neotropical Lepidoptera. Volume 5A: checklist: part 4A: Hesperioidea-Papilionoidea/edited by Gerardo Lamas ; by Curtis J. Callaghan [and others]. Scientific Publishers [for the] Association for Tropical Lepidoptera, Gainesville, Florida
118. Kellogg VL (1904) American insects. Holt and Company
119. He J, Villa N, Luo Z et al (2018) Integrating plasmonic nanostructures with natural photonic architectures in Pd-modified Morpho butterfly wings for sensitive hydrogen gas sensing. RSC Adv 8:32395–32400. https://doi.org/10.1039/C8RA05046E
120. (2015) Butterfly wings & the rise of color. In: Rainforest expeditions. https://www.rainforestexpeditions.com/butterfly-wings-the-rise-of-color/. Accessed 7 Dec 2021
121. What Gives the Morpho Butterfly Its Magnificent Blue? In: KQED. https://www.kqed.org/science/24552/what-gives-the-morpho-butterfly-its-magnificent-blue. Accessed 7 Dec 2021
122. (2014) Morpho butterfly; color without pigments | bionicinspiration.org. http://bionicinspiration.org/282/. Accessed 7 Dec 2021
123. Van Hooijdonk E, Berthier S, Vigneron J-P (2012) Contribution of both the upperside and the underside of the wing on the iridescence in the male butterfly *Troïdes magellanus* (Papilionidae). J Appl Phys 112:074702. https://doi.org/10.1063/1.4755796
124. Bixler GD, Bhushan B (2013) Rice- and butterfly-wing effect inspired self-cleaning and low drag micro/nanopatterned surfaces in water, oil, and air flow. Nanoscale 6:76–96. https://doi.org/10.1039/C3NR04755E
125. Mejdoubi A, Andraud C, Berthier S, et al (2013) Finite element modeling of the radiative properties of *Morpho* butterfly wing scales. Phys Rev E 87:022705. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.87.022705
126. Chapman RF, Simpson SJ, Douglas AE (2012) The insects: structure and function, 5th edn. Cambridge University Press, New York

127. Urry L, Cain M, Wasserman S, et al (2016) Campbell biology, 11th edn. Pearson, New York, NY
128. Niu S, Li B, Mu Z et al (2015) Excellent structure-based multifunction of Morpho butterfly wings: a review. J Bionic Eng 12:170–189. https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60111-6
129. Bhatia SC (2014) Solar radiations. In: Advanced renewable energy systems. Elsevier, pp 32–67

2.2.2.4.2 Points clés de l'article

- **Outils existants** - La représentation fonctionnelle de systèmes est couramment utilisée en ingénierie mais il existe peu d'outils avancés consacré à l'architecture et au bâtiment.
- **Caractérisation** - Une caractérisation basée sur une approche systémique a été proposée pour les construction animales et les enveloppes biologiques. L'échantillon analysé regroupe 50 constructions animales (aux besoins, techniques de construction et morphologies variées) et 10 types de peaux biologiques (selon leurs dermes et appendices).
- **Fonctions du vivant** - Les enveloppes du vivant analysées présentent peu de fonctions liées à la gestion de la lumière ou du son, et sont majoritairement axées sur la thermorégulation, le renouvellement de l'air et les charges structurelles. Peu d'études dans la littérature permettent leur caractérisation multifonctionnelle.
- **Ateliers** - La base de données résultant de la caractérisation et des outils d'aide à la décision (illustrations et outils se rapprochant de moteurs de recherche) a été intégrée à des ateliers d'idéation, regroupant ingénieurs, architectes et concepteurs pour la proposition de concepts d'enveloppes bio-inspirées.
- **Principe bio-inspiré** - Un concept, inspiré du papillon morpho et d'autres principes du vivant, a émergé d'un atelier. Ce concept a été poussé vers un prototype en vue d'une évaluation de ses performances.

2.2.3 Synthèse

Les ateliers menés à l'aide de profils mixtes ont conduit à plusieurs principes multifonctionnels, dont un inspiré des ailes du papillon morpho. Jugé original et stimulant par sa combinaison de principes et par sa composante adaptative, ce dernier a été retenu comme cas d'étude pour être mené vers des étapes avancées de la conception. Les propositions de plusieurs versions technologiques et l'évaluation de l'une d'entre elles par une série de mesures sur bancs d'essai sont décrites dans le chapitre qui suit.

La définition des exigences liées au bâtiment et à son enveloppe a permis d'identifier les enveloppes biologiques et les constructions animales comme un périmètre qui est source d'exemples pertinents de fonctionnalités, adaptés par de nombreux mécanismes d'évolution à des contraintes environnementales délétères. Malgré cette sélection, l'ensemble des organismes retenus reste conséquent. Rappelons qu'une estimation relativement récente dénombre environ 9 millions d'Eucaryotes (Mora et al. 2011). Or, seule une faible fraction en est décrite (respectivement 14 % et 9% pour les animaux terrestres et marins), et est sujette à un biais taxonomique. Comme indiqué dans notre chapitre de (Hubert *et al.*, 2022), les deux échantillons

sélectionnés dans ces travaux ne sont pas représentatifs de la diversité estimée sur Terre. En outre, le concept retenu inspiré du papillon morpho a émergé d'un atelier qui s'est déroulé à un stade chronologique de la thèse où le référencement des constructions animales était encore peu avancé. Les ateliers qui ont suivi (voir l'Annexe B.2) ont, eux, permis la proposition de concept basé sur les constructions animales mais le ratio de choix entre constructions animales et enveloppes biologiques reste faible. Les potentielles raisons sont nombreuses : support utilisé pour la base de données, biais des auteurs dans l'encadrement des ateliers et les conseils donnés, choix inconscient des participants pour des modèles plus charismatiques, etc.

Si la représentativité du vivant est difficile voire impossible à obtenir dans ces travaux, de par les sources utilisées pour la documentation et les biais induits lors des ateliers, elle est un objectif impératif à garder dans les échantillonnages et les études de la biodiversité au sens large. Les espèces rares et peu décrites aujourd'hui jouent parfois un rôle crucial au sein d'écosystèmes et l'existence ancrée de biais taxonomiques représente un frein à la découverte de nouvelles propriétés, et à la proposition de plans de conservation efficaces.

Chapitre 3

Du concept au prototype

Conception d'un élément d'enveloppe bio-inspiré, fabrication et caractérisation expérimentale

Les travaux du Chapitre 2 ont abouti à une base de données biologiques testée comme outil d'abstraction lors de plusieurs ateliers d'idéation avec des concepteurs. Le Chapitre 3 décrit la conception d'un élément d'enveloppe basé sur l'un des concepts émis en atelier, comme cas d'application dans le cadre du développement d'une méthode de conception.

Le concept est dans un premier temps formalisé en membrane déformable, composée d'une multitude de clapets orientables aux propriétés radiatives adaptatives. Les différents moyens mis en œuvre pour sa conception sont ensuite décrits et mènent au prototype d'élément de paroi STEGOS. Sa caractérisation expérimentale à plusieurs échelles, dont une échelle représentative sur une boîte test construite à cet effet, est ensuite détaillée.

L'article « *An Adaptive Building Skin Concept Resulting from a New Bioinspiration Process: Design, Prototyping, and Characterization* » publié dans **Energies** (Hubert *et al.*, 2022), présente la démarche globale employée et une partie des mesures réalisées.

Sommaire

3.1 Du principe bio-inspiré vers le domaine technique ... 121
3.1.1 Description du concept sélectionné comme cas d'application ... **121**
3.1.2 Connaissances existantes relatives à ce concept ... **122**
3.1.3 Possibles transpositions du concept ... **123**
3.1.4 Formalisation ... **124**
3.2 Étapes de conception ... 126
3.2.1 Conception paramétrique ... **126**
3.2.1.1 Choix du motif ... 127
3.2.1.2 Maillage et déformation ... 127
3.2.2 Fabrication des prototypes ... **128**
3.2.2.1 Premières versions ... 129
3.2.2.2 Prototype déployable dit STEGOS ... 130
3.2.2.3 Description de l'élément de paroi actif dit STEGOS ... 130
3.1.4.2 Prototype déformable ... 133
3.3 Caractérisation expérimentale multi-échelle ... 135
3.3.1 Objectifs de la caractérisation ... **135**

3.3.2 Tests en laboratoire 136
3.1.4.3 Echelle clapet 136
3.1.4.4 Echelle façade 137
3.3.3 Tests sur banc d'essai mobile : « boîte test » 138
3.3.3.1 Présentation du dispositif expérimental 138
3.3.3.2 Plan de mesure 139
3.3.3.3 Montage de la façade 143
3.3.3.4 Article – Journal Energies 144
3.3.4 Suite de l'expérimentation 164
3.3.4.1 Revêtement thermochromique 164
3.3.4.2 Modifications réalisées sur le STEGOS 165
3.3.4.3 Modifications réalisées sur la boîte test 166
3.3.4.4 Tableau récapitulatif des données matériaux 168
3.3.4.5 Chronologie et séquences des mesures 168
3.3.4.6 Présentation des mesures 170
3.3.4.7 Analyse comparative pour différentes couleurs et orientations de clapets 175
3.4 Conclusion 179

3.1 Du principe bio-inspiré vers le domaine technique

Trois ateliers d'idéation, basés sur les travaux de caractérisation d'enveloppes biologiques et de constructions animales, ont été organisés avec divers participants, dans l'idée de faire émerger des concepts d'enveloppes du bâtiment bio-inspirées. La description des ateliers, des outils utilisés, des profils des participants, ainsi que de quelques concepts émergents, est proposée en Annexe B.

Les concepts issus du premier atelier sont variés, et pour beaucoup multifonctionnels. Afin d'en sélectionner un et le mener vers une solution plus aboutie et confronter la méthode proposée dans ces travaux, une phase de restitution, d'analyse et d'échanges a été organisée avec un nouveau collectif. Orienté ingénierie et comportant des compétences technologiques et scientifiques, les échanges ont permis de trier les concepts selon divers critères : niveau d'abstraction par rapport aux modèles biologiques sélectionnés, fonctionnalités proposées, faisabilité, originalité comparée à des solutions analogues existantes, etc.

3.1.1 Description du concept sélectionné comme cas d'application

Un des concepts émergents est inspiré d'une hybridation de modèles biologiques : le morpho – lépidoptère de la classe insecte – qui présente des caractéristiques thermiques remarquables au niveau de ses ailes. En effet, le battement des ailes favorise la convection forcée, leur orientation permet un échange radiatif avec l'environnement ou la voûte céleste, et l'émissivité qui change avec la température dans l'environnement chaud de l'Amazonie limite la surchauffe du papillon (Van Hooijdonk, Berthier, et Vigneron 2012). Le caméléon – squamate de la classe reptile – est connu pour ses changements de couleur qui relèvent de la photonique, dus à la déformation d'un réseau cristallin contenu dans son derme (Teyssier et al. 2015). La caractérisation du papillon morpho est détaillée dans le chapitre **Bionics and Sustainable Designs** partie « **Integration into a design process for the building envelope** ». Plus de détails sur le caméléon et son mécanisme photonique sont également donnés dans la partie « **Design conception** » de ce même chapitre.

Le concept proposé est un maillage disposé devant le bâtiment comme une peau, dont la forme dynamique s'adapte aux potentiels besoins. Une tension appliquée sur le maillage par un ou plusieurs points d'accroche, lui permet de « respirer », en s'ouvrant et se refermant à l'air, à la lumière et à la chaleur. Les croquis de la Figure 3.1, réalisés par deux participants lors du premier atelier, illustrent le maillage et sa déformation.

Composé d'un matériau réagissant comme la chitine, i.e., la substance organique qui constitue les ailes du papillon morpho, le maillage émet fortement au-delà d'une certaine température, de façon à protéger les usagers du bâtiment des fortes chaleurs. Il est aussi à la fois souple, résistant, et a des propriétés hydrophobes suggérant la possibilité de contrôler le ruissellement d'eau de pluie.

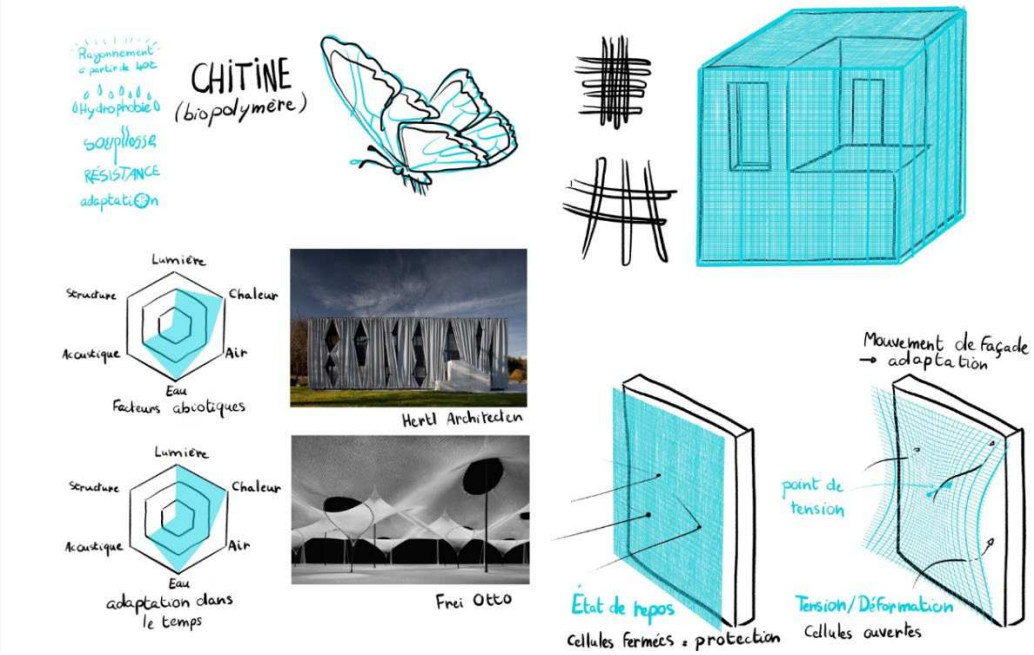


Figure 3.1 - Croquis du concept inspiré du papillon morpho. Crédit : Myriame Ali-Oualla et Kaïs Bhouri.

3.1.2 Connaissances existantes relatives à ce concept

Les cas d'enveloppes déformables selon leur normale ne sont pas nombreux dans la littérature. Les façades cinétiques rétractables, telles que les applications textiles (Singh et Kapoor 2021), sont ce qui s'en rapprochent le plus ; souples, tendues, rigides ou pliables, elles permettent par leur adaptabilité d'apporter une dimension cinétique à l'enveloppe (Barozzi et al. 2016), qui s'exprime bien souvent selon le plan de l'enveloppe. Sur ce principe, l'Institut du monde arabe est composé d'une série de diaphragmes métalliques photosensibles qui s'ouvrent et se ferment latéralement automatiquement pour moduler la lumière du jour et les apports de chaleur solaire à l'intérieur (Meagher 2015) (voir Figure 3.2).

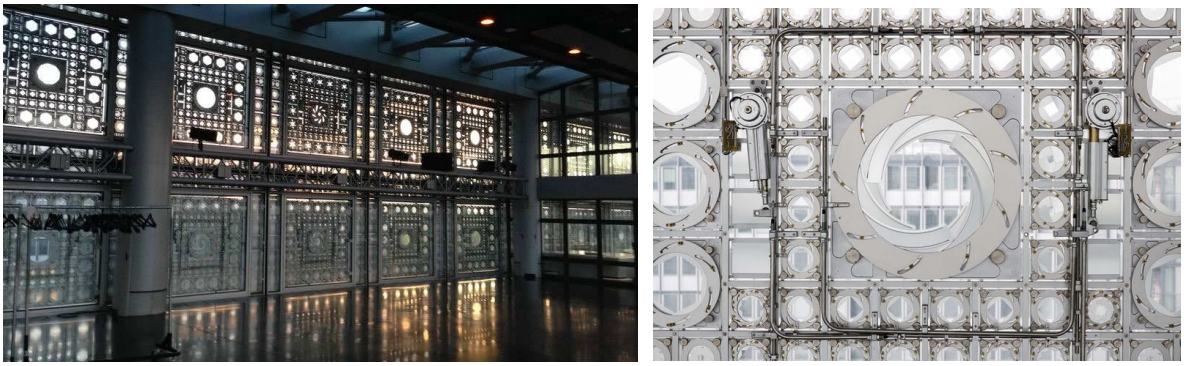


Figure 3.2 - Institut du monde arabe et ses moucharabiehs mobiles (Crédit de gauche à droite : Loïc Durand et © Fabrice Cateloy).

Certains exemples fonctionnent cependant par déformations normales à l'enveloppe : on peut citer les pavillons thématiques à Yoesu (Figure 3.3a) ou Hygroskin, qui proposent des protections adaptatives externes ou intégrées à l'enveloppe en se déformant vers l'extérieur de

l'enveloppe (exemples décrits dans le Chapitre 1), ou encore les façades « origami », basées sur des joints cinétiques et notamment popularisées par l'exemple de la tour Al-Bahar à Abu Dhabi, dont le brise-soleil se plie vers l'intérieur de l'enveloppe (Romano et al. 2018) (voir Figure 3.3b). Ils sont cependant uniques en leur genre, et n'explorent pas la déformation globale de l'enveloppe, uniquement une répétition de déformations locales, exigeant plusieurs actionneurs.

(a) (b)

Figure 3.3 - (a) Institut du monde arabe (Crédit : Loïc Durand), (b) Pavillon thématique à Yoesu (Crédit : Knippers Helbig GmbH), (c) Tour Al-Bahar.

Sur ce constat, ce principe associé à un maillage déformable a été identifié comme novateur. L'originalité de son adaptabilité, pour la gestion de multiples fonctions, a suggéré pour la suite des travaux des contraintes intéressantes à aborder dans le cadre du processus de conception : choix des matériaux, types d'actionneurs, rôle de l'usager dans son fonctionnement, etc. Additionnellement, elle pourrait apporter un atout architectural visuellement démarquant pouvant aider son acceptation par les différentes parties prenantes.

3.1.3 Possibles transpositions du concept

La mise en avant des échelles de fonctionnement du vivant aide à associer à un modèle biologique une potentielle solution technologique. Par exemple, les ailes du morpho ont des propriétés hiérarchiques intrinsèques, offrant une protection thermique adaptative (voir « 5.2 A first case study : The Morpho Butterfly » de Bionics and Sustainable Design). L'analogie avec le monde technologique serait l'utilisation d'un matériau dont la structure à l'échelle nanoscopique est similaire à celle des ailes, sans avoir une vue d'ensemble de l'architecture des ailes et de leurs multiples motifs d'écailles. Cette transposition directe à une technologie nécessiterait très certainement la nano-impression d'un matériau de type chitine. Bien que des polymères de crustacés aient déjà été manipulés dans le cadre de recherches sur l'impression additive, et aient montré des propriétés prometteuses (He et al. 2018), la transposition à l'échelle d'un bâtiment semble plutôt ambitieuse en termes de coût et de consommation d'énergie.

Confronter cette proposition à des solutions à différentes échelles, par exemple en interchangeant manuellement des matériaux aux propriétés émissives différentes, permet d'envisager d'autres degrés de contextualisation des modèles biologiques, et donc

potentiellement d'avoir de nouvelles idées bio-inspirées. Cette comparaison des échelles de fonctionnement entre les principes biologiques et les pistes technologiques est présentée sous forme de « rapport d'échelle » dans le Tableau 3.1, qui propose des éléments de réflexions de transpositions des principes inspirés du morpho à des applications technologiques.

Tableau 3.1 - Transposition des principes à des technologies potentielles. Rapport d'échelle : échelle de fonctionnement du modèle biologique / échelle de fonctionnement de la transposition (nano (n), meso (m), macro (M)).

	Principes vivant vs. bio-inspiré	**Transpositions**	**Rapport d'échelle**
Adaptabilité	**Morpho** Propriétés émissives intrinsèques des écailles des ailes s'adaptant à une plage de température donnée grâce à leur nano-structuration **Principe bio-inspiré** Propriétés émissives d'un maillage pour une adaptation aux températures	Utilisation directe d'un matériau ayant une nano-structuration identique à celle des ailes du morpho	n/n
		Utilisation d'un matériau ayant des propriétés adaptatives	n/n,m
		Parties interchangeables dans le système selon les conditions, ayant des propriétés émissives différentes	n/m
Caractéristiques	**Morpho** Super hydrophobie, souplesse, résistance **Principe bio-inspiré** Peau déformable, bonne durée de vie, résistante, hydrophobe pour récupération de l'eau	Matériaux élastiques	n,m/n,m
		Textiles	n,m/m
		Revêtements hydrophobes	n,m/n
		Maillages avec des tuyaux pour la conduite d'eau	n,m/M
Comportement	**Morpho** Augmentation d'échanges conductifs avant et pendant le vol pour de la thermorégulation **Principe bio-inspiré** Utilisation de la déformation pour créer ou amplifier de la convection ou advection	Utilisation de surfaces mobiles pour la convection	M/m
		Participation des usagers pour le fonctionnement de l'enveloppe (actionneurs)	M/M
	Caméléon Changement de couleur par expansion de son réseau cristallin sous-dermique pour de la thermorégulation **Principe bio-inspiré** Maillage alternant des espaces pleins/vides pour modifier les transferts vers l'intérieur du bâtiment	Surfaces orientables à différents points du maillage pour alternance plein / vide	n/m
		Matières pliable, rétractables, ou déployables	n/m

3.1.4 Formalisation

Considérée comme la proposition qui à la fois respectait la démarche méthodologique et qui présentait le potentiel d'application le plus performant, cette proposition basée sur le morpho et le caméléon est pour la suite exploitée. Les différentes transpositions proposées (extraits dans le Tableau 3.1) ont aidé à la proposition d'un principe formalisé comme un compromis entre

des solutions ambitieuses en termes de technicités et d'autres variantes que l'on peut qualifier de low-tech.

Le concept retenu, présenté en Figure 3.4, est une membrane déformable, reprenant le réseau cristallin du caméléon, composée d'une multitude d'éléments orientables comme les ailes du morpho. Lorsque la membrane est déformée, les éléments sont écartés les uns des autres, créant des ouvertures entre eux. Les éléments eux-mêmes sont déployables à l'aide de clapets rotatifs. Cette rotation est induite soit par la déformation, soit par un dispositif à commande manuelle. Une fonctionnalité supplémentaire est apportée par un revêtement sur les clapets, qui présente des propriétés radiatives dépendant de la température, à l'instar de l'émissivité adaptative des ailes du morpho.

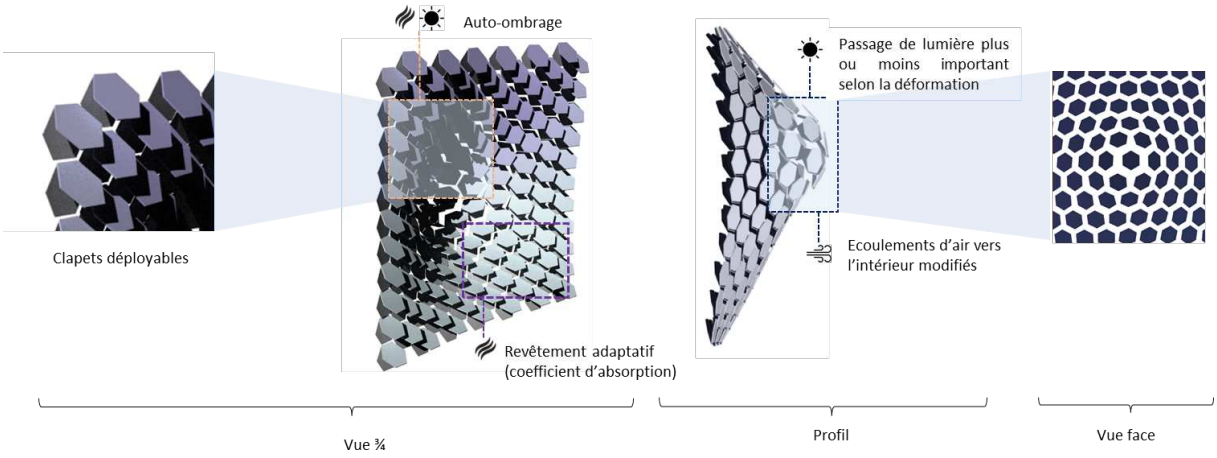


Figure 3.4 - Schéma du concept bio-inspiré formalisé, et description des caractéristiques pour une membrane déformée.

Tableau 3.2 - Lexique ou système sémantique utilisé pour le concept.

Terme	Sens attribué
Membrane	Paroi poreuse ou enveloppe souple interposée entre deux milieux
Maille	Elément constitutif d'un réseau par entrelacement ou division élémentaire
Maillage	Réseau maillé
Motif	Forme solide répétée sur le réseau
Clapet	Elément rotatif connecté à un motif
Déformation	Variation dimensionnelle de la membrane dans une direction autre que son plan
Déploiement	Dépliage d'un motif par rotation d'un clapet
Ouverture	Ecartement d'un clapet par rapport au maillage par sa rotation
Interstice	Espace vide créé par l'écartement des motifs les uns des autres
Point de tension	Point du maillage où une force ou contrainte mécanique est exercée
Cadre	Structure rigide qui entoure la membrane ou qui la soutient en ses mailles

Ce système permet la gestion de trois fonctions selon sa configuration :

> **Chaleur** : le revêtement thermochromique permet de limiter la montée en température, ou une cinétique d'échauffement plus faible. La déformation et/ou le déploiement des clapets génèrent de l'ombrage, aidant également à la thermorégulation.

Lumière : une déformation sans déploiement, comme suggéré par la vue face sur la Figure 3.4, augmente le passage de lumière à travers la membrane. Les modifications géométriques (déformation et déploiement, Tableau 3.2) modifient la surface et l'angle de passage de la lumière et impactent alors l'accès à la lumière de la zone associée.

Air : la déformation de la membrane crée des interstices qui permettent le passage de l'air.

Un tel système peut être envisagé devant une paroi, un vitrage s'il laisse passer assez de lumière, voire même en tant qu'enveloppe intégrale, et pourrait selon les configurations qu'on lui attribue (déformation plus ou moins importante, ouverture de clapets) ainsi protéger le bâtiment de fortes chaleurs. Ces trois cas d'applications sont illustrés en Figure 3.5.

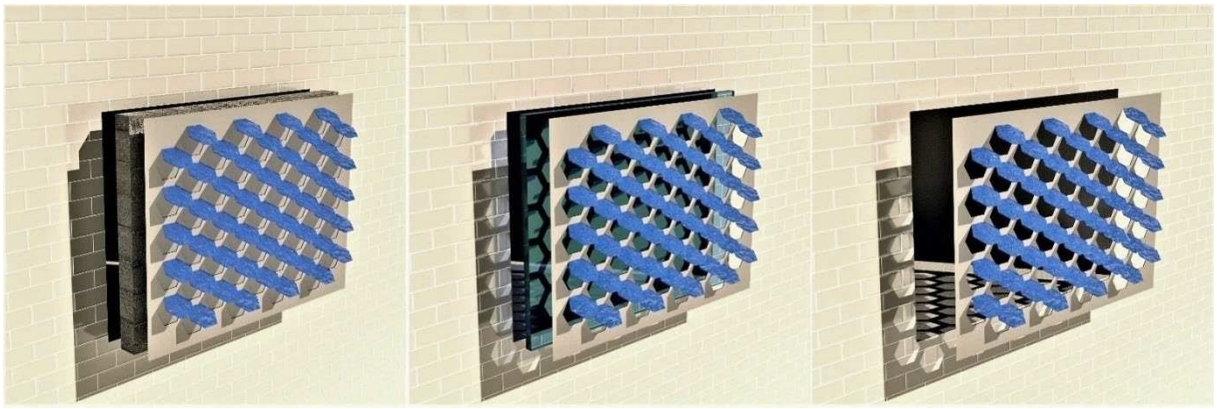


Figure 3.5 - Configurations opaque, devant un vitrage, et en tant qu'enveloppe (de gauche à droite).

3.2 Étapes de conception

Le prototype finalement réalisé (présenté à partir de la partie 3.3) a nécessité l'exploitation de plusieurs moyens de conception : la modélisation géométrique 3D, la capacité de faire varier ses formes par l'utilisation de conception paramétrique mais aussi le recours à des étapes de prototypage pour valider sur des considérations fonctionnelles le choix des matériaux, la cinétique, et l'adéquation avec le concept initial. Ces moyens de conception, l'exploitation qui en a été faite, et les différentes itérations réalisées sont présentés par la suite.

3.2.1 Conception paramétrique

Les paramètres de conception étant multiples, des modèles géométriques ont aidé à la visualisation des versions possibles. Ceux-ci ont permis de faire varier des paramètres liés au maillage (type de tension, force, sens et échelle de déformation) et aux éléments rotatifs appelés clapets et à ce sur quoi ils sont fixés (forme, axe de rotation, taille).

Les outils utilisés pour les modèles géométriques sont le logiciel de CAO Rhinoceros 3D assisté de la programmation visuelle Grasshopper (*Rhino and Grasshopper Developer Documentation*), qui permet de concevoir des pièces paramétriques avec un affichage en temps réel du résultat graphique.

3.2.1.1 Choix du motif

Différentes formes (triangulaire, rectangulaire, hexagonale) et tailles de motifs ont été testées pour constituer le maillage (Figure 3.6a, b). A ceux-ci ont ensuite été ajoutées des clapets, d'axe de rotation et de formes diverses également (Figure 3.6c).

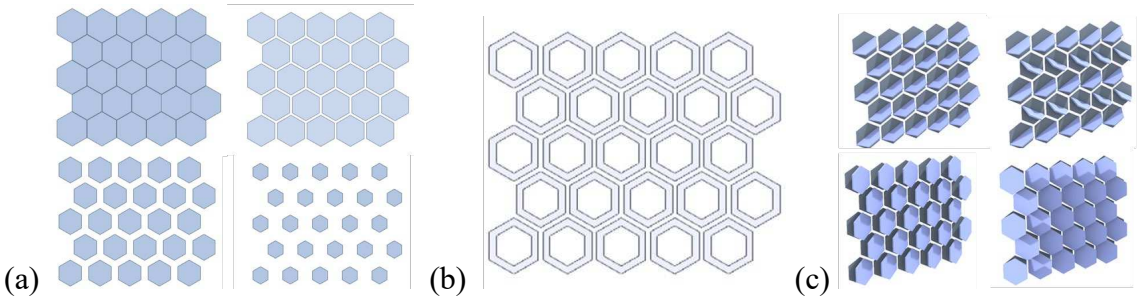


Figure 3.6 - Conception paramétrique réalisée sous Rhinoceros - Grasshopper avec un motif hexagonal : (a) taille des éléments de base (100 % à 50 % de recouvrement), (b) base creuse, (c) variation des axes d'orientation des clapets, entiers ou demi.

Les concepts obtenus ont ainsi pu être comparés à l'aide d'outils comme la projection lumineuse au sol ou l'auto-ombrage pour un rayonnement été-hiver à Bordeaux, ou encore à l'aide de l'outil d'éblouissement Fish-eye du module Ladybug de Grasshopper (Pak, Smith, et Gill 2013), conçu pour des études d'ensoleillement. Ce dernier outil permet par exemple de se rendre compte de l'impact visuel auprès des occupants d'une telle enveloppe dans le cas où elle serait appliquée devant un vitrage (**Figure 3** de l'article *« An Adaptive Building Skin Concept Resulting from a New Bioinspiration Process: Design, Prototyping, and Characterization »* (Hubert *et al.*, 2022).

Notons qu'il aurait été possible d'établir des critères – éblouissement, étude d'ensoleillement sur l'enveloppe ou dans le bâtiment – pour aider à la conception. Cependant, cette exploration paramétrique, réalisée en phase amont de la conception, est restée visuelle et qualitative, de façon à guider dans la conception du prototype.

3.2.1.2 Maillage et déformation

La représentation visuelle de la déformation du maillage a été réalisée avec un module de Grasshopper, Kangaroo Physics (Piker 2013), permettant de faire de la recherche de forme basée sur un équilibre entre plusieurs contraintes mécaniques. Ce module est basé sur la méthode de relaxation dynamique (Lewis 2003), qui fait osciller le système autour d'une position d'équilibre sous l'influence d'un chargement. Il aide ainsi à la modélisation et observation de collision, déformation, voire le pliage d'un origami. Bien que l'outil permette de faire de la recherche de forme ou *form-finding*, en faisant varier l'élasticité des maillages, et les forces appliquées, il n'est pas destiné à de l'analyse structurelle, les paramètres à indiquer ne relevant pas du SI (Système International). Il a cependant servi à visualiser différentes déformations.

Plusieurs images, illustrant la déformation résultante de l'application de contraintes mécaniques sur plusieurs maillages en un ou plusieurs points, sont présentées en Figure 3.7. La déformation a ensuite été couplée à l'ouverture de clapets ; ouverture fonction de la force appliquée, graduelle selon l'écartement de leur base vis-à-vis des bases voisines, ou manuelle. Ceci implique alors que la déformation et le déploiement peuvent être couplés.

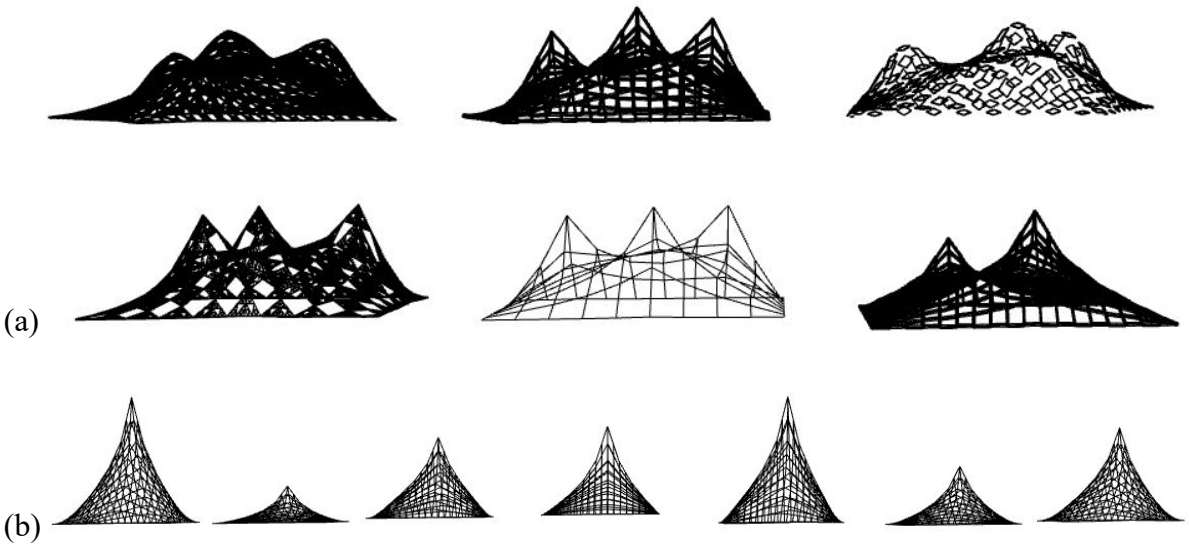


Figure 3.7 - Exploration de la déformation de divers types de maillages. (a) Points d'impacts multiples et multidirectionnels. (b) Variation de la tension appliquée sur un point de tension d'un maillage.

3.2.2 Fabrication des prototypes

L'utilisation de la conception paramétrique a mis en évidence l'importance de la taille des motifs et du rapport plein-vide de cette membrane, qu'elle soit ouverte ou déformée. Outre l'aspect esthétique, si la peau est utilisée devant un vitrage, il semble préférable d'utiliser une multitude de petits éléments, avec un taux plein-vide raisonnablement élevé, pour une bonne acceptabilité de la part des utilisateurs, et ne pas gêner l'accès visuel à l'extérieur. La taille des éléments conditionne également la force de déformation à appliquer sur la membrane, si l'on souhaite apporter une modification notable à ce rapport plein-vide : si les éléments sont grands et pleins (c'est-à-dire non creux comme sur la Figure 3.6b), il faudra une déformation d'autant plus grande pour permettre une ouverture à l'air ou à la lumière.

La taille des éléments conditionne également la force de déformation à appliquer sur la membrane. Si les éléments sont grands et pleins (c'est-à-dire non creux comme sur la Figure 3.6b), il faudra une déformation d'autant plus grande pour permettre une ouverture à l'air ou à la lumière. C'est donc un paramètre à prendre en compte si l'on souhaite apporter une modification notable à ce rapport plein-vide. Ils ont écarté par ailleurs quelques types de déploiement (radial, notamment) pour la complexité attendue d'un point de vue faisabilité technique.

3.2.2.1 Premières versions

Deux versions déformables et déployables ont été fabriquées à l'échelle 500 mm x 500 mm. Dans les deux cas, la membrane est un maillage en caoutchouc et le cadre sur lequel il s'appuie est en acier.

La première réalisation utilise des motifs et un maillage de forme carrée. Le maillage choisi est un caoutchouc d'une dureté de 45 Shore (sh), découpé en quadrillage. Les éléments de base sont composés de deux plaques d'aluminium, vissés en sandwich à chaque intersection du maillage. Les clapets, en aluminium également, sont fixés à chaque élément de base à l'aide d'un adhésif sur une arête, et reliés par des fils aux éléments de bases voisins.

Les essais de déformation à la main (voir Figure 3.8) fournissent une première validation visuelle du principe. Ils mettent aussi en avant des paramètres de conception à améliorer, tels que le poids des modules à diminuer ou la dureté du caoutchouc à augmenter pour une meilleure tenue de l'ensemble à la verticale. La cinétique d'ouverture des clapets est également à améliorer, car leur mouvement, bien que lié à la déformation, est assez libre étant donnée la simple fixation à l'adhésif. Des collisions entre clapets pendant la déformation sont également observés et n'aident pas au déploiement. Des détails et dessins techniques de cette réalisation sont fournis en Annexe C.

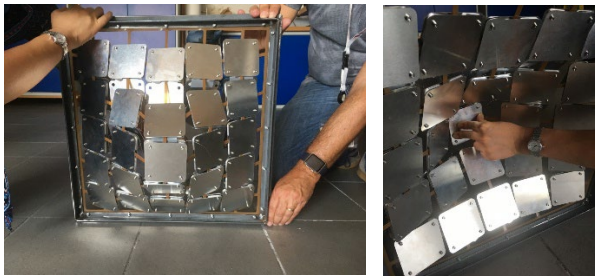
(a) (b) 

Figure 3.8 - (a) Cinétique des clapets, (b) Déformation par pression manuelle sur la base centrale.

Pour éviter ces collisions, une version avec des éléments hexagonaux a été réalisée. Le maillage est un silicone d'une dureté de 60 sh, coupé selon un schéma triangulaire (Figure 3.9a). Les éléments de base ont été fabriqués avec plusieurs matériaux : aluminium, plastique imprimé (de type Acrylonitrile Butadiène Styrène ou « ABS »), ou combinaison des deux pour assurer à la fois légèreté et solidité. Des demis clapets ont été intégrés à l'aide d'un système de rotation intégré aux éléments de base imprimés (Figure 3.9b).

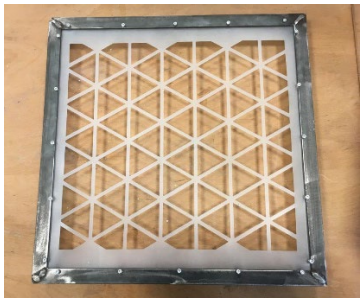
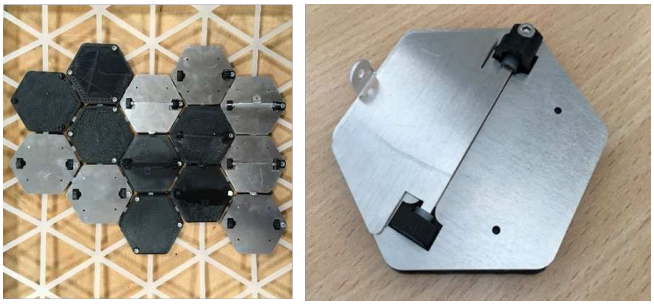
(a)  (b) 

Figure 3.9 - (a) Maillage silicone sur cadre acier, (b) éléments de base en aluminium ou plastique imprimés.

3.2.2.2 Prototype déployable dit STEGOS

Les essais de prototypes menés en amont ont permis de valider la forme hexagonale pour éviter toute collision possible entre clapets lors de mécanismes de déformations ou de déploiements. Ils ont aussi mis en avant le besoin de contrôler la rotation des clapets pour éviter un mouvement dû à la gravité ou aux écoulements d'air.

Pour évaluer séparément la contribution du déploiement et de la déformation, une première version de prototype non déformable mais constituée de clapets pleins orientables manuellement, appelée STEGOS, a été réalisée.

Ce nom est inspiré du nom du stégosaure, dinosaure herbivore de la fin du Jurassique, caractérisé par des plaques osseuses vascularisées, d'une forme pentagonale et disposées en deux rangées le long de son dos (voir Figure 3.10). Celles-ci auraient eu une fonction thermorégulatrice, par vasodilatation et convection forcée avec le vent (Farlow, Hayashi, et Tattersall 2010). En outre, si cela a été contredit ensuite, la communauté scientifique a longtemps pensé que ces plaques étaient mobiles (de Buffrénil, Farlow, et de Ricqlès 1986). Le prototype non déformable a donc naturellement fait penser au stégosaure par ses clapets orientables dont les phénomènes convectifs attendus semblent similaires.

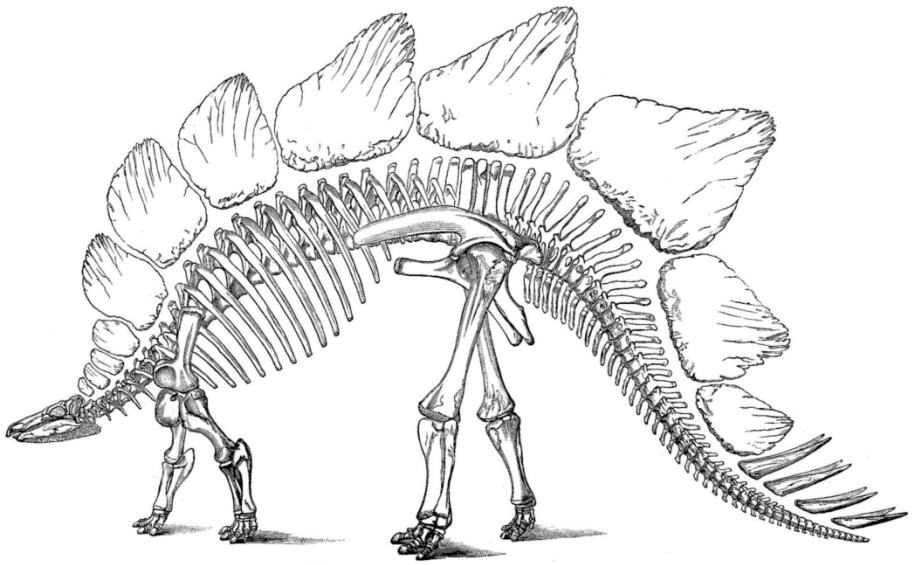


Figure 3.10 - Illustration du *Stegosaurus Ungulatus* de Marsh (1891).

3.2.2.3 Description de l'élément de paroi actif dit STEGOS

Ce prototype a été réalisé avec une plaque d'aluminium de 1 m² d'une épaisseur de 4 mm, servant de cadre structurel au STEGOS. Dans cette plaque ont été découpés des fentes, permettant de fixer les clapets, et des trous hexagonaux afin de laisser passer la lumière et de l'air lors de déploiements.

Les clapets, en aluminium et de forme hexagonale, ont un léger débord sur l'une de leurs arêtes (Figure 3.11a). Ce débord est inséré en force dans des systèmes crantés en ABS, qui se fixent dans les fentes ovales du cadre structurel (Figure 3.11b).

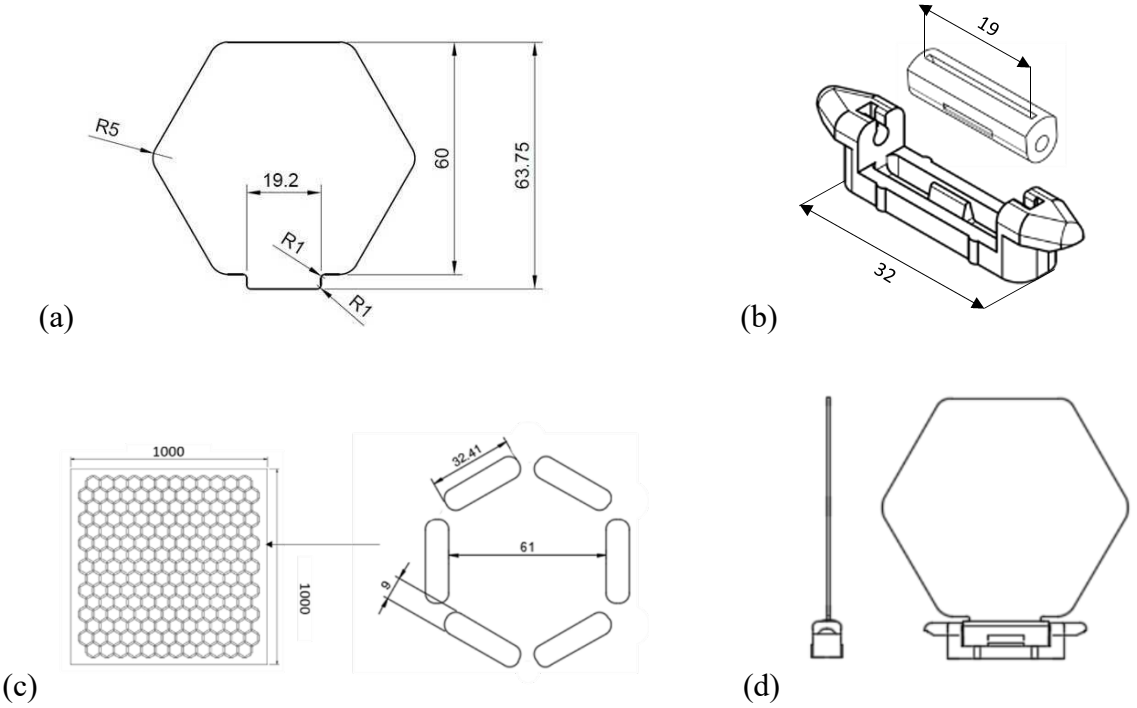


Figure 3.11 - Cotes (a) des clapets, (b) du système cranté imprimé, (c) du cadre structurel et de ses fentes. (d) Clapet inséré dans le système cranté.

La liste de ces éléments et leur description est donnée dans le Tableau 3.3. Bien qu'ayant un impact environnemental discutable, l'utilisation majeure d'aluminium comme matériau pour ce prototype est liée à sa légèreté, sa durabilité, et à la facilité de lui appliquer un revêtement.

Tableau 3.3 - Description des matériaux assemblés.

Elément	Nom EN	Qtés	Matériau	Epaisseur totale	Dimensions	Revêtement
Cadre structurel	Structural frame	1	Aluminium	4 mm	Carré (1000 mm x 1000 mm) (Figure 3.11c)	Aucun
Clapet (Figure 3.11a)	Flap	198	Aluminium	1 mm	Apothème de 30 mm (Figure 3.11a) Débord de 19,2 mm x 3,75 mm	Peinture thermochrome
Système cranté	Notched system	198	ABS	10 mm	(Figure 3.11b)	Aucun
Panneau aluminium	Aluminum panel	1	Aluminium	1 mm	Carré (1000 mm x 1000 mm)	Aucun

Les clapets sont peints d'une peinture formulée en collaboration avec *OliKrom* sur la base d'un cahier des charges fourni. Celle-ci est thermochromique, c'est-à-dire que sa couleur change à

une certaine température. Nous avons fixé ce seuil à 45°C, en estimation des possibles montées en température d'une paroi externe exposée au rayonnement solaire. Sous cette température, le revêtement du clapet est bleu, au-dessus, il est blanc. Grâce à cela, les clapets présentent un coefficient d'absorption adaptatif, puisqu'il passe d'un coefficient d'absorption proche de 1 pour la couleur bleue dans le spectre visible (380 nm à 780 nm) à une valeur de proche de 0,2 lorsqu'il est blanc.

3.1.4.1.1 Prototypage

Tous les éléments de STEGOS ont été dessinés à l'aide du logiciel de CAO Fusion 360, pour générer des fichiers 3D au format .dxf (*Drawing eXchange Format*), exploitables par des machines de découpe ou d'impression additives. Le cadre structurel a été découpé au jet d'eau (Figure 3.12a) tandis que les clapets ont été découpés au poinçon ou au laser (Figure 3.12b).

Figure 3.12 - Découpe au jet d'eau du cadre structurel.

Les éléments du système cranté ont été imprimés sur une imprimante 3D (de type *artillery* SW-X1) à l'aide d'un filament d'ABS de couleur blanche (Figure 3.13). Ce matériau a été choisi pour sa bonne résistance à la chaleur et une facilité d'impression intermédiaire.

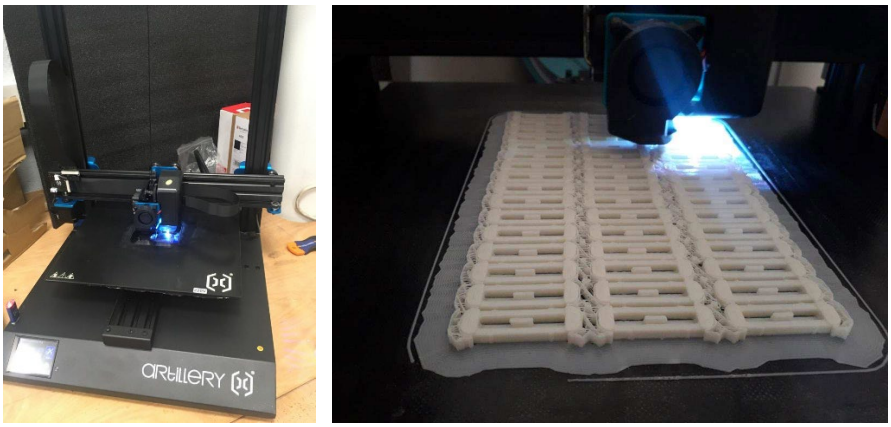


Figure 3.13 - Impression des pièces pour le système cranté.

3.1.4.1.2 Montage

Le système cranté est monté à l'aide d'une tige de vis. Chaque clapet est ensuite inséré dans le système cranté, qui présente une fente adaptée. Le système est alors lui-même inséré dans le cadre structurel en aluminium. La Figure 3.14 montre ces étapes de montage.

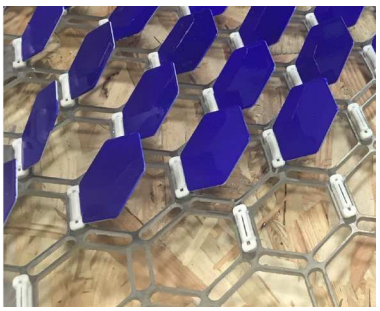
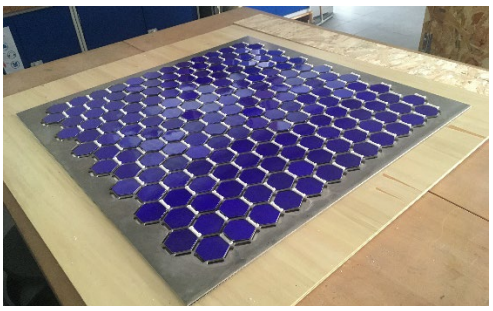
(a)  (b) 

Figure 3.14 - (a) Montage du prototype STEGOS, (b) Prototype final.

3.1.4.2 Prototype déformable

La fabrication d'un prototype déformable mais non déployable – le principe opposé du STEGOS – a été réalisée en parallèle. Les éléments de bases sont des hexagones pleins, positionnés en sandwich sur un maillage créé à l'aide d'élastiques et fixé à un cadre profilé en aluminium.

Le cadre fait partie d'un montage en profilés aluminium qui permet de mettre en tension l'un ou plusieurs des clapets. La Figure 3.15 montre un prototype à l'échelle 500 mm x 500 mm, déformé par traction par un câble tendu.

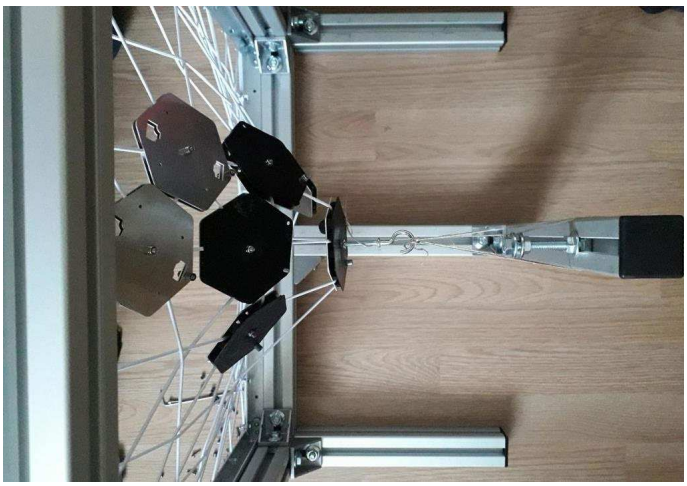


Figure 3.15 - Système de traction prévu pour le prototype à grande échelle.

La Figure 3.18 montre le montage de cette paroi dans une structure en bois d'1 m^3. La tension appliquée à l'un ou plusieurs points se fait également à l'aide de câbles tendus.

Figure 3.16 - Vue global de la paroi déformable intégrée à une boite bois.

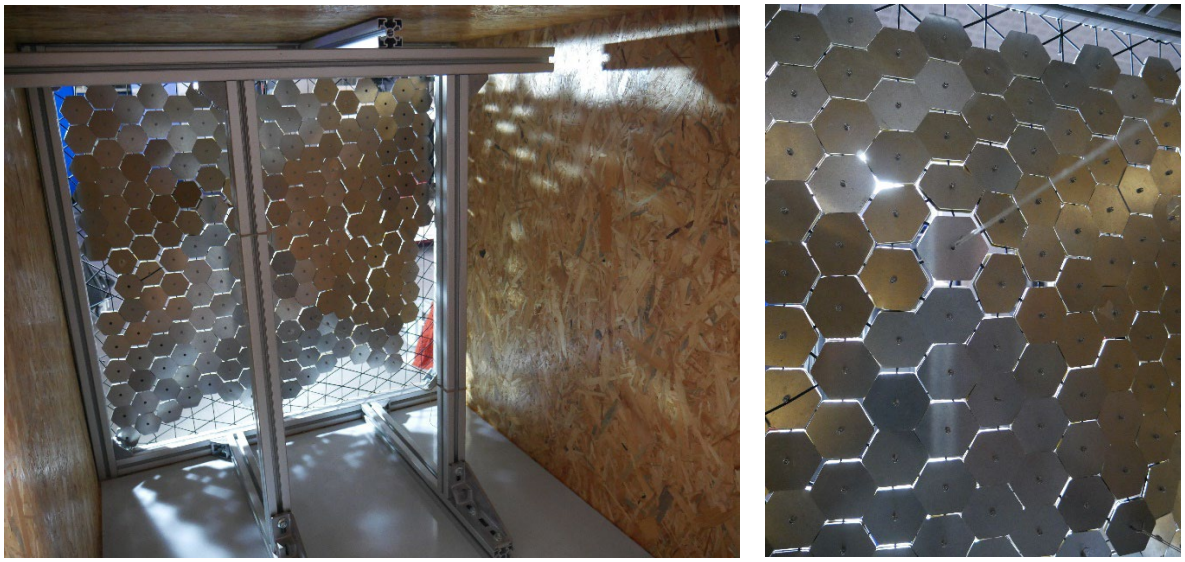


Figure 3.17 - Vue arrière du montage de la paroi déformable et câble de traction sur un élément hexagonal.

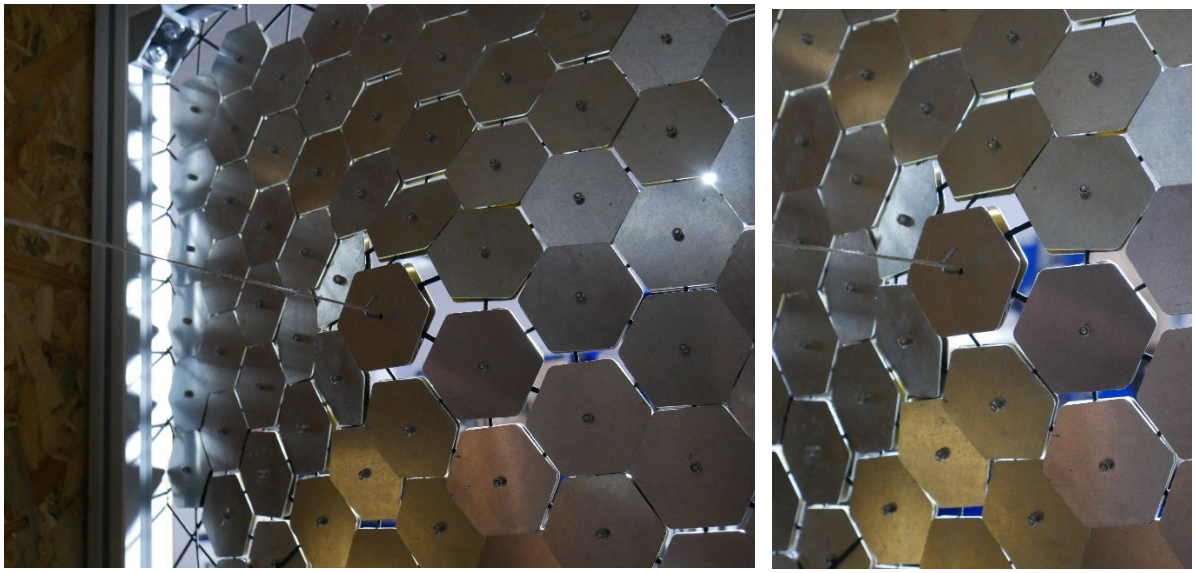


Figure 3.18 - Vues d'un élément en tension et de l'ouverture créée par la déformation.

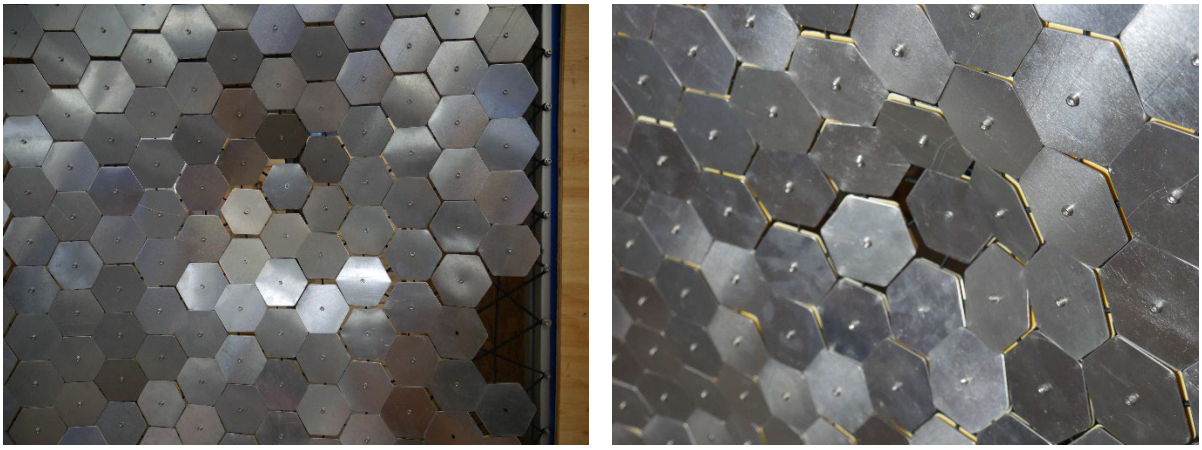


Figure 3.19 - Vues face de la déformation due à la tension application sur un élément hexagonal.

3.3 Caractérisation expérimentale multi-échelle

3.3.1 Objectifs de la caractérisation

Le prototype STEGOS a été réalisé afin d'évaluer le potentiel impact du principe proposé sur une enveloppe, et sa capacité à réguler une ou plusieurs des fonctions attendues. Le caractère dynamique de la paroi – d'une part à travers la thermochromie du revêtement, et d'autre part, via la position et ouverture de ces mêmes clapets – met en jeu des phénomènes physiques relativement complexes ; conduction au travers des couches, échanges convectifs entre les clapets et l'air environnant, échanges radiatifs en courte longueur d'onde avec jeu de réflexion et transmission, échanges en grandes longueurs d'onde avec la voute céleste, l'environnement et entre les clapets et la couche extérieure du prototype et enfin possible transfert de chaleur par le transport de l'air à travers le prototype.

Ces mécanismes peuvent être étudiés à différentes échelles, dans un premier temps par la caractérisation du prototype en laboratoire, et dans un second temps par un dispositif

expérimental à échelle proche de l'échelle 1:1, instrumenté et placé en extérieur pour des mesures en conditions réelles.

3.3.2 Tests en laboratoire

3.1.4.3 Echelle clapet

Dans le cadre d'un autre projet, un banc d'essai permettant de mesurer le coefficient d'absorption solaire d'un échantillon a été développé. Ce banc consiste en un canal isolé opaque dans auquel une lampe solaire et une ventilation sont intégrés. La lampe (type xénon) est orientée vers l'échantillon testé et crée un rayonnement de 815 W/m² proche des caractéristiques radiatives solaires. Les écoulements d'air sont « contrôlés » par l'utilisation d'un ventilateur linéaire, positionné à une extrémité du canal, l'air sortant par des orifices situés à l'autre extrémité. Un bilan des transferts sur l'échantillon testé intègre des flux convectifs et radiatifs faisant intervenir les températures d'air et de surface et la vitesse d'air qui sont mesurés. Il est alors possible de déterminer le coefficient d'absorption en régime stationnaire (schéma et détails du montage en Annexe D).

Deux expérimentations ont été menées sur un échantillon de taille 100 mm x 100 mm ayant un revêtement bleu thermochromique. La première expérimentation est visuelle et démonstrative du changement de couleur de l'échantillon : la lampe solaire est allumée, et le banc est laissé ouvert, pour permettre la prise de photographies à intervalles réguliers des changements de couleurs de l'échantillon, tout en mesurant son élévation en température. L'installation expérimentale est montrée en Figure 3.20. L'échantillon indique bien un éclaircissement progressif, qui débute à une température proche de 40°C, allant alors d'un bleu clair à un blanc très clair vers les 50°C.

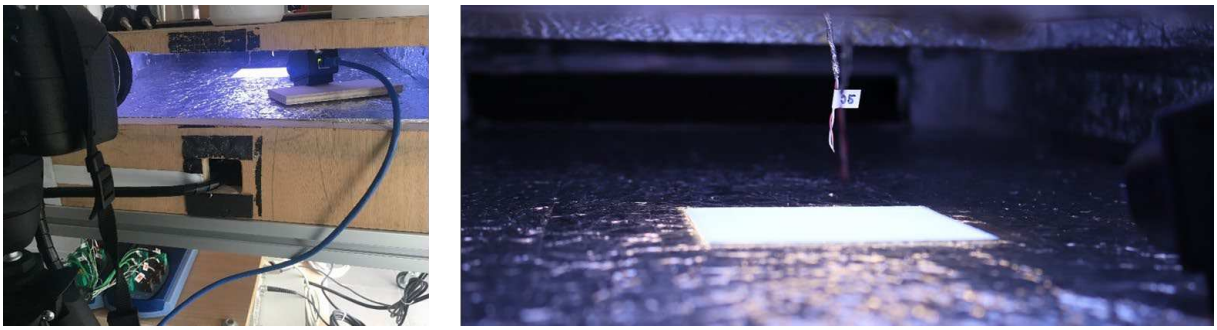


Figure 3.20 - Appareil photo et caméra thermique pour observer les variations de couleurs et de température.

La deuxième expérimentation consiste à utiliser le banc pour observer les variations du coefficient d'absorption en fonction des changements de température de l'échantillon. Notons que le banc d'essai permet normalement de remonter au coefficient d'absorption en régime permanent, c'est-à-dire lorsque la température de l'échantillon est stable. En outre, l'appareil, lors de son utilisation, n'était pas encore calibré. L'approche utilisée n'a donc pas pour ambition la détermination d'une valeur proche de la réalité, mais plutôt l'observation de sa variation à l'approche du changement de couleur.

En l'état, le banc expérimental n'a pas permis une augmentation en température de l'échantillon au-dessus de 45°C, à moins d'une coupure totale de la ventilation. Cette température maximale atteinte dépend de la puissance de la lampe et de la vitesse d'air dans le tube, mais est limitée par le coefficient d'absorption de l'échantillon. La Figure 3.21 présente le coefficient d'absorption calculé au cours de l'expérimentation c'est-à-dire alors que l'échantillon est chauffé par la lampe, puis son refroidissement lorsque la lampe est éteinte. Ce coefficient se stabilise dans un premier temps, quand la température de l'échantillon dépasse les 40°C, puis diminue à mesure que la température augmente. Celle-ci, bien qu'estimée à travers un modèle non calibré (voir détails en Annexe E), corrobore avec l'éclaircissement de couleur observé pour cette plage de température.

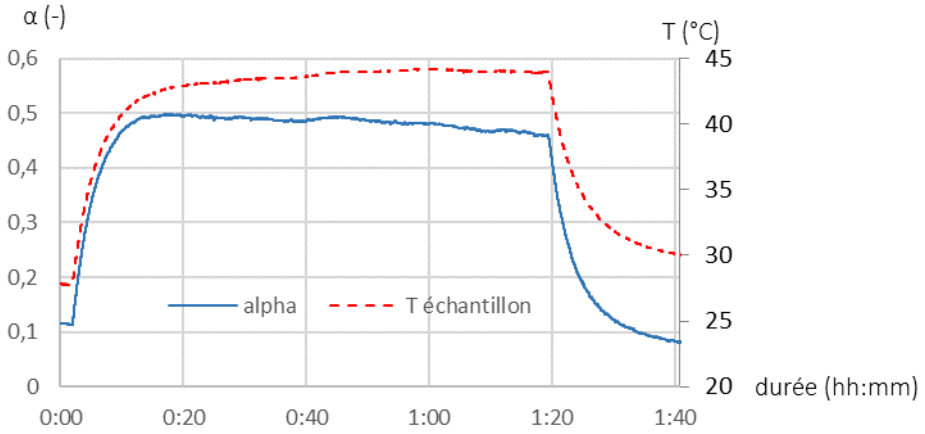


Figure 3.21 - Coefficient d'absorption α calculé et température de l'échantillon au cours de l'expérimentation.

3.1.4.4 Echelle façade

Le prototype STEGOS a été placé en extérieur, face au soleil pour évaluer son homogénéité en température. Quand les clapets sont fermés, une différence de couleurs entre les clapets est observable à l'œil nu. Des images thermiques infrarouges, réalisées à l'aide d'une caméra FLIR A65, indiquent une bonne homogénéité de la température. Cette disparité, bien que légère, peut être due à une fermeture non homogène des clapets liée à des imperfections du système cranté imprimé, entrainant des tons de bleu différents selon la lumière réfléchie, ou bien à une légère inhomogénéité dans le dépôt des couches de peintures.

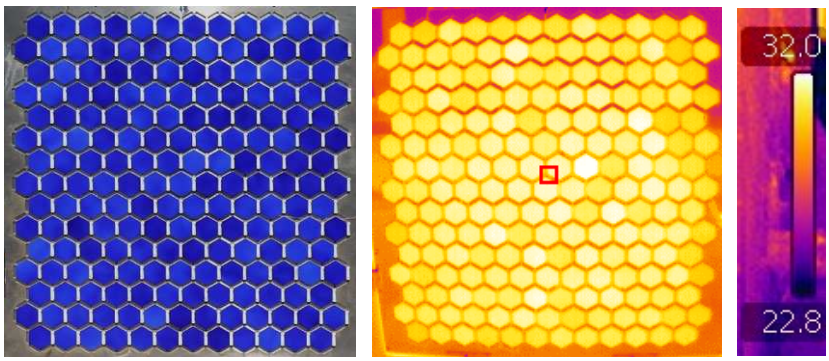


Figure 3.22 - Photographie et image thermique infrarouge de STEGOS exposé au rayonnement solaire en extérieur.

3.3.3 Tests sur banc d'essai mobile : « boîte test »

La partie qui suit détaille l'intégration du prototype STEGOS à un banc de mesure d'1 m^3, de façon à observer et mesurer les phénomènes physiques en jeu à une échelle représentative et dans des conditions climatiques réelles.

3.3.3.1 Présentation du dispositif expérimental

Une boîte test de 1 m^3 a été conçue pour pouvoir recevoir l'intégration du prototype. Celle-ci est composée de six parois ; 5 sont isolées à l'aide de panneaux de polyuréthane, pris en sandwich par du bois composite OSB (Oriented Strand Board), la sixième étant interchangeable afin de pouvoir y installer différents types de systèmes à tester. La structure est solidifiée par des profilés aluminium entre l'OSB et le polyuréthane, ajoutant de fait une couche d'air d'épaisseur de 40 mm (Figure 3.23).

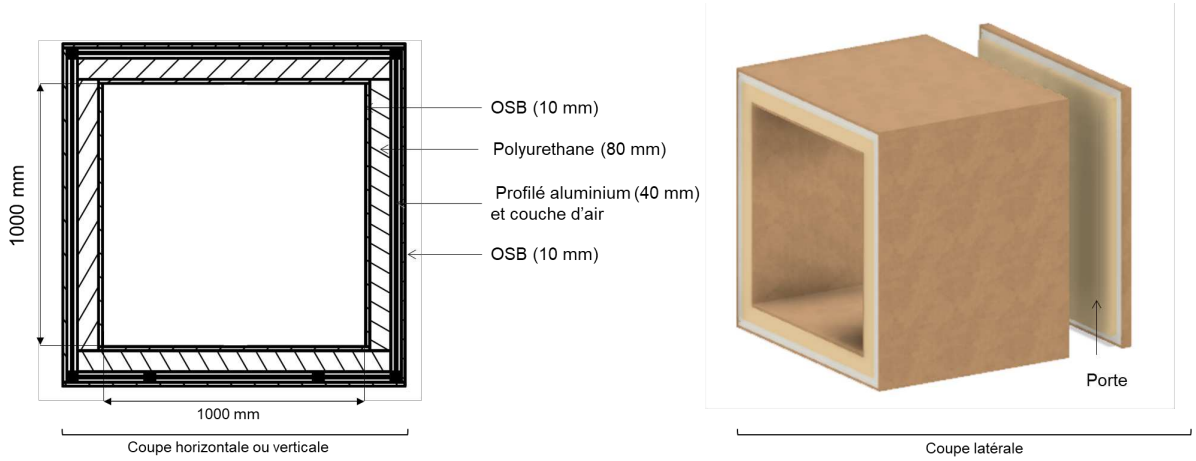


Figure 3.23 - Schématisation et composition de la boîte test.

Plusieurs actions ont été menées pour éviter la détérioration du caisson notamment par la pluie : les panneaux OSB extérieurs ont été vernis, le dessus du caisson a été recouvert d'une membrane étanche et un joint de silicone a été appliqué en plusieurs points pour améliorer l'étanchéité à l'air (Figure 3.24a et b). Un débord de toit a également été ajouté, suffisamment petit pour ne pas créer d'ombre sur la façade testée et donc ne pas interférer avec les mesures (Figure 3.24c).

Pour pouvoir exposer l'élément testé dans toutes les orientations, la boîte test a été équipée de 4 roues. Un boîtier électrique avec des grilles de ventilation a été vissé sur l'une des faces extérieures, afin de maintenir les instruments de surveillance à l'écart des conditions internes de la boîte d'essai, et de les protéger également des conditions climatiques. En effet, le risque de les avoir à l'intérieur de la boîte serait des perturbations non-négligeables sur les conditions internes de la boîte, en raison de la chaleur qu'ils génèreraient. Ce boitier est également percé à plusieurs endroits de façon à pouvoir y insérer des câbles (Figure 3.24d).

(a)

(c)

(b)

(d)

Figure 3.24 - Photographies de la boîte test : (a) séchage de la peinture imperméabilisante, (b) montage et pose de la bâche étanche (c) vue de profil du débord de toit en OBS et bâché, (d) installation du boîtier électrique.

3.3.3.2 Plan de mesure

L'étude des transferts au sein du STEGOS et de son impact sur le volume de la boîte test nécessite de monitorer les conditions extérieures, intérieures et au sein de la paroi. Les paramètres suivants sont mesurés :

- L'irradiation solaire incidente *I*, correspondant au rayonnement en courte longueur d'onde ;
- La vitesse du vent v_{vent} à proximité de la boîte test ;
- Les températures d'air intérieur T_{int} et extérieur T_{ext} ;
- Les températures *T* et *tHF*, et densités de flux thermique *HF* aux interfaces entre les couches de la paroi ;
- Les températures et densités de flux thermiques *HF* des surfaces intérieures et extérieures.

Les parties suivantes détaillent les types de capteurs utilisés et leur intégration au montage.

3.3.3.2.1 Positionnement des capteurs

Les capteurs sont positionnés comme indiqué sur la Figure 3.25. Des fluxmètres pour la densité de flux thermiques et des thermocouples sont placés entre chaque couche de la paroi testée.

Bien que calibrés, ces capteurs sont dupliqués en certains points en prévision de mesures incohérentes ou de potentiels défauts pendant l'expérimentation.

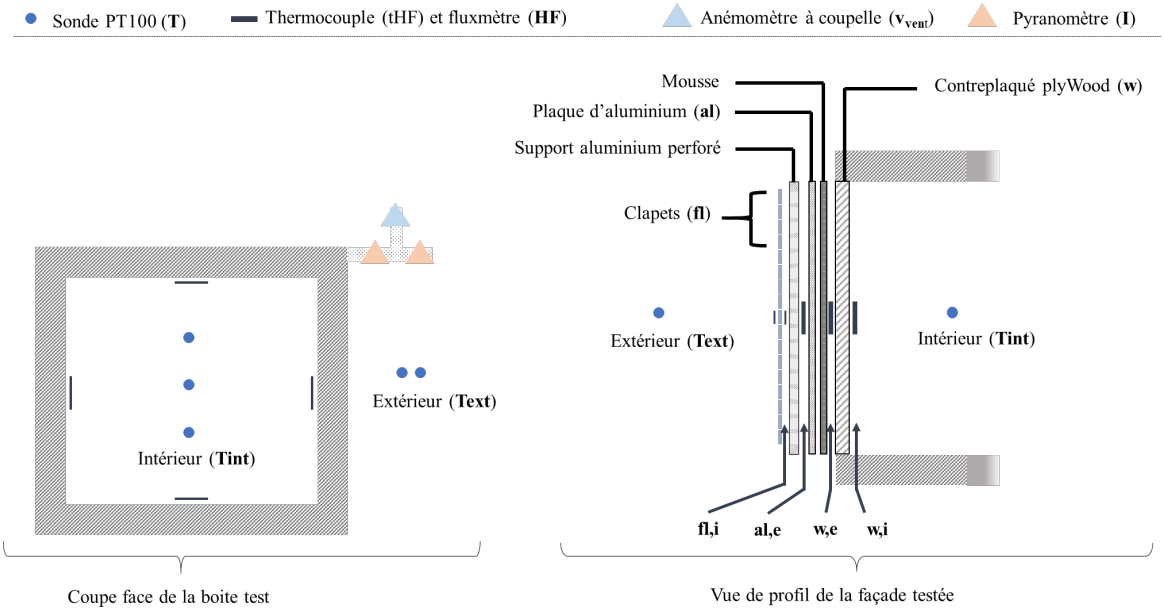


Figure 3.25 - Nomenclature et positions des capteurs dans la boîte et la façade testée.

3.3.3.2.2 Centrale d'acquisition

L'acquisition des mesures se fait de manière centralisée sur une Graphtec GL800 à 40 voies, branchée sur secteur, qui peut intégrer des signaux analytiques entre de 20 mV à 100 V, pour un taux d'échantillonnage minimal de 10 ms. La Graphtec est placée dans le boitier électrique fixé sur la boîte test, à proximité de ses 40 entrées analogiques.

Figure 3.26 - Centrale d'acquisition et ses 40 voies dans le boitier électrique et relié au câble d'alimentation fixé sur la boîte test.

3.3.3.2.3 Pyranomètres

La mesure du rayonnement solaire incident est faite avec deux pyranomètres, de type SMP3. Leur plage de mesure est comprise entre 0 et 1600 W/m², et leur gamme spectrale est comprise entre 300 et 2800 nm, couvrant la totalité du rayonnement solaire reçu après avoir traversé l'atmosphère. Les pyranomètres renvoient un courant entre 4 et 20 mA. Branchés à la centrale

d'acquisition avec deux résistances en parallèle de 470 Ohm (erreur de 2%), leurs signaux sont convertis en une tension comprise entre 0.94 V et 4.7 V et sont connectés à la centrale d'acquisition. Les pyranomètres sont visibles sur la Figure 3.27. Décalés de la sorte, ils n'ombragent pas la façade testée. Un des pyranomètres est fixe, orienté de façon verticale, et l'autre est orientable.

Figure 3.27 - Pyranomètre vertical et pyranomètre orientable installés sur la boîte test.

L'utilisation de deux pyranomètres permet de mesurer d'une part l'éclairement incident reçu sur la façade, et d'autre part celui reçu par les clapets selon leurs orientations en orientant l'un des pyranomètres de telle façon à être dans le même plan. Lorsque les clapets sont fermés, le pyranomètre orientable est mis à l'horizontal.

3.3.3.2.4 Anémomètre à coupelle

La vitesse d'air extérieure est mesurée à l'aide d'un anémomètre à coupelle BSC Windgeber Sa plage de mesure est comprise entre 0 et 35 m/s, avec une précision de l'ordre de 0,2 m/s. Comme les pyranomètres, il renvoie un courant de 4-20 mA, mesurable comme une tension via une résistance.

Figure 3.28 - Anémomètre à coupelle fixé sur un profilé aluminium.

L'anémomètre à coupelle est fixé sur le même profilé aluminium que les pyranomètres, mesurant une vitesse de vent à une hauteur de 180 cm. La vitesse d'air mesurée à cet endroit ne correspond donc pas exactement à l'écoulement de l'air devant le STEGOS.

3.3.3.2.5 Capteurs de température d'air PT100

La mesure de températures d'air intérieur et extérieur se fait à l'aide de détecteurs de températures à résistance fabriqués à partir de platine, de type PT100. Leur plage de mesure va de 0°C à 100°C.

3.3.3.2.6 Fluxmètres thermiques

La mesure de densité de flux thermique est réalisée avec des fluxmètres à gradients tangentiels (plus d'information en Annexe E) en cuivre ayant une incertitude de mesure d'approximativement 3%. Pour assurer un bon contact aux interfaces entre les fluxmètres et les surfaces, une pate thermique à haute conductivité (λ = 5 W/m.K) est enduite sur l'une des faces du fluxmètre. La pâte thermique n'étant pas suffisante pour maintenir le fluxmètre en place sans qu'il ne se décolle et glisse, du scotch est disposé sur son contour en faible largeur.

(a) (b) (c)

Figure 3.29 - Installation des fluxmètres : (a) pate thermique déposée sur un fluxmètre, (b) scotch réfléchissant pour la fixation à la surface, (c) fine mousse pour éviter toute couche d'air.

Les fluxmètres ont une taille variable (300 mm x 300 mm, 100 mm x 100 mm, 30 mm x 30 mm) ; les plus petits sont fixés sur ou sous les clapets, et les plus grands entre les différentes couches de la façade testée et sur toutes les surfaces intérieures de la boîte test. Notons que les fluxmètres positionnés en surface ne sont pas peints et ont des propriétés d'absorption et émission différentes que la surface sur laquelle ils sont positionnés.

3.3.3.2.7 Thermocouples

Des thermocouples de type T ont été intégrés par soudure aux fluxmètres thermiques, permettent la mesure des températures aux interfaces des couches du banc d'essai et en surface. Les thermocouples associés aux fluxmètres indiquent donc la température à l'endroit précis où la densité de flux est mesurée (soudure visible en Figure 3.30).

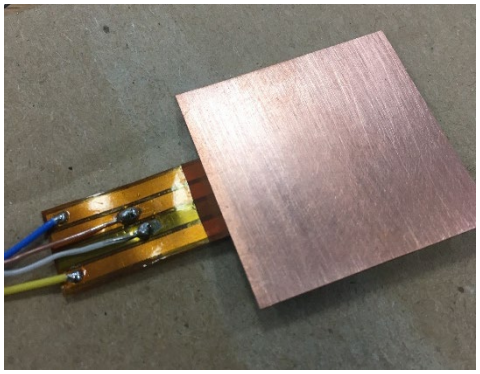


Figure 3.30 - Soudure du thermocouple à un fluxmètre de taille 30 mm x 30 mm avant ajout d'un adhésif protecteur.

3.3.3.3 Montage de la façade

Un cadre en bois contreplaqué de 10 mm d'épaisseur est d'abord fixé sur le contour de la façade interchangeable, recouvrant ainsi les tranches des quatre autres parois. Pour assurer un bon contact et l'étanchéité avec les couches suivantes, une mousse adhésive est ajoutée sur ce même contreplaqué. Les étapes de montage sont illustrées en Figure 3.31.

Si le STEGOS est en configuration opaque, c'est-à-dire qu'il est positionné devant une paroi opaque, la couche suivante est une plaque de contreplaqué pleine qui recouvre toute la surface de la boîte. Dans les cas où le STEGOS est en configuration vitrage ou enveloppe, celui-ci sera directement fixé sur un cadre contreplaqué laissant une ouverture sur le volume intérieur. Le prototype STEGOS est ensuite positionné sur des paumelles vissées sur le cadre. A l'aide de targettes et d'un verrou, le système est finalement verrouillé à la paroi.

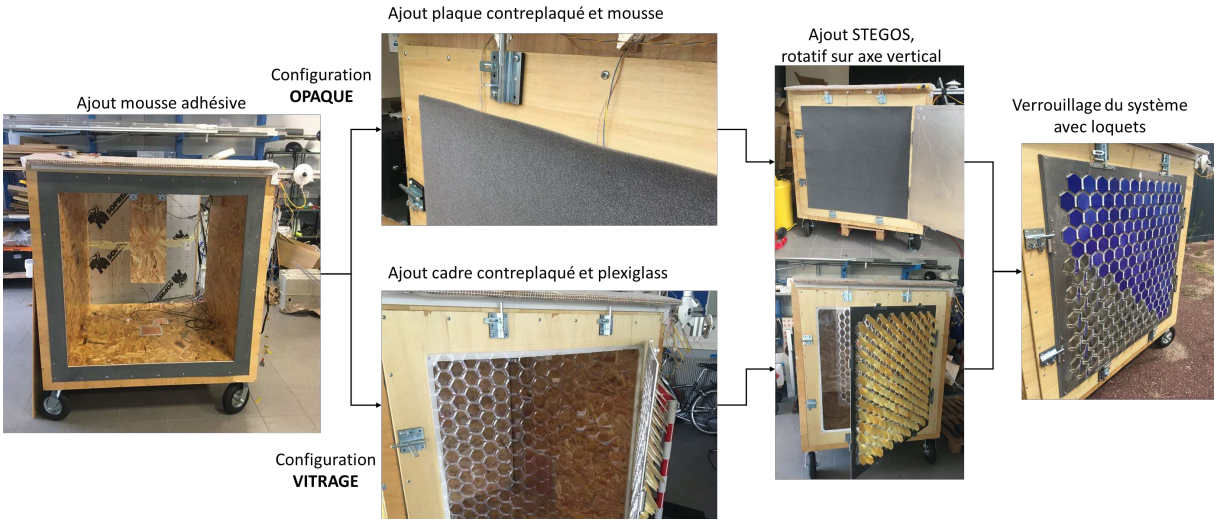


Figure 3.31 - Etapes de montage selon la configuration testée opaque ou vitrage.

Ce système permet l'ouverture facile du prototype et le contrôle de la plupart des capteurs installés. Il permet également d'interchanger les paumelles avec des loquets pour une rotation du STEGOS, dans le cas où l'on souhaite passer d'une rotation de clapets horizontale à verticale (voir Figure 3.32).

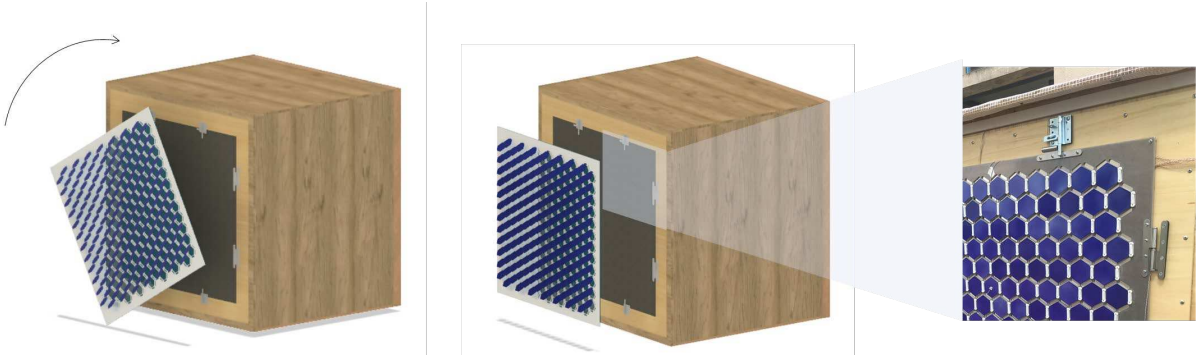


Figure 3.32 - Rotation possible du système entier.

3.3.3.4 Article – Journal Energies

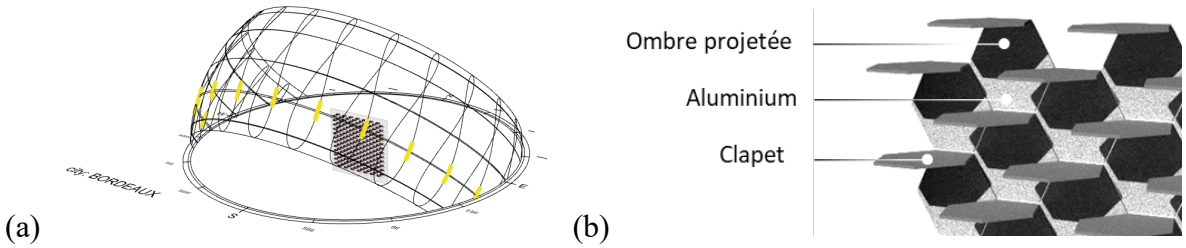
L'article qui suit met en avant les premières expérimentations menées sur le STEGOS intégré à la boîte test. Il a été soumis auprès du journal **Energies** le 17 décembre 2021, accepté le 18 janvier 2022, puis publié le 26 janvier 2022.

3.3.3.4.1 Présentation

Après une introduction du principe bio-inspiré, de sa conception, ainsi que de la boîte test (travaux détaillés en parties 3 et 3.2), il détaille deux expérimentations en conditions réelles : des mesures en configuration opaque, en vue d'évaluer l'impact thermique du STEGOS sur la boîte, et des mesures en configuration vitrage, pour l'observation des projections solaires sur la paroi testée et sur les parois internes de la boîte.

Toutes les mesures sont effectuées avec la boîte test orientée vers le sud, et des clapets en position casquette ; ceux-ci sont donc fixés sur la partie haute des fentes hexagonales, avec un axe de rotation horizontal. Les clapets ont un angle de rotation de 0°, 45° ou 90°.

Les mesures en configuration vitrage fournissent des images des projections solaires à différentes dates et heures de la journée. Les projections solaires sur le plan de la façade testée et dans la boîte test sont géométriquement modélisées puis validées par comparaison avec les expérimentations menées.



(a) (b)

Figure 3.33 - (a) Façade modélisée sur Rhinoceros Grasshopper et courses solaires (par heure) sur la période testée (b) Surfaces ombragées modélisées sur le STEGOS avec clapet à 90°.

Par ailleurs, les mesures en configuration opaque offrent une validation visuelle des changements de couleur, mesurées à 45°C. De premiers éléments comparatifs entre les configurations sont proposés et mènent à l'introduction d'un modèle thermique de type RC.

energies

MDPI

Article

An Adaptive Building Skin Concept Resulting from a New Bioinspiration Process: Design, Prototyping, and Characterization

Tessa Hubert [1,2,3,*], Antoine Dugué [1], Tingting Vogt Wu [2], Fabienne Aujard [3] and Denis Bruneau [4]

[1] NOBATEK/INEF4, National Institute for the Energy Transition in the Construction Sector, 64600 Anglet, France; adugue@nobatek.inef4.com
[2] Institute of Mechanical Engineering (I2M), UMR CNRS 5295, Université de Bordeaux, 33400 Talence, France; tingting.vogt-wu@u-bordeaux.fr
[3] MECADEV UMR CNRS 7179—National Museum of Natural History, 91800 Brunoy, France; fabienne.aujard@mnhn.fr
[4] Ecole Nationale Supérieure d'Architecture et Paysage de Bordeaux, 33405 Talence, France; denis.bruneau@bordeaux.archi.fr
* Correspondence: thubert@nobatek.inef4.com

Abstract: Building envelopes can manage light, heat gains or losses, and ventilation and, as such, play a key role in the overall building performance. Research has been focusing on increasing their efficiency by proposing dynamic and adaptive systems, meaning that they evolve to best meet the internal and external varying conditions. Living organisms are relevant examples of adaptability as they have evolved, facing extreme conditions while maintaining stable internal conditions for survival. From a framework based on the inspiration of living envelopes such as animal constructions or biological skins, the concept of an adaptive envelope inspired by the Morpho butterfly was proposed. The system can manage heat, air, and light transfers going through the building and includes adaptive elements with absorption coefficients varying with temperature. This paper presents the developed framework that led to the final concept as well as the concept implementation and assessment. A prototype for heat and light management was built and integrated into a test bench. Measurements were performed to provide a first assessment of the system. In parallel, geometrical parametric models were created to compare multiple configurations in regards to indicators such as air, light, or heat transfers. One of the models provided light projections on the system that were compared with measurements and validated as suitable inputs in grey-box models for the system characterization.

Keywords: bioinspiration; adaptive skin; product design; parametric; regulation factors; biological models

check for updates

Citation: Hubert, T.; Dugué, A.; Vogt Wu, T.; Aujard, F.; Bruneau, D. An Adaptive Building Skin Concept Resulting from a New Bioinspiration Process: Design, Prototyping, and Characterization. *Energies* **2022**, *15*, 891. https://doi.org/10.3390/en15030891

Academic Editors: Dimitrios Kraniotis and Katerina Tsikaloudaki

Received: 17 December 2021
Accepted: 18 January 2022
Published: 26 January 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Today, challenges in the building sector are mainly focused on reducing energy consumption and greenhouse gas emissions while maintaining indoor environmental quality. Building designs have gradually evolved with technological advances to comply with stiffer requirements in terms of comfort, energy, and durability [1]. The envelope is more than a load-bearing component of the building. As it has a major impact on the whole building energy consumption, it is expected to manage multiple regulation functions between internal and external environments [2].

New generations of envelopes are emerging: dynamic, auto-reactive, and responsive envelopes [3]; all demonstrate adaptability towards changing environmental conditions while ensuring comfort and a low carbon footprint. Adaptive envelopes can provide varying thermal insulation depending on the season, harvest energy, move in accordance

with the sun's path, control humidity, and so on, in a way that could help achieve more sustainable building designs [4].

Mechanisms found in nature reveal inspiring examples of multifunctional envelopes using very limited local resources [5]. Indeed, living species had to evolve under various environmental constraints, requiring them to develop adaptive and multifunctional features. Rising as an innovative approach, bioinspiration in the building field is the topic of extensive research; it mainly focuses on design processes, frameworks, and tools to ease the transfer of biological principles into technological responses [6–8]. Some research has already led to several adaptive case studies, but very few propose performance assessments of their design [9].

The current paper presents an adaptive envelope concept derived from a bioinspired framework. The concept, called Stegos, is a heat-, light-, and air-regulating membrane that plays the role of a skin placed in front of an opaque wall or a window or acts as an openable envelope. Stegos was prototyped and tested in real climate conditions. Measurements were carried out to help with modeling and later to retrieve performance indicators.

2. Adaptive Concept Derived from a Bioinspired Framework

In support of bioinspired processes, a multitude of tools or methods were recently developed, such as databases, thesauri, ontologies, or taxonomies, for instance [10]. Tools from other disciplines, such as design reasoning theories in engineering [11,12], can also facilitate the biomimetic process [13] and have already been successfully applied during design processes [14]. However, only a small fraction of patterned bioinspired concepts or products are commercialized [15]. Though this gap is partially due to usual design constraints (feasibility, strategy, marketing, and so on), it is also mostly related to the challenges of transferring information from living organisms to technologies [16].

The transferability of an identified biological strategy into technology is complex without a good understanding of the phenomena at stake in the biological element. Tools to facilitate interdisciplinarity during bio-inspired design are increasingly numerous, but they face limitations as they are frequently designed for and by engineers rather than biologists [17] and often consider a specific objective rather than the full process. The steps of identification and understanding relevant biological models, and then of transferring a biological model to a technological concept, would thus deserve more advanced interdisciplinarity during the design process.

In the building sector, the practice of bioinspiration has led to multiple bioinspired buildings designs, but most of them are monofunctional designs, where the inspiring species demonstrate multifunctional features [8]. The assessment of the building performance is often not carried out, which can be seen as a shortcoming [9]. In an effort to tackle these challenges, the authors experimented with a bioinspired framework [18] that they adapted from an ISO standard design process [19], with the aim of proposing a multifunctional design for the building envelope.

2.1. Biological Envelopes as the Starting Point of the Framework

The ISO standard 18458:2015 provides a framework to help harmonize practices in bioinspiration. Using the biology-push approach, meaning the design process is initiated by one or several biological solutions [20], we propose a four-step process:

- 1: The description of biological models;
- 2: The understanding of their principles;
- 3: Their abstraction into a concept;
- 4: The validation of its technical feasibility, i.e., the transferability to technology or solution and its implementation and assessment.

To narrow down the perimeter of the studied biological domain used in step one, the authors chose to consider living envelopes. Those include the following:

- Biological envelopes that are the interface of living organisms between their internal environment and external conditions (for instance, animal envelopes such as skin, feather, and shells, or vegetal envelopes such as bark);
- Structures built by animals for shelter, rest, storing, or communication [21] (bird nests, colonies, mounds).

This selection was arbitrarily chosen as species have evolved and developed multifunctional interfaces through mutations and selective processes, either on their own or by demonstrating ingenuity and resilience to regulate multiple factors of their internal environments while facing an environment characterized by varying conditions.

Step two of the applied design process involves selecting a sample of living envelopes and characterizing their functions in an intelligible structure for building designers. Based on [22,23], this approach consists of identifying functions as building envelope criteria and describing them as the result of environmental disturbances or disruptive actions, and through physical phenomena. Disturbances from the environment, whether they were nonliving elements (climatic conditions such as rain and wind) or living organisms (metabolism and interaction with other species), were taken into account in the understanding of the biological domain with the support of biologists in adaptive mechanisms [24].

This interdisciplinary work addressed transferability challenges observed in the literature during step three by providing an understanding of living models at the crossroads of biology and engineering. Step three is a series of ideation workshops involving various building sector profiles (engineers, architects, designers) to test this characterization as a tool of abstraction into multifunctional envelope concepts. The last step (step four) consists of transposing concepts into technological alternatives and exploring several of them in their implementation.

The bioinspired concept presented in this article is derived from this framework. We present in the following how it emerged and was conceptualized, designed, and prototyped.

2.2. Morpho-Butterfly-Inspired Design

The design presented here is based on the Morpho butterfly, one of the selected species in the sample of biological models. This animal (from the Class *Insect* and Order *Lepidoptera*) is well known for the intense blue of its wings due to the structural properties of scales and not to pigmentation [25]. Table 1 presents the structure of the characterization used for the emerged concept, focusing on two main functionalities: heat and light.

Table 1. Biotics and abiotic disruptive actions on light, heat, and air regulation functions of the Morpho butterfly.

Regulation Factor	Disruptive Elements	Description (Physical Factor/Features of Wing)	Possible Abstractions
Light	Butterfly behavior and light from environment	Iridescence phenomenon from structural blue color [25] (reflection/surface texture)	Orienting surface elements towards environment for optimized heat radiation
Heat	Behavior and radiation from surrounding environment	Difference in surface properties between upside and downside surfaces of wings [26] (radiation/matter arrangement)	
	Behavior and air	Forced convection by shuffling wings [26] (convection/movement)	Enhancing convection with moving surfaces or change in configuration
	Air temperature	Increase in emission in near IR above 50 °C [27] (radiation/matter arrangement and composition)	Intrinsic emissive properties adapting to a given temperature range owing to structuration surface

To survive, the Morpho requires a body temperature of 36 °C [27]. Therefore, it has developed multiple behavioral mechanisms for thermoregulation, such as wing shuffling to force convection on the thorax or orienting its wings for minimum or maximum solar radiation. On a morphological level, the chitin-made wings of the Morpho are able to emit more in the near-infrared when reaching a temperature above a certain threshold so that they automatically decrease in temperature and return to optimal conditions. Figure 1 shows the illustration of the concept that emerged during the ideation workshop.

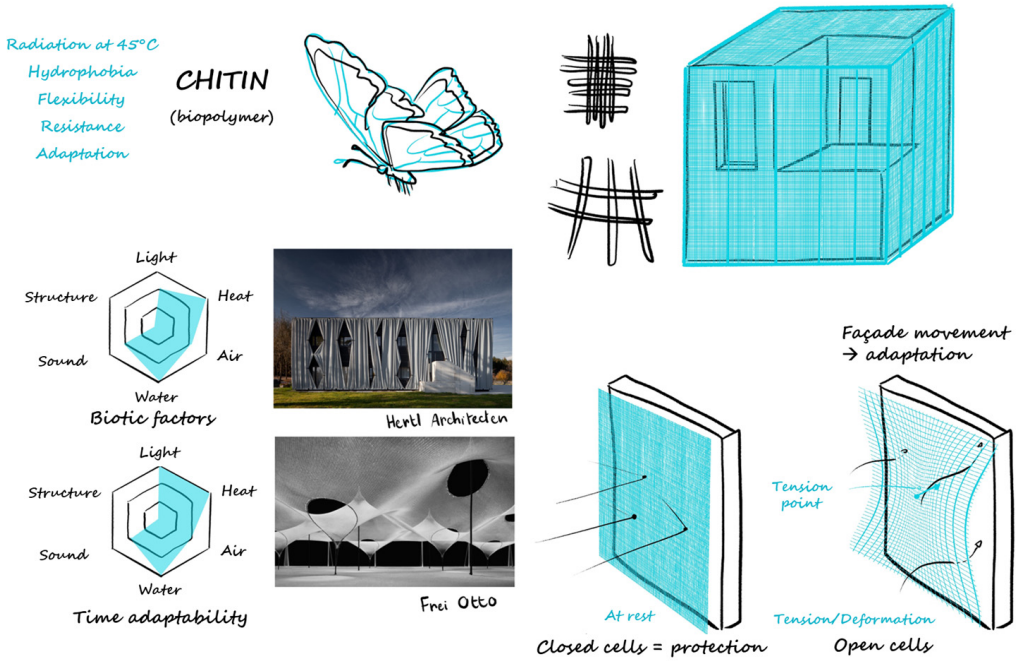
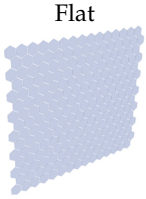
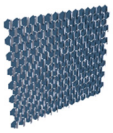
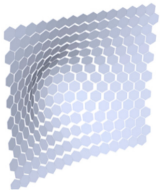
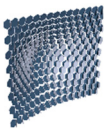


Figure 1. Proposed concept inspired from the Morpho. Credit: Myriame Ali-Oualla and Kaïs Bhouri.

Abstraction from the ideation phase led to a concept of a membrane, both flexible and ductal, similar to the wings of the Morpho made of chitin polymer. The structure is a deformable mesh made of identical solid elements held together. When the mesh is deformed, the elements are pushed away from each other, creating openings between them. The elements themselves are deployable using flaps that can rotate on a base. The rotation is induced either by the deformation or by a manually operated device. Additional functionality is brought by a coating on the flaps, which has an adaptive absorption coefficient linked to changes in temperature. Table 2 lists the functions managed by this concept in some of the possible configurations.

The adaptive properties of this concept were chosen to be both auto-reactive (coating, flaps) and mechanically operated by the building occupants (deformation, flaps).

Table 2. Managed functions according to configurations. For visual display, flaps are white and base elements are dark grey.

Mesh	Flap	Heat	Light	Air
Flat 	Deployed 	Adaptive coating less absorbing with threshold temperature + decrease in temperature with shadows	Shadows generated by rotated flaps	Air passing through if bases are hollowed
	Not deployed	Adaptive coating	-	-
Deformed 	Deployed 	Adaptive coating + decrease in temperature with shadows	Shadows generated by rotated flaps	Air passing through the gaps created the deformation between elements
	Not deployed	-	Shadows generated by rotated flaps	

2.3. Parametric Design of the Concept

As a biology-push approach was followed for the design concept, no particular building envelope requirements were defined as specifications for the final design. However, it had to be multifunctional regarding heat, light, and air management. Once the functions were characterized, considering clear requirements, a specific design could be proposed.

These functions are sometimes implemented through interdependent parameters; as an exploration before a final set of parameters, numerous parameters and their respective values were proposed (Table 3).

Table 3. List of design parameters that were considered for the concept and their respective possible values.

Elements	Parameters	Possible Values
Mesh	Pattern	Triangular/radial/squared/fabrics/ropes
	Material	Silicon/rubber/O-ring joints/chains
	Scale of deformation	1 cm/10 cm/100 cm
	Type of tension force	Point/surface area/linear
	Number of tension forces	Single/multiple
	Tilt of tension	Centimeters/decimeters/meters
	Direction	Onward/outward
	Piloting setting	Manual/automatic
	Piloting functioning	Mechanical/electrical/chemical
Base and flaps	Material	Alloy/metal/wood/clay-based material/polymers
	Size scales	1 cm/10 cm
	Homogeneity	Plain/hollowed

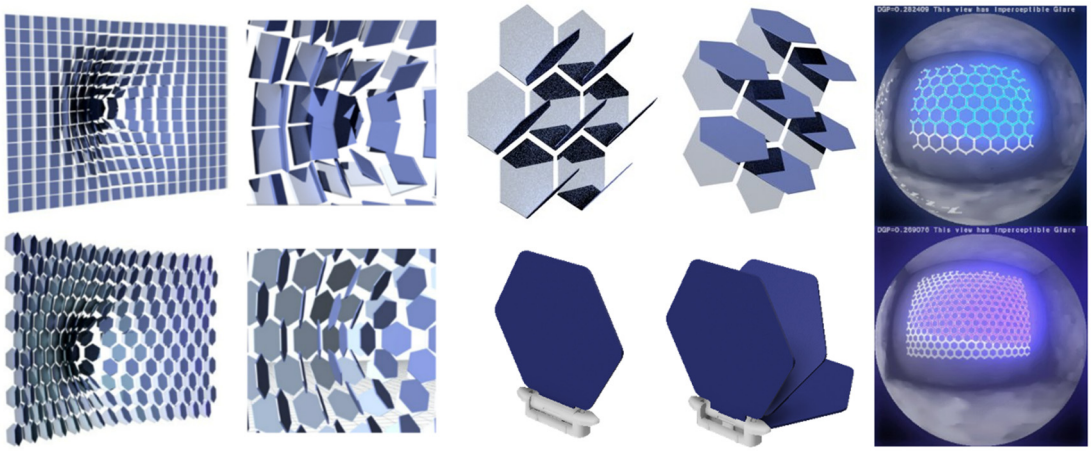
Table 3. *Cont.*

Elements	Parameters	Possible Values
Flaps	Axis of rotation	Lateral/central
	Size	Smaller than base/larger than base
	Shape	Round/polygonal (triangular, rectangular, hexagonal)
	Homogeneity	Plain/hollowed
	Coating	Yes/no
	Piloting setting	Manual/automatic/coupled with deformation/decoupled
	Piloting functioning	Mechanical/electrical/chemical
	Distance between each other	None/smaller than size of flaps/larger

The functions brought by the different values of the parameters are various. To narrow the study to a limited number of designs, derivatives of the concept were prototyped with the following elements:

- Form of the mesh elements: size, shape, orientation, and the axis of rotation;
- The total scale of the design: minimum size for representative results in terms of the physical phenomena.

Form-finding and visual representation helped define the form of the mesh elements. The hexagonal shape was chosen over squares as it removed physical collisions between opened flaps when the mesh was deformed, as shown in Figure 2a. Projected light simulations foreshadowed various scenarios when changing the orientation of the flaps along the mesh; hence, this parameter was selected and technically implemented into the prototype by designing a notched system (Figure 2b). Last, the size of the elements was arbitrarily set as a trade-off between the minimum size for ease of manufacture and the maximum acceptable size by the occupants in terms of view towards the exterior environment (Figure 2c).



(**a**) (**b**) (**c**)

Figure 2. All computer-aided images were made using Rhinoceros Grasshopper software. (**a**) Visual representation of potential collisions during deformations using squares vs. hexagons as base elements. (**b**) Exploration of different positions of flaps. The interchangeability was kept possible for the prototype using a 3D-printed notch-system as a flap holder, insertable into an aluminum frame as shown in the bottom images. (**c**) Qualitative determination elements with a fish-eye view from behind glazing. HD file generated using the Ladybug component.

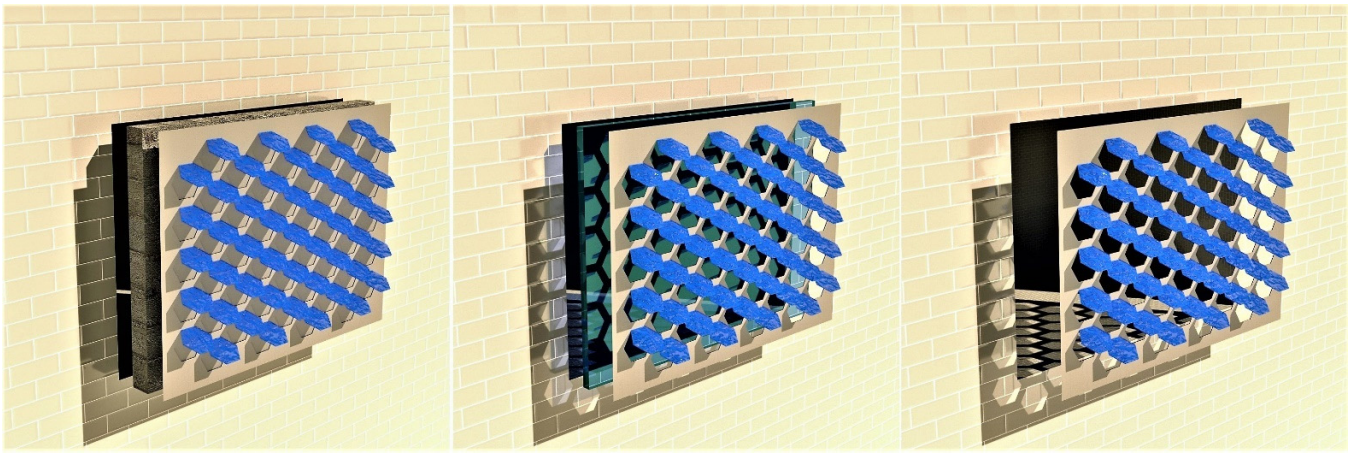
To obtain significant results in terms of physical phenomenon and overpass scale effects, mostly regarding air flows and the edge effect on thermal losses, the total design surface area was set to an arbitrary 1 m^2 for the experimentation.

All parameters chosen above are the result of feasibility considerations. They are trade-offs between the time of prototyping, cost, and complexity of construction techniques. The piloting of the flaps, for instance, was chosen to be mechanical, and manually operated.

3. Experimentation on a Prototype: Stegos Design

The concept presented in Part 2 combines multiple functions that are co-dependent and rely on a distortion coupled with deployment and auto-reactive paint. To separately assess the contribution of deployment and distortion on the thermal, light, and air properties, the authors prototyped a first version, called Stegos, with only rotating coated flaps. Three possible architectural integration configurations are considered (see Figure 3):

- 'Opaque' configuration, as part of an opaque wall;
- 'Glazing' configuration, as a smart protection envelope put in front of windows;
- 'Envelope' configuration, as an openable envelope, equivalent to a window. Although complex to implement, it would offer multiple regulation assets for warm climates.



(**a**) (**b**) (**c**)

Figure 3. (**a**) 'Opaque' configuration. (**b**) 'Glazing' configuration. (**c**) 'Envelope' configuration.

3.1. Prototyping

The prototype was manufactured to be modular and easily switched from one configuration (as described in Figure 3) to another. It was designed as an assembly of aluminum pieces and 3D-printed material. Schematics and photos of all pieces are shown in Figure 4.

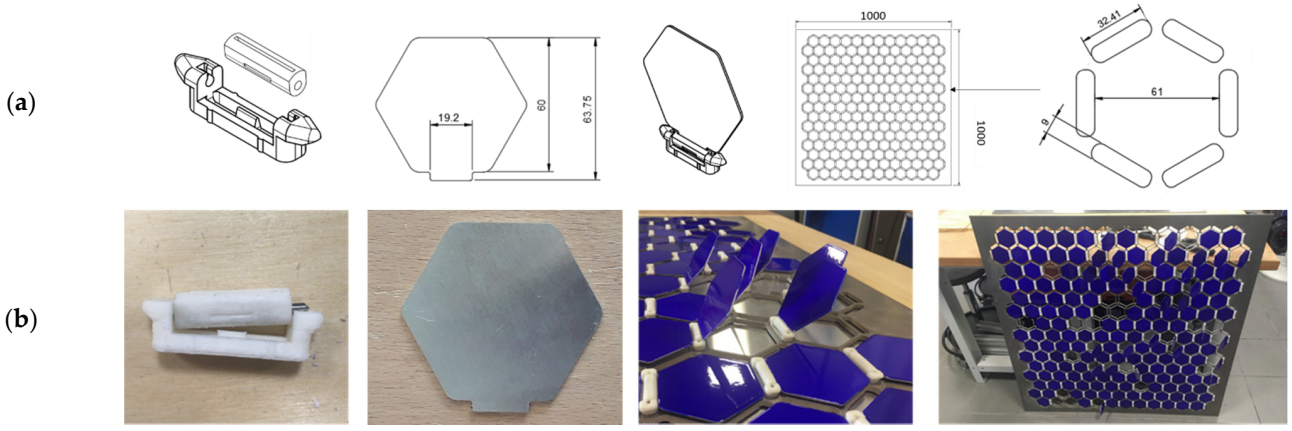


Figure 4. (**a**) Schematics of the notched system, flaps, and the aluminum frame. (**b**) Photographs of the prototype elements.

A 1 m^2 aluminum plate, 4 mm thick, was first water-jet cut as a structural support. The cutting included the edges of the frame, hexagonal holes to let light and air go through for the 'glazing' and 'envelope' configurations, and oval-shaped holes to insert the rotating flap system.

The notch system, designed to change the position and angles of the flaps according to the time of day, season, or year, was 3D-printed with ABS. It is made of two pieces, one for inserting the flaps and a second to be inserted into the aluminum frame. Both of them have ridges to create a controlled manual rotation 15° by 15°, and they are held together with a metal pin. Small edges on the side of the bottom piece ensure a mechanical holding into the aluminum frame.

The flaps were laser-cut into 1 mm thick aluminum plates. An overhang on one side of the hexagonal piece allows insertion into the notched system slit without using screws or glue. They were painted with thermochromic paint, as explained in the next section.

The assembly of these elements forms the 'glazing' and 'envelope' Stegos basic configurations. For the 'opaque' one, a 1 m^2 plain plate of 1 mm thick aluminum was added behind the system.

3.2. Thermochromic Coating

The auto-reactivity of the Stegos, a feature inspired by the emissive properties of the butterfly, was technologically translated using a thermochromic paint, i.e., whose color changes with temperature. Different pairs of colors, such as brown cream or burgundy yellow, were formulated for a temperature threshold around 45 °C, before settling with a blue white combination for the prototype. The reflectance of the thermochromic paint was measured at 20 °C and 60 °C. A spectrophotometer measuring the reflected light (specular and diffuse) was used on samples of coated aluminum plates for a wavelength between 200 nm and 2500 nm. The deduced absorption coefficient ($\alpha = 1 - R$) is shown in Figure 5. The change in color from blue to white when temperature increases is not instantaneous, but rather progressive between 40 °C and 50 °C.

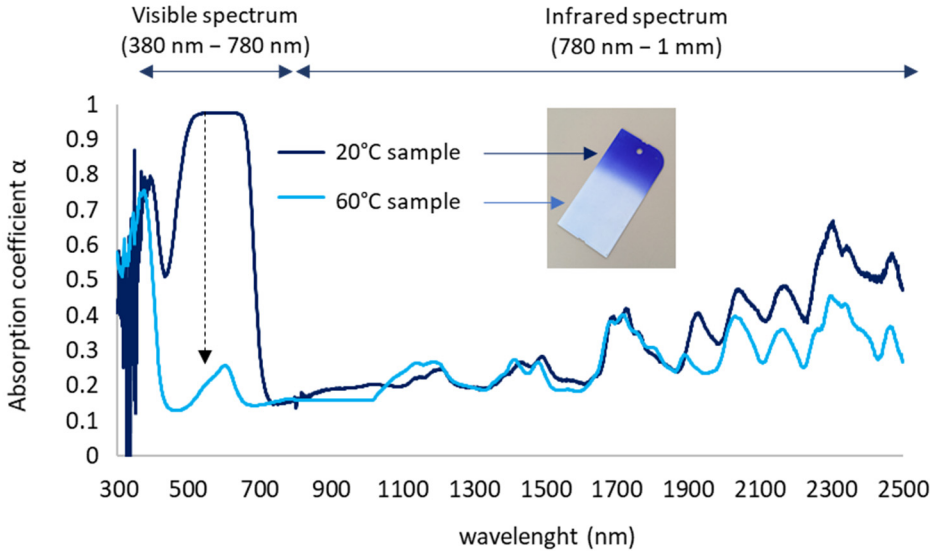


Figure 5. Absorption coefficient of paint measured at 20 °C and 60 °C. The black arrow on the graph shows a high variation in the coefficient in the visible spectrum.

When changing color from blue to white, the coating absorptivity naturally decreases in the visible spectrum (40% average decrease between 400 nm and 700 nm). As this wavelength range accounts for 40% of the total solar spectrum energy [28], such a change on a thermochromic-coated material should have a significant impact on its solar thermal absorption. The absorption coefficient is lower as well in the near-infrared wavelength

range, albeit not as significant. Therefore, when exposed to constant solar radiation, the expected behavior of a coated sample is a slowdown in the increase in temperature around the threshold temperature.

3.3. Integration in Test Box Protocol Experimentation

To observe realistic behavior as a skin, the prototype was integrated into an insulated, airtight box specifically designed for experiments in real climate conditions.

3.3.1. Test Box Design

The test box was designed to have an internal exact 1 m^3 volume (Figure 6). It was composed of six walls, one of them being interchangeable, i.e., destined for tested system façades. The other five walls were made of 8 cm of polyurethane insulation, sandwiched between oriented strand board (OSB). For structural purposes, aluminum profiles were added on their outer sides between insulation and OSB, adding an air gap of 40 mm.

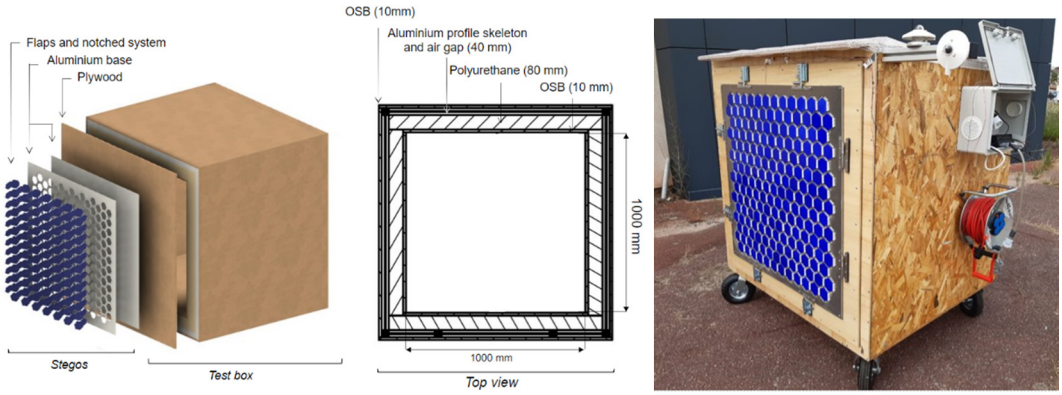


Figure 6. (**a**) Diagram of the tests box with the Stegos as an opaque wall. (**b**) Photograph of the test box with the Stegos integrated on one of the façades.

Several actions were made to avoid deterioration of the box with time owing to humidity or heavy rains while experimentations were ongoing: external OSBs were varnished, the top of the box was covered with a waterproof membrane, and a silicone joint was applied on several points to improve airtightness. A roof overhang was added as well, small enough to not create a shadow on the tested façade that would interfere with the measurements.

To be able to test the box in all orientations and to make it rotative, the test box was equipped with four steering wheels. An electric box with ventilation grids was screwed on one of the external sides to hold the monitoring instruments away from the internal conditions of the test box and protect them from climatic conditions. In fact, the issue of having them inside the box would be non-negligible disturbances on the test box internal conditions owing to generated heat.

The design of the test box allows the experiments of the Stegos in all three configurations, as illustrated in Figure 3. The 'Glazing' configuration requires replacing the plywood with a transparent wall (a synthetic glass such as Plexiglas was chosen) airtightly plastered on the test box, on which the Stegos is placed. To switch to the 'Envelope' configuration, only removing the transparent layer is needed.

3.3.2. Experimental Protocol

To monitor the weather conditions, sensors for the external air temperature, the wind, and the solar irradiance on planar surfaces were installed. Two configurations' experiments are presented in this article: the 'Glazing' and the 'Opaque' configurations for varying angles of rotation of flaps of 0°, 45°, and 90°.

The monitoring of the test box and the Stegos behaviors varied from one configuration to another as their targeted functionalities are different. When the Stegos is used as part of an opaque wall, measurements of temperature and heat-flows were inside the test box and at different layers of the tested façade. The list of all sensors is given in Table 4.

Table 4. List of installed sensors on the test bench.

Parameter	Type of Sensor	Location	Uncertainty
Solar irradiance on planar surfaces	SMP3 pyranometer (0–1600 W/m^2)	1 on plane of tested façade 1 on plane of the flaps	10 W/m^2
Wind speed	Cup wind sensor (0–35 m/s)	1 outside (plane of tested façade, 1.8 m high)	0.2 m/s
Ambient temperature	Resistance temperature detector PT100	1 outside (0.2 m away from box, 0.7 m high) 1 inside (center of box, 0.5 m high)	0.5 °C
Heat flow	Copper heat flux sensor (with tangential gradients)	11 in layers of the tested façade (Figure 7)	3%
Surface temperature	Thermocouple Type K	16 in layers of the tested façade (Figure 7)	0.5 °C

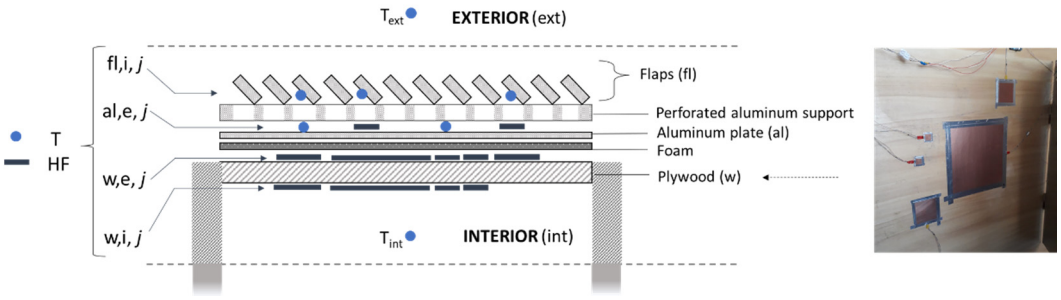


Figure 7. Repartition and nomenclature of temperature (T) and heat flux (HF) sensors using a top-view diagram of the Stegos + wall of the test box.

Thermocouple sensors taped on flaps and welded on all heat flux sensors measured surface temperature where heat flows are measured. Copper foil heat flux sensors with tangential gradients of varying sizes (surfaces from 3 mm × 3 mm to 30 mm × 30 mm, thickness of 5 mm) were duplicated on some layers; even though these sensors were all calibrated beforehand, 'incorrect' measurements were still possible because of several factors such as an improper set-up of the sensors or unpredictable issues during experimentation. The repartition of the sensors is illustrated in Figure 7. Note that a 5 mm foam was added between the aluminum plate and the plywood to ensure no air gap.

To assess the 'Glazing' configuration, the shading effect of the Stegos flaps was assessed with a camera fixed inside the test box, looking at the bottom surface in order to take a time-lapse of the projected light and shadow throughout the day.

The testing procedure starts with the installation of the presented test box equipped with the Stegos outside in Talence (close to Bordeaux), France. The typical measurement lasts 3 to 4 days with the objective to have 2 full days. The measurements were carried out between 1 August and 30 November of 2021 with south and south-west orientations and configurations as 'opaque' and 'glazing'. A series of 10 separated sequences were run.

3.4. Measurements

The flaps showed an effective color change when the surface temperature reached a temperature beyond 45 °C (Figure 8). Owing to the use of aluminum as a base material for the flaps, i.e., quite absorptive (see Figure 5) and with high thermal conductivity ($\lambda_{aluminum}$ = 230 W/m·K), a decrease or increase in very short time cycles of the solar

radiation—owing to a temporary cloud cover, for instance—had an immediate visual effect on the surface color.

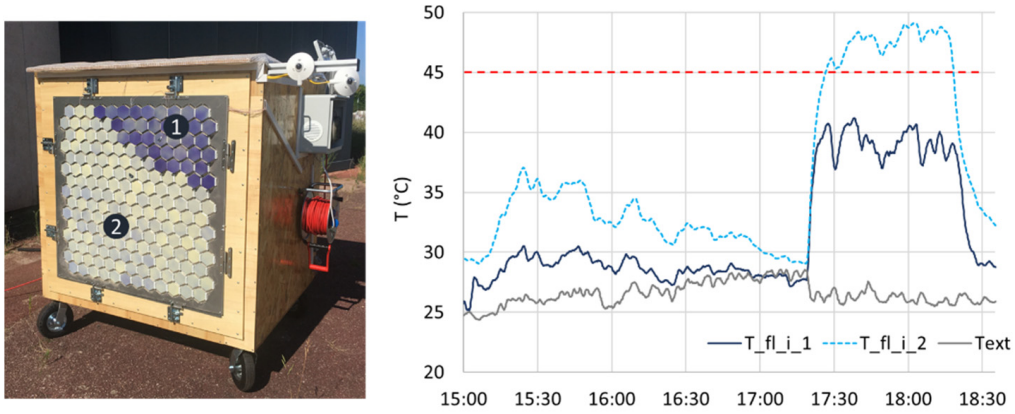


Figure 8. Photo of the test box and temperature measurements of flaps' inner surfaces performed on the afternoon of 9 August 2021 in Bordeaux, France. Flaps are rotated differently on areas 1 (angle = 30°) and 2 (angle = 0°) and the test-box orientation is west. The red line on the graph highlights the 45 °C temperature threshold for the flaps to change their color. T_{ext} is the external air temperature.

3.4.1. 'Opaque' Configuration

Measurements were performed using different test box and flap configurations. The test box was successively oriented east, south, and west. Different positions and angles for the flaps were tested:

- Position as a solar cap, i.e., the rotation axis is horizontal and on top of the base. Vertical position, i.e., the rotation axis is vertical. This configuration results in larger shadows at the beginning and end of the day when the test box is oriented south, whereas the solar cap position will have larger shadows during mid-day;
- Angle of rotation of claps of 0°, 45°, and 90°.

Data measured during several days with closed flaps and test box oriented south are given in Figure 9. The total inertia of the test box can be observed by identifying the phase shift between the inside and outside ambiant temperatures. The heatflows measured in different layers of the tested wall (Stegos + wall) decrease from the external layer to the internal layer. This difference is particulary high between the external surfaces of the aluminum and the plywood (HF_al_e and HF_w_e, respectively). It can be explained by the fact that the heat collected by the flaps is transferred to the 1 mm aluminum sheet and then conducted to its perimeter, owing to its high conductivity. The heat is then dissipated by convection. Accordingly, we will improve the experimental design by adding an insulation frame to the aluminum sheets.

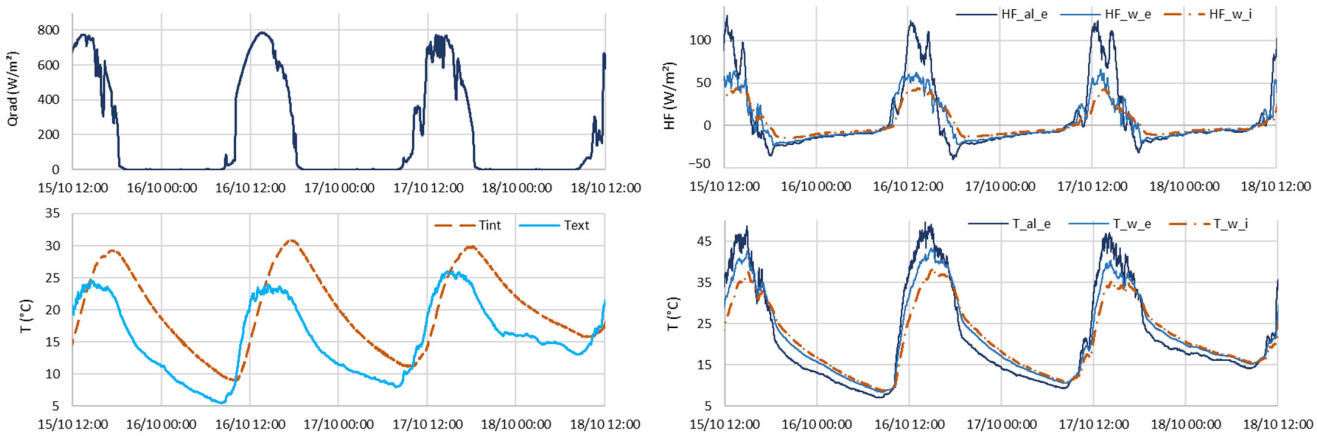


Figure 9. (**Top left**) Incident solar radiation, (**bottom left**) internal and external air temperatures, (**top right**) heat flows, and (**bottom right**) associated temperatures in the tested façade from November 15 to November 18, 2021. Test box oriented south, angle of flaps = 0°.

A direct comparison between the two configurations is shown in Figure 10. For similar days (maximum solar radiation and outside temperture around 800 W/m^2 and 23 °C, respectively), a difference of about 13% can be observed on heat flows measured at the inner surface of the Stegos aluminum during sunlight hours. This could mean that the solar cap configuration—horizontal axis of rotation and 90° angle of flaps—transfers more heat into the test box at this time of the year; however, it is not consistent with the measured internal air temperatures, which appear to be very similar. As the measurements are shown, it is not possible to determine whether the Stegos has an insignificant impact on the test box conditions or whether the external conditions from the previous day are still having an impact.

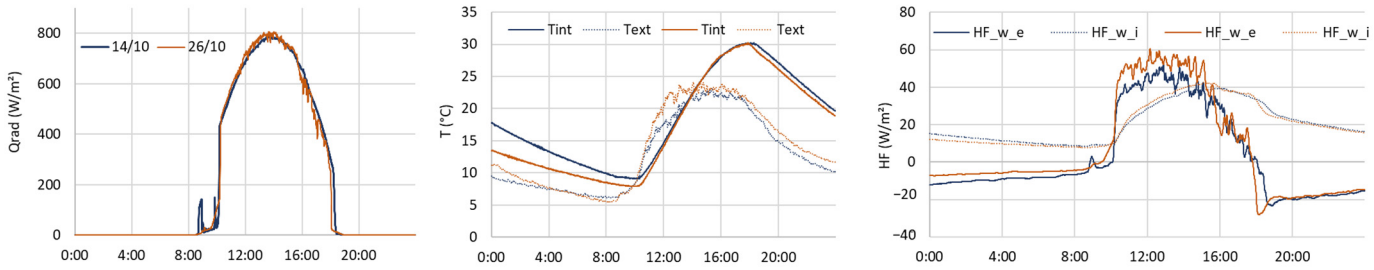


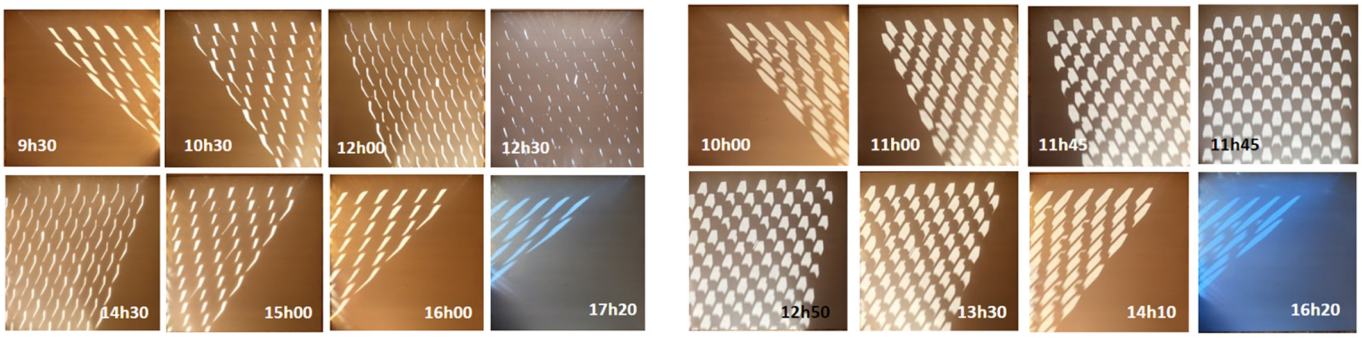
Figure 10. Layering of measurements performed on the test box during two separate days. Incident solar radiation, air temperatures, and heat flows. Measurements on 14 October 2021: closed flaps. Measurements on 26 October 2021: opened flap with a 90° angle, along a horizontal rotation axis (solar cap configuration).

3.4.2. 'Glazing' Configuration

Photos of the experimentation set for the Stegos 'glazing' are shown in Figure 11. Pictures of the projected light and shadow on the bottom surface every 10 min of the day were taken using the camera fixed on top of the test box. The configuration sets for the test box were identical to the ones used for the experimental protocol of the 'opaque' configuration.

Figure 11. Photos of the Stegos 'glazing' configuration on the test box with claps positioned as solar caps and opened to a 90° angle. Camera fixed on the roof wall of the test box.

The difference illustrated in Figure 12 between flap angles of 45° and 90° is visible and expected with the sun elevation in November in France.



(**a**) (**b**)

Figure 12. Light and shadow projection on the floor of the test box at different hours of the day for two opening angles of flaps: (**a**) angle at 45° on November 12, and (**b**) angle at 90° on November 16. Blue light at the end of the day is due to more diffuse illumination than the rest of the day.

3.5. Discussion

The measurements performed on the 'opaque' configuration do not provide direct conclusions on the Stegos performance and its impact on a controlled volume as the test box. While useful for the characterization using geometrical and thermal models, difficulties in comparing different sets between each other are arguments to perform, in the near future, with new experimentations with the following modifications:

- Addition of insulation on the tested façade for more impact on the whole test box behavior;
- Coating of the aluminum plate with a black matte paint to reduce reflection induced by the high reflectivity of aluminum and thus increase incoming heat flows. This should help to compare different sets;
- Switch flaps coated with the blue, thermochromic paint for white- and black-painted flaps to compare the results with extreme colors and determine the contribution of the adaptive paint on the Stegos performance.

4. Towards Characterization through the Calibration of Grey Box Models

To face practical production challenges and collect feedback on bioinspired practice, the authors experimented with design processes through the prototyping of the Stegos system and the creation and use of a test bench. Several measurement campaigns (described in Part 3) provided a first assessment of the system and guidelines for improved measurements. However, intricate physical phenomena, including radiative, convective, and conductive transfers, are still to be described to define better alternatives of the concept in regards to the pursued functionalities. For this, a coupling between parametric geometric models and heat transfer models is proposed and described in the following sections.

4.1. Geometric Parametric Design

A geometrical model of the prototype integrated into the test box was created under Rhinoceros Grasshopper. Geometrical parameters, either related to the Stegos or to the general set (orientation, weather, and date), were defined as variables to be tested and compared with regard to various indicators related to air, light, and heat regulation functionalities, as displayed in Figure 13.

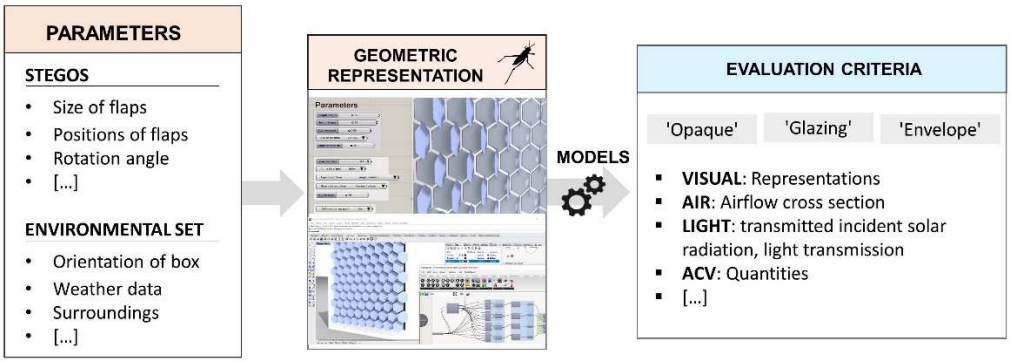
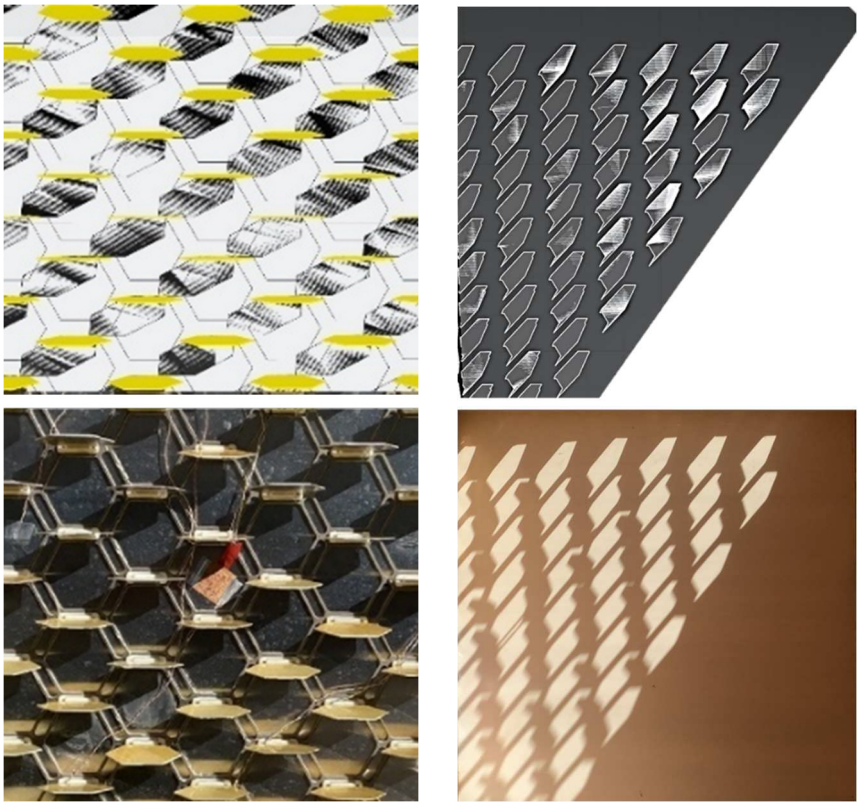


Figure 13. Steps followed during the geometric modeling of the Stegos design implemented in the test box: (from left to right) definitions of parameters, implementation in Rhinoceros Grasshopper, use of embedded models, and evaluation according to various criteria.

In the 'glazing' configuration, the Stegos acts as a solar shading device and thus as a light-management system. The objective here is to validate the geometrical representation through Rhinoceros Grasshopper. For this purpose, a daylight analysis was performed on a southern-fixed orientation, located in Bordeaux (France), and with dates set as the dates of the experiments described in Part 3. The angles of the flaps varied from 0 to 90° and were positioned horizontally. A comparison between the simulation on Grasshopper and photographs of the experiments illustrated in Figure 14 shows very similar light projections. It is important to note that this comparison can only be qualified as qualitative, as the authors do not provide numerical analysis of the photographs and because of inevitable distortions due to perspective.



(**a**) (**b**)

Figure 14. Comparisons between simulations on Rhinoceros Grasshopper and photographs of Stegos in solar cap configuration. (**a**) Comparison of the vertical shadow for an angle of 90°. Date: 27 October 12:00. (**b**) Comparison of the horizontal shadow on the floor of the test box for an angle of 90°. Date: 19 November 15:00.

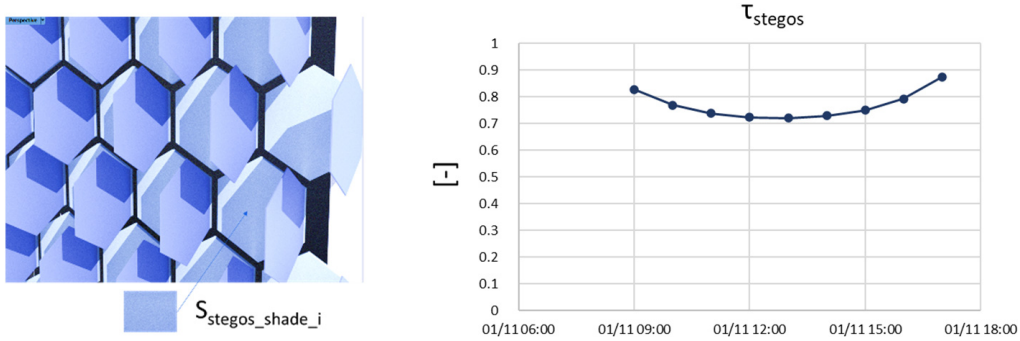
The results of these simulations alone are not sufficient to provide satisfactory design configuration in regards to light regulation in the 'glazing' scenario. To be validated, they would require the use of other criteria—for instance, daylight or glare analysis showing adequate lighting in the enclosure during winter. In this sense, multi-objective optimization would be adequate.

Nevertheless, a comparison of the simulations with measured projections validates the geometrical modeling, and it can provide valuable inputs to better detail the external boundary conditions in a heat-transfer model. We define two parameters, the horizontally projected shadow $g_{floor,Stegos}$ and the vertically projected shadow τ_{Stegos} on the tested façade. Those can be simulated and be inputs of the 'glazing' and 'opaque' façade thermal model, respectively:

$$g_{floor,stegos} = 1 - \frac{S_{floor,shade}}{S_{floor,tot}} \quad (1)$$

$$\tau_{Stegos} = 1 - \frac{S_{Stegos,shade}}{S_{Stegos,tot}} \quad (2)$$

with $S_{floor,shade}$ indicating the shaded surface on the test box floor, $S_{floor,tot}$ indicating the total surface area of the test box floor, $S_{Stegos,shade}$ indicating the shaded surface on the Stegos, and $S_{Stegos,tot}$ indicating the total surface area of the tested façade (Figure 15).



(**a**) (**b**)

Figure 15. (**a**) The shaded surface on the Stegos is the sum of all $S_{Stegos_shade_i}$. (**b**) Simulated τ_{Stegos} for the 1 November (data for location: Bordeaux, France).

The Rhinoceros Grasshopper model was used to calculate one value of the τ_{Stegos}, needing 30 s computational time on a regular office computer.

4.2. Heat-Transfer Models: Grey-Box Approach Proposal

The complexity of the physical phenomena taking place in the Stegos integrated into the test box prevents proposing a fully descriptive model. An alternative is to use partial theoretical models coupled with data from performed measurements (Part 2), known as the grey-box approach.

An RC (resistance, capacitance) model is proposed and represented in Figure 16. The following hypotheses and simplifications are considered:

- The tested façade, including Stegos, is considered as a semi-infinite environment, meaning that it is extending to infinity in all three directions, but only on one side of a plane, here, the external environment.
- Only one layer of aluminum is included in the model; the 4 mm support frame is perforated with hexagonal holes and can thus be neglected.
- The heat transfers are considered in one dimension, with internal boundary conditions based on the internal air temperature and a fixed convective coefficient. Additionally, the external boundary condition is given by the weather measurement.
- The proposed model includes conductive, convective, and longwave radiative heat transfers between the outside surface of Stegos (the aluminum plate) and the external environment in a single thermal resistance.
- The incident solar radiation is taken into account in two ways. The first contribution is expressed as direct and diffuse radiation on the external surface of the aluminum plate using the projected shadow ratio calculated with geometrical models (see Part 3.1). A second contribution is provided through a factor f_{Stegos}, which represents a solar intake in the Stegos through the flaps.

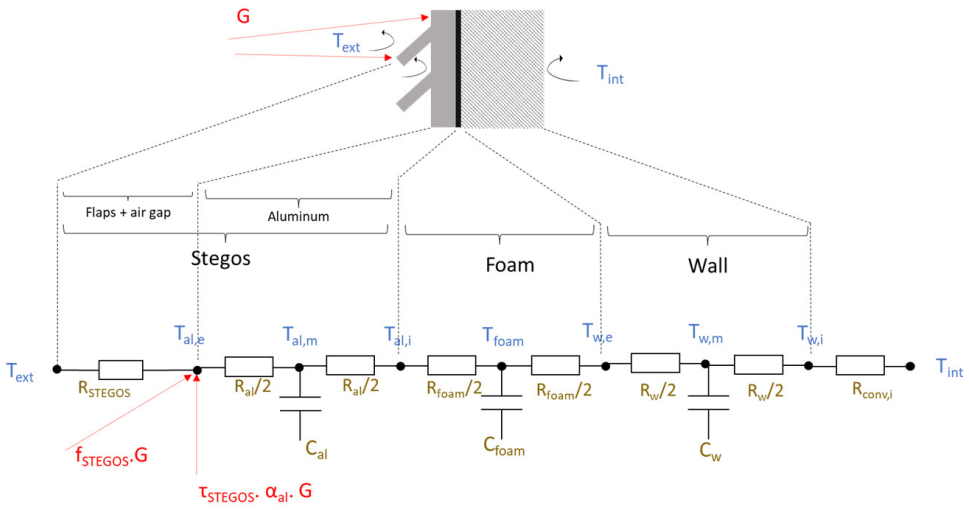


Figure 16. RC model of the wall assembly (case of 'opaque wall' configuration) with C_i thermal capacities and R_i thermal resistances of the nodes.

5. Conclusions and Prospects

In this paper, we presented an envelope design derived from a bioinspired framework. The system is a deformable and deployable skin, which can be positioned in front of an opaque wall, as a glazing, or as the envelope itself. According to the configuration, it can manage multiple regulation factors, such as heat, light, and air. Moreover, the deployable elements are coated with an adaptive paint, in which the absorption coefficient changes with the surface temperature.

A non-deformable but deployable version was prototyped and integrated into an orienTable 1 m^3 insulated box as a test bench. Measurements of heat and light transfers were performed for the opaque and glazing configurations. Limitations were identified in the experimental protocols owing to the high reflectivity of the internal aluminum layer limiting the solar gains, and as such, mitigating the impact of Stegos as a solar-shading device. This layer will be painted in black, resulting in higher heat transfers and allowing better identification of the impact of each parameter.

The proposed bioinspired design methodology was experimented with at the beginning of the project and resulted in the Stegos design. Feedback from this experience allows it to further improve its implementation, especially with the additional data.

Future work includes the implementation of the 'envelope' configuration in the test bench to perform measurements of thermal, light, and air transfers. A deformable version of the concept is also planned to be prototyped and tested as well.

A follow-up of this project will be a generic methodology for the characterization of dynamic envelope elements, such as a Stegos prototype based on the calibration of a model against measurements on similar protocols. The introduced parameters R_{Stegos} and f_{stegos} of the proposed RC model characterize the impact of Stegos on the opaque wall, but they are not fully descriptive. We will use optimization methods to identify those parameters in this generic grey-box model and stochastic methods using pseudo aleatory exploration processes. Once calibrated, the model can be applied to design new, more efficient versions of Stegos, and it will offer the opportunity to numerically integrate such an innovative envelope element in thermal buildings' simulation platforms to evaluate its global impact on different buildings.

Author Contributions: Conceptualization, T.H., A.D., T.V.W., F.A. and D.B.; methodology, T.H., A.D., T.V.W., F.A. and D.B.; validation, D.B. and F.A.; data curation, T.H.; energy models, T.H. and A.D.; writing—original draft preparation, T.H.; writing—review and editing, T.H., A.D., T.V.W., F.A. and D.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was carried in the frame of the BIOINSPIRED project, funded by the Regional Committee of Nouvelle Aquitaine (CNRA) and the Investments for the Future Program (PIA).

Data Availability Statement: Publicly available datasets were analyzed in this study. The data can be found at https://doi.org/10.5281/zenodo.5762420 (accessed on 21 January 2022).

Acknowledgments: Additional help came from Damien Decker for the prototyping and measurements, Saeed Kamali for the illustrations, and Myriame Ali-Oualla and Kaïs Bhouri for contributing to the Stegos concept. The authors thank them.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Nomenclature

T	Temperature (°C) or (K)
HF	Heat flux (W/m^2)
S	Surface (m^2)
A	Absorption coefficient (-)
R	Reflectance (-)
τ	Solar transmission coefficient (-)
λ	Thermal conductivity (W/m·K)
R	Thermal resistance (K/W)
h	Transmitted heat coefficient (W/K)
C	Heat capacity (J/K)
G	Normal direct and diffuse solar radiation (W/m^2)

Abbreviations

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
OSB	Oriented strand board

References

1. Grosso, A.E.D.; Basso, P. Adaptive Building Skin Structures. *Smart Mater. Struct.* **2010**, *19*, 124011. [CrossRef]
2. Aelenei, D.; Aelenei, L.; Vieira, C.P. Adaptive Façade: Concept, Applications, Research Questions. *Energy Procedia* **2016**, *91*, 269–275. [CrossRef]
3. FACADE 2018—Adaptive! Final Conference—COST Action TU1403—Adaptive Facades Network. Available online: http://tu1403.eu/?page_id=1291 (accessed on 26 November 2021).
4. Final Booklet Series COST TU1403—COST Action TU1403—Adaptive Facades Network. Available online: https://tu1403.eu/?page_id=1562 (accessed on 21 January 2021).
5. Benyus, J.M. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*; Nachdr.; Perennial: New York, NY, USA, 2009; ISBN 978-0-06-053322-9.
6. Mazzoleni, I.; Maya, A.; Bang, A.; Molina, R.; Barron, F.; Pei Li, Y. Biomimetic Envelopes: Investigating Nature to Design Buildings. In *Proceedings of the First Annual Biomimicry in Higher Education Webinar*; The Biomimicry Institute: Missoula, MT, USA, 2011; pp. 27–32.
7. Knippers, J.; Nickel, K.G.; Speck, T. (Eds.) *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction*; Biologically-Inspired Systems; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016; Volume 8, ISBN 978-3-319-46372-8.
8. López, M.; Rubio, R.; Martín, S.; Croxford, B. How Plants Inspire Façades. from Plants to Architecture: Biomimetic Principles for the Development of Adaptive Architectural Envelopes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *67*, 692–703. [CrossRef]
9. Cruz, E.; Hubert, T.; Chancoco, G.; Naim, O.; Chayaamor-Heil, N.; Cornette, R.; Menezo, C.; Badarnah, L.; Raskin, K.; Aujard, F. Design Processes and Multi-Regulation of Biomimetic Building Skins: A Comparative Analysis. *Energy Build.* **2021**, *246*, 111034. [CrossRef]
10. Wanieck, K.; Fayemi, P.-E.; Maranzana, N.; Zollfrank, C.; Jacobs, S. Biomimetics and Its Tools. *Bioinspired Biomim. Nanobiomater.* **2017**, *6*, 53–66. [CrossRef]
11. Chakrabarti, A.; Blessing, L. A Review of Theories and Models of Design. *J. Indian Inst. Sci.* **2015**, *95*, 16.
12. Hatchuel, A.; Weil, B. C-K Design Theory: An Advanced Formulation. *Res. Eng. Des.* **2009**, *19*, 181–192. [CrossRef]
13. Fayemi, P.-E. Innovation Par La Conception Bio-Inspiree: Proposition D'un Modele Structurant Les Methodes Biomimetiques Et Formalisation D'un Outil De Transfert De Connaissances. Ph.D. Thesis, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers—ENSAM, Paris, France, 2016.
14. Salgueiredo, C.F.; Hatchuel, A. Modeling Biologically Inspired Design with The C-K Design Theory. In Proceedings of the International Design Conference—DESIGN 2014, Dubrovnik, Croatia, 19–24 May 2014.
15. Jacobs, S.R.; Nichol, E.C.; Helms, M.E. "Where Are We Now and Where Are We Going?" The BioM Innovation Database. *J. Mech. Des.* **2014**, *136*, 111101. [CrossRef]

16. Chirazi, J.; Wanieck, K.; Fayemi, P.-E.; Zollfrank, C.; Jacobs, S. What Do We Learn from Good Practices of Biologically Inspired Design in Innovation? *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 650. [CrossRef]
17. Graeff, E.; Maranzana, N.; Aoussat, A. Biomimetics, Where Are the Biologists? *J. Eng. Des.* **2019**, *30*, 289–310. [CrossRef]
18. Hubert, T.; Wu, T.V.; Dugué, A.; Bruneau, D.; Aujard, F. A Framework for the Design of Bioinspired Building Envelopes: Case Study of An Adaptive Skin Inspired by the Morpho Butterfly. In Proceedings of the Advanced Building Skin Conference, Bern, Switzerland, 21–22 October 2021; p. 9.
19. *ISO 18458:2015*; Biomimetics—Terminology, Concepts and Methodology. Beuth Verlag: Berlin, Germany, 2015; 27.
20. Farzaneh, H.; Helms, M.; Muenzberg, C.; Lindemann, U. Technology-Pull And Biology-Push Approaches in Bio-Inspired Design—Comparing Results from Empirical Studies On Student Teams. In Proceedings of the International Design Conference—DESIGN 2016, Dubrovnik, Croatia, 16–19 May 2016.
21. Hansell, M.H. *Built by Animals: The Natural History of Animal Architecture*; 1. publ. in paperback.; Oxford University Press: Oxford, UK, 2009; ISBN 978-0-19-920557-8.
22. Badarnah, L. Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation. *Buildings* **2017**, *7*, 40. [CrossRef]
23. Cruz, E. Multi-Criteria Characterization of Biological Interfaces: Towards the Development of Biomimetic Building Envelopes. Ph.D. Thesis, MNHN, Paris, France, 2021.
24. Research unit CNRS-MNHN 7179 MECADEV—Adaptive Mechanisms & Evolution. Available online: https://mecadev.cnrs.fr/index.php?navlang=en (accessed on 26 November 2021).
25. Chapman, R.F.; Simpson, S.J.; Douglas, A.E. *The Insects: Structure and Function*, 5th ed.; Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2013; ISBN 978-0-521-11389-2.
26. Van Hooijdonk, E.; Berthier, S.; Vigneron, J.-P. Contribution of Both the Upperside and the Underside of the Wing on the Iridescence in the Male Butterfly *Troïdes Magellanus* (Papilionidae). *J. Appl. Phys.* **2012**, *112*, 74702. [CrossRef]
27. Berthier, S. Thermoregulation and Spectral Selectivity of the Tropical Butterfly Prepona Meander: A Remarkable Example of Temperature Auto-Regulation. *Appl. Phys. A* **2005**, *80*, 1397–1400. [CrossRef]
28. Bhatia, S.C. Solar Radiations. In *Advanced Renewable Energy Systems*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014; pp. 32–67. ISBN 978-1-78242-269-3.

3.3.3.4.2 Points clés de l'article

- **Mesures sur STEGOS en configuration opaque** - Les mesures réalisées ne permettent pas une comparaison directe de l'impact du STEGOS selon l'ouverture de ses clapets.
- **Mesures sur STEGOS en configuration vitrage** - Les mesures permettent la validation d'un modèle géométrique de projection solaire sur la paroi et dans la boîte test.
- **Retours sur l'installation expérimentale** - L'observation de l'impact du STEGOS en tant que protection solaire est limitée par une réflectivité élevée de la fine couche d'aluminium située derrière les clapets, et une isolation trop faible de la paroi opaque testée.
- **Modèle thermique** - Le modèle thermique proposé est un premier pas vers la caractérisation du STEGOS. De nouvelles mesures sont à réaliser, pour les intégrer dans les modèles boîtes grises. Une fois calibrés, ces modèles pourront être utilisés pour la conception des versions plus performantes du STEGOS, et offrir la possibilité d'intégrer numériquement un tel élément d'enveloppe innovant dans des outils de simulation thermique de bâtiments pour évaluer son impact global.

3.3.4 Suite de l'expérimentation

Nous présentons dans cette partie les expérimentations qui ont suivi celles présentées dans l'article **Energies**.

3.3.4.1 Revêtement thermochromique

Comme indiqué dans la partie **3.4. Measurements** de l'article *« An Adaptive Building Skin Concept Resulting from a New Bioinspiration Process: Design, Prototyping, and Characterization »* (Hubert *et al.*, 2022), un changement effectif de couleur pour une température supérieure à 45°C sous rayonnement solaire est observable sur les clapets. Les clapets étant en aluminium peints avec une peinture plutôt absorbante, de faible épaisseur et conductifs, leur température peut varier rapidement. Le passage provisoire de nuages, ou une simple ombre créée sur la paroi, permet d'observer à l'œil nu la transition entre le bleu et le blanc (voir Figure 3.34).

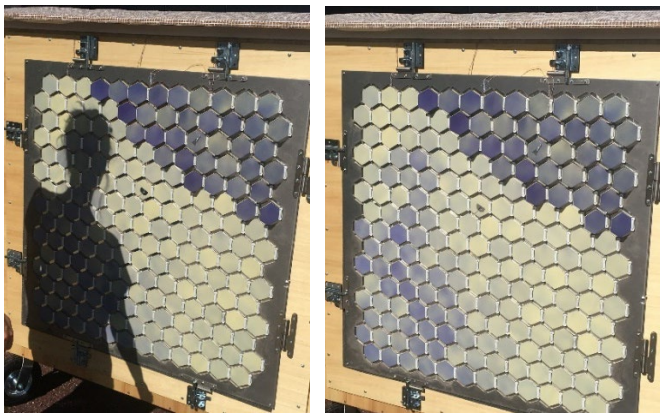


Figure 3.34 - Effet d'une ombre de 10 secondes sur la paroi ensoleillée : les clapets baissent en température et tendent vers la couleur bleue à température inférieure à 45°C.

Cette observation des modifications de couleur pendant une durée d'ensoleillement souligne que le cahier des charges pour la formulation de la peinture thermochromique est validé. Notons cependant qu'une dégradation rapide de la peinture a été observée au cours des premières mesures. La peinture a dans un premier temps pali, les couleurs bleue et blanche étant moins vives. Elle est ensuite devenue inhomogène, en tirant progressivement vers le jaune. La Figure 3.35 montre l'évolution des clapets, entre début juillet et début septembre.

Après vérification auprès d'OliKrom, ayant réalisé le pigment et appliqué la peinture, nous avons eu confirmation que ce changement de couleur est dû au rayonnement solaire, et plus spécifiquement à son rayonnement ultra-violet (UV). Si la société a déjà développé et testé des peintures thermochromiques avec d'autres partenaires, les applications sont différentes : le changement de couleur est plutôt utilisé pour la détection d'anomalies ou de changements brusques de température dans des processus industriels, et n'est pas soumis au même rayonnement UV que les clapets. Des modifications à la formulation de la peinture sont actuellement en cours, en vue d'augmenter sa résistance aux UV, et donc sa durabilité qui permettraient des expérimentations plus longues, voire même une durée de vie suffisante pour intégrer un système d'enveloppe du bâtiment.

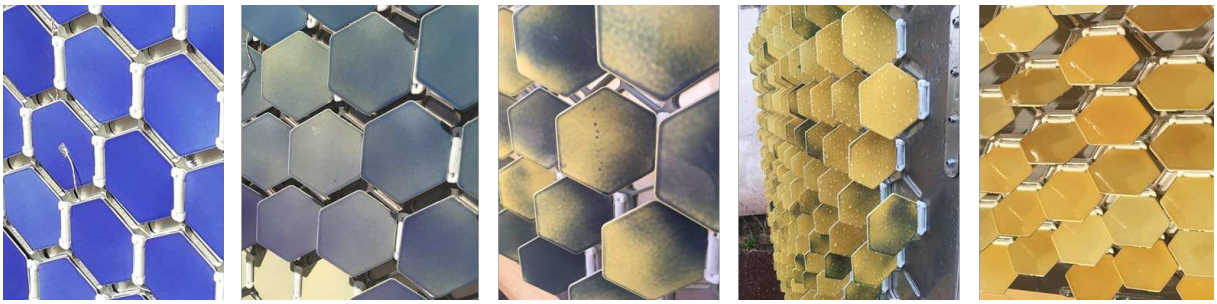


Figure 3.35 - Dégradation progressive du revêtement thermochromique visible par le changement de couleur.

3.3.4.2 Modifications réalisées sur le STEGOS

En conséquence des dégradations observées, la propriété thermochromique auto-réactive attendue sur le prototype a disparu du STEGOS. L'alternative suggérée dans *« An Adaptive Building Skin Concept Resulting from a New Bioinspiration Process: Design, Prototyping, and*

Characterization » (Hubert *et al.*, 2022) de remplacer les clapets devenus jaunes par des clapets aux couleurs « extrêmes », opposées en termes de propriétés émissives ou absorbantes, noire et blanche, a été choisie. La Figure 3.36 présente les coefficients d'absorption des nouveaux clapets, mesurés par spectrophotomètre par le fournisseur du revêtement thermochromique.

De manière attendue, les peintures noire et blanche affichent respectivement dans la gamme du visible (380 nm à 780 nm) des coefficients d'absorption proches de 1 et de 0. Ils sont par ailleurs assez constants dans le spectre infrarouge (IR) : le coefficient d'absorption des clapets noirs appartient à un intervalle compris en 0,87 et 0,99, et celui des clapets blancs entre 0 et 0,20. Contrairement à la peinture thermochromique bleue, ces peintures classiques ont une faible différence entre leur valeur moyenne dans la gamme du visible et celle mesurée dans une partie de l'IR. Les propriétés absorbantes des clapets revêtus de ces peintures devraient donc se démarquer lors des essais menés.

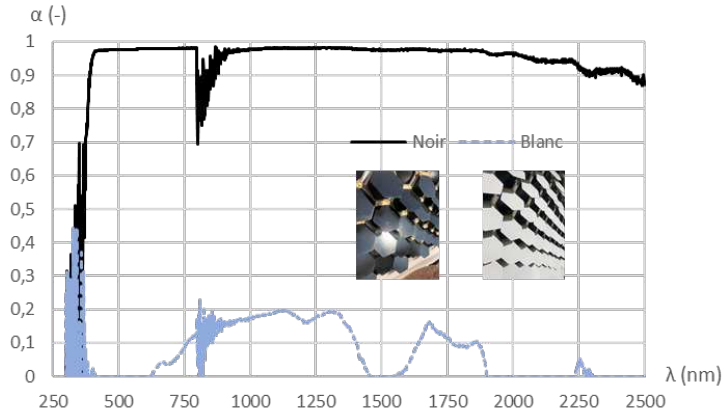


Figure 3.36 - Coefficient d'absorption des clapets mesuré avec un spectrophotomètre avec les revêtements noir et blanc. N.B. : Le bruit observé à 800 nm est lié à l'appareil de mesure utilisé.

Le décrochement observé à 800 nm est un bruit lié à l'appareil de mesure utilisé, lors du passage du spectre visible au spectre IR.

3.3.4.3 Modifications réalisées sur la boîte test

Les premières mesures présentées dans *« An Adaptive Building Skin Concept Resulting from a New Bioinspiration Process: Design, Prototyping, and Characterization »* (Hubert *et al.*, 2022) ont mis en avant des axes d'amélioration pour le banc d'essai, notamment le renforcement de l'isolation de la façade pour un impact plus important sur le comportement de la boîte test, et la peinture de la plaque d'aluminium d'1 mm en noir de façon à réduire sa réflectivité et augmenter les transferts de chaleur dans le STEGOS.

Pour répondre à ces deux propositions, une couche de polystyrène de 25 mm a été ajoutée sur la face intérieure de la paroi testée (Figure 3.37a). Le panneau isolant, découpé aux dimensions 1 m x 1m, a été inséré par l'intérieur. Une mousse expansive isolante a été ajoutée sur tout le contour afin de limiter les ponts thermiques. En parallèle, la fine plaque d'aluminium a été peinte en noir puis réintégrée à la façade (Figure 3.37b).

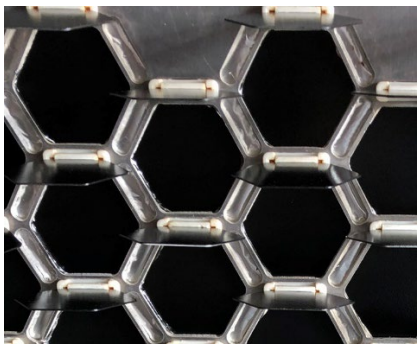
(a) (b) 

Figure 3.37 - Modification apportées au banc d'essai : (a) ajout d'un isolant polystyrène sellé avec de la mousse expansive, (b) revêtement noir de la face externe de la couche aluminium d'1 mm située derrière les clapets.

Par ailleurs, une forte différence entre les densités de flux thermiques mesurés sur l'aluminium et sur le contreplaqué ($HF_{al,e}$ et $HF_{w,e}$) a également été remarquée, probablement expliquée par la conduction de la chaleur transversale dans la plaque aluminium et un échange convectif entre le contour aluminium et l'air ambiant. Pour pallier cela, de la mousse isolante adhésive a été positionnée sur tout le contour du STEGOS. Une mousse blanche (2 mm d'épaisseur) recouvre une première couche de mousse épaisse (5 mm d'épaisseur) pour diminuer au maximum les échanges thermiques sur ce périmètre extérieur de la plaque aluminium (Figure 3.38).

Figure 3.38 - Ajout de mousse noire puis blanches sur le contour aluminium de 4 mm.

Après les modifications, deux fluxmètres ont été ajoutés côté intérieur de la façade testée. La nouvelle nomenclature (avec ajout de l'isolant) est présentée en Figure 3.39.

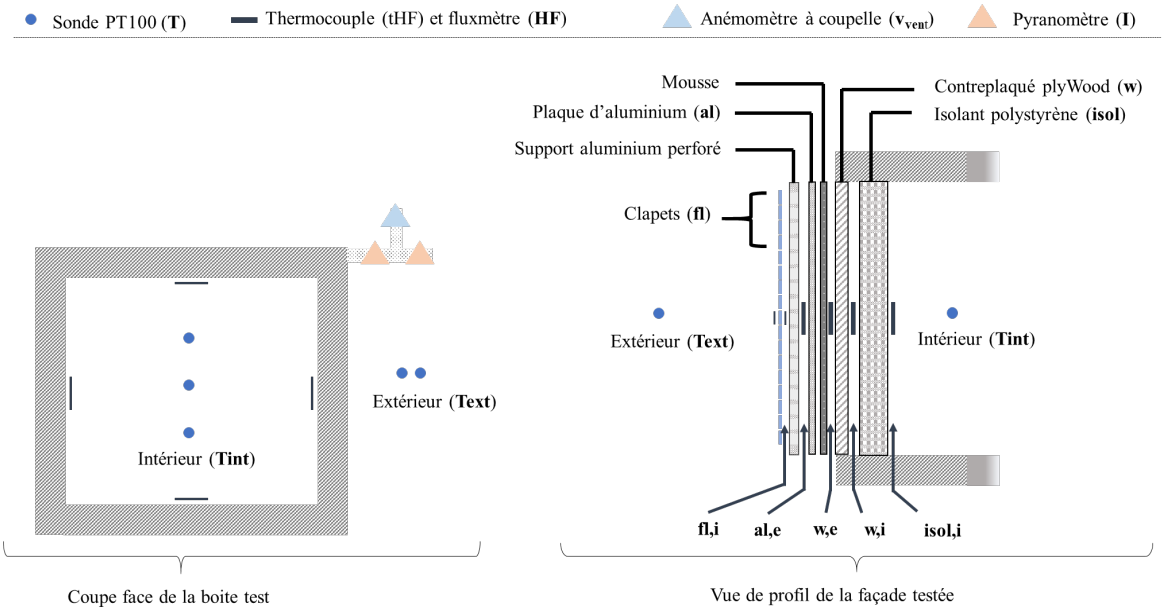


Figure 3.39 - Nomenclature et positions des capteurs dans la boîte et la façade testée après modification du banc d'essai.

3.3.4.4 Tableau récapitulatif des données matériaux

Les propriétés des matériaux utilisés pour la boîte, la façade et le prototype sont présentées dans le Tableau 3.4. Les propriétés utilisées sont basées sur les fiches fournisseurs des matériaux ou sur la littérature.

Tableau 3.4 - Caractéristiques des différentes couches composant le prototype STEGOS et la boîte test

	Epaisseur e (mm)	Conductivité λ (W/m.K)	Masse volumique ρ (kg/m^3)	Capacité thermique massique C_p (J/kg.K)	Capacité thermique C (J/K)	Résistance thermique R (K/W)
STEGOS						
Aluminium	1	10	2700	897	2420	10^{-5}
Mousse	4	0,06	20	1000	80	0,667
Contreplaqué	10	0,13	450	1200	5400	0,077
Isolant	25	0,025	32.5	1000	812,5	1
Boîte test						
OSB	20	0,13	450	1200	10800	0,154
Isolant	80	0,025	32.5	1000	2600	8

3.3.4.5 Chronologie et séquences des mesures

Les mesures avec clapets bleus ont débuté en juillet 2021 et se sont achevées fin aout après dégradation naturelle de la peinture thermochromique sous les effets des rayons UV du rayonnement solaire. Dû au manque de capteurs installés sur le banc d'essai (attente de livraison), les mesures partielles réalisées sont insuffisantes pour évaluer l'impact de la peinture sur le STEGOS. Elles ont néanmoins permis d'observer les changements de couleur associés à des hausses et baisses de température.

Une fois la peinture devenue totalement jaune et non thermochromique, les mesures de projections solaires en configuration vitrage ont été réalisées de septembre à octobre (voir partie **3.4.2. 'Glazing' Configuration** de l'article **Energies**).

Après l'ajout d'une couche isolante à la paroi testée et de mousses sur le cadre et contour aluminium du STEGOS, les clapets jaunes ont été changés par des clapets noirs. Les mesures ont duré de février à mars 2022. Enfin, des clapets blancs ont remplacé les clapets noirs, pour des mesures similaires de mars à avril 2022. Le Tableau 3.5 indique la chronologie en fonction des clapets installés sur le STEGOS.

Tableau 3.5 - Chronologie des mesures sur la boîte test de Juillet 2021 à avril 2022.

Juillet 2021 - Aout 2021

Septembre 2021 - Octobre 2021

Février 2022 - Mars 2022

Mars 2022 - Avril 2022

Les campagnes de mesures réalisées sont présentées dans le Tableau 3.5 selon la couleur des clapets, la date et le degré d'ouverture des clapets.

Tableau 3.6 - Séquences des mesures réalisées.

Clapets	N° seq.	Début	Fin	Ouverture clapets
Noirs	1	01/02/2022 17:00	14/02/2022 11:00	0°
	2	14/02/2022 12:00	28/02/2022 17:00	90°
	3	28/02/2022 18:00	07/03/2022 10:00	45°
Blancs	4	07/03/2022 13:00	14/03/2022 09:00	45°
	5	14/03/2022 10:00	21/03/2022 09:00	0°
	6	21/03/2022 10:00	04/04/2022 18:00	90°
	7	04/04/2022 20:00	08/04/2022 19:00	90°

Durant la fin de la séquence n°6, des poussières désertiques, émises depuis le nord du Maghreb et amenées par dépression au large de l'Atlantique, se sont déposées sur certaines régions de France dont l'Aquitaine. Celles-ci ont relativement peu sali les clapets mais ont laissé de fines couches sur les pyranomètres (voir Figure 3.40a). La campagne correspondant à la couleur de clapet et à l'ouverture a été répétée, via la séquence n°7. Cette dernière est courte, car de forts vents liés à l'arrivée de la tempête Diego ont poussé à l'interruption des mesures (voir les

clapets tombés à cause du vent sur la Figure 3.40b). L'analyse de la configuration clapets blancs ouverts à 90° sera donc faite sur le début de la séquence n°6 (mars uniquement) et de la séquence n°7.

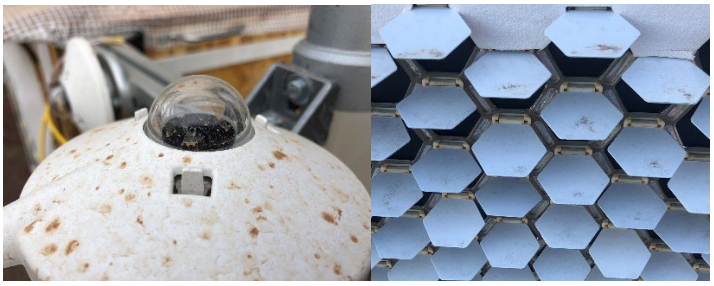
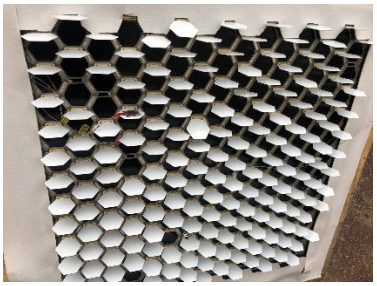
(a)  (b) 

Figure 3.40 - Impacts de (a) dépôt de sable et (b) vent fort sur la mesure et sur les clapets.

Afin de limiter les bruits de mesure sur toutes les séquences, une moyenne mobile de 5 minutes est appliquée sur toutes les mesures exceptée la vitesse de vent. Sensible à des variations plus rapides, sa moyenne mobile est fixée à 11 minutes.

3.3.4.6 Présentation des mesures

La partie qui suit présente deux jours consécutifs de la séquence n°1, le 9 et 10 février 2022. Pour cette séquence, les clapets sont revêtus d'une peinture noire et en position fermée (angle de rotation de 0°).

3.3.4.6.1 Eclairement mesuré

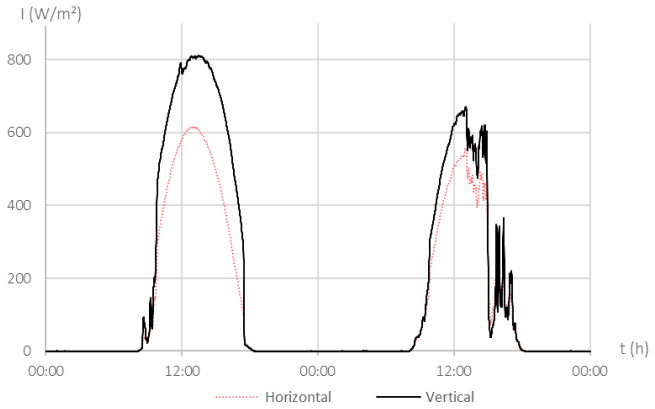


Figure 3.41 - Flux radiatifs en courte longueur d'onde incidents sur le prototype (vertical) et sur sa normale (horizontal) les journées du 9 et 10 février 2022.

La Figure 3.41 présente l'évolution des flux solaires incidents mesurés par les deux pyranomètres, lors d'une journée très ensoleillée suivie d'une journée à faible nébulosité. En cette période hivernale, le flux solaire incident sur la façade orientée sud (vertical) est plus élevé que le flux solaire incident sur le toit (horizontal). Le léger décrochement observé en début des deux journées s'explique par la présence d'un bâtiment qui obstrue les premiers rayons de soleil.

3.3.4.6.2 Vitesse de vent

La vitesse de vent mesurée est présentée en Figure 3.42. Mesurée à une hauteur relativement basse (180 cm pour rappel), la vitesse de vent observée est faible. Une moyenne mobile sur 11 pas de temps, soit 11 mn, limite la volatilité de la mesure et permet de mieux souligner la tendance générale.

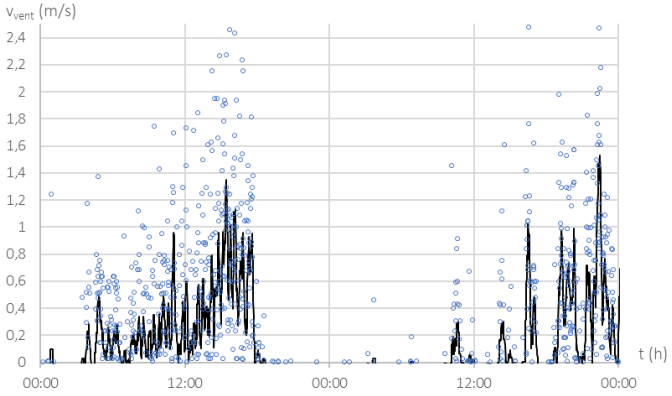


Figure 3.42 - Vitesse de vent extérieure les journées du 9 et du 10 février 2022. Les points sont les mesures à chaque pas de temps, le trait plein est la moyenne mobile de ces mesures.

3.3.4.6.3 Température d'air à l'intérieur de la boîte test

La mesure de la température d'air dans la boîte test est rapportée sur la Figure 3.43. Comme l'indique le positionnement des capteurs en Figure 3.39, trois sondes PT100 sont positionnées à différentes hauteurs dans la boîte : en positions basse, milieu et haute (à respectivement 25 cm, 50 cm, 75 cm du sol de la boîte). Les mesures sont proches, avec une augmentation plus rapide des températures mesurées en position milieu et haute. Cela peut traduire un gradient vertical dû à la gravité, mais aussi à l'échauffement de la « toiture » de la boîte test.

La moyenne des trois températures sert ainsi de référence pour la température intérieure de la boîte, en étant moins dépendante de la hauteur d'un seul point de mesure et donc plus représentative.

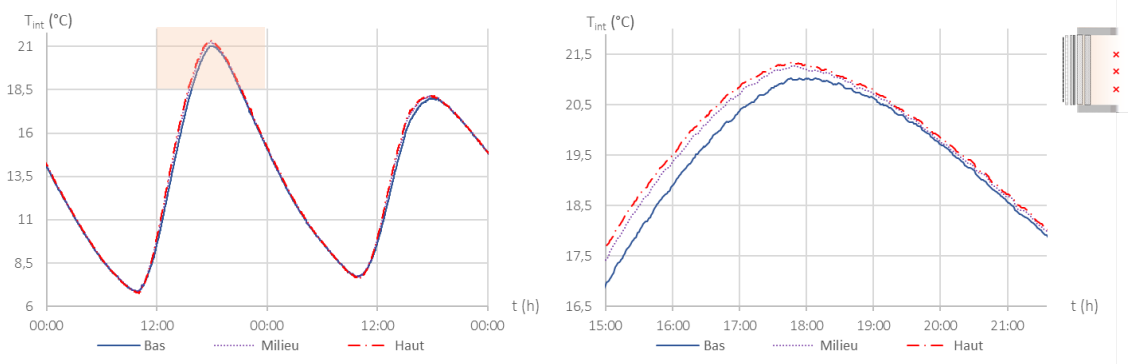


Figure 3.43 - Mesures de température intérieure de la boîte test à trois hauteurs les journées du 9 et 10 février 2022. La figure de droite est un zoom réalisé sur le pic de la première journée.

3.3.4.6.4 Températures et flux dans la façade testée

Les capteurs de flux thermiques et de températures ont été doublés aux interfaces de la paroi testée. La comparaison de chaque capteur avec son duplicata indique des valeurs très proches, en température et en densité de flux, à l'exception des mesures réalisées entre la mousse et le bois contreplaqué (indice $_{we}$). La Figure 3.44 présente une différence de flux qui atteint 7 W/m² pour des températures mesurées similaires. Les fluxmètres étant positionnés proches et au centre de la paroi, il est peu probable qu'il s'agisse d'un effet de bord, suggérant donc une erreur dans la mesure de l'un des deux fluxmètres plutôt qu'une hétérogénéité dans la paroi.

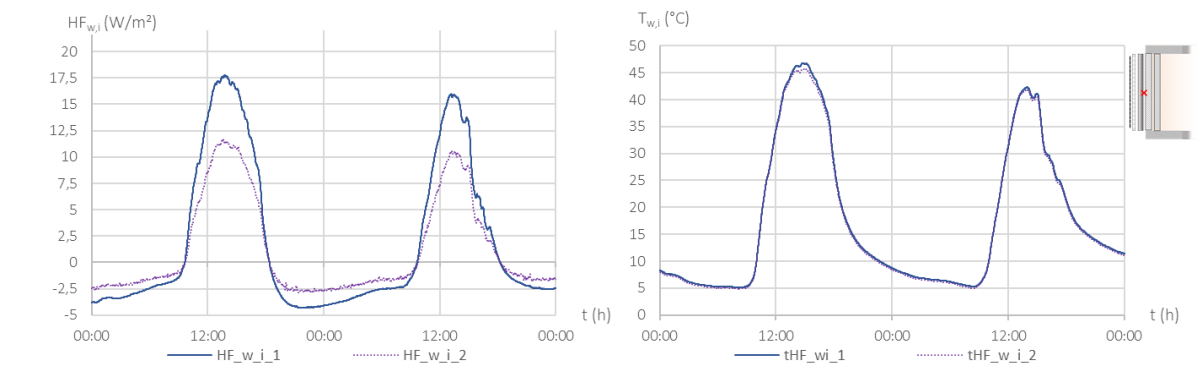


Figure 3.44 - Comparaison des deux fluxmètres positionnés sur le contreplaqué, côté extérieur (nœud T_{we}) les journées du 9 et 10 février 2022.

A l'exception de cette couche, la moyenne entre les capteurs doublés de densité de flux et de température est réalisée. La Figure 3.45 présente les densités de flux et températures aux interfaces de la paroi contreplaqué (indices $_{w,e}$ et $_{w,i}$) et la face intérieure de l'isolant (indice $_{isol,i}$). La comparaison des flux mesurés entre la face extérieure du contreplaqué et la face intérieure de l'isolant nous permet d'en déduire la mesure erronée : le flux *HF_w_i_2*, plus faible que $HF_{isol,i}$, indique une non conservation des flux entre les deux faces. Seule la mesure de densité de flux en *HF_w_i* sera gardée en ce point.

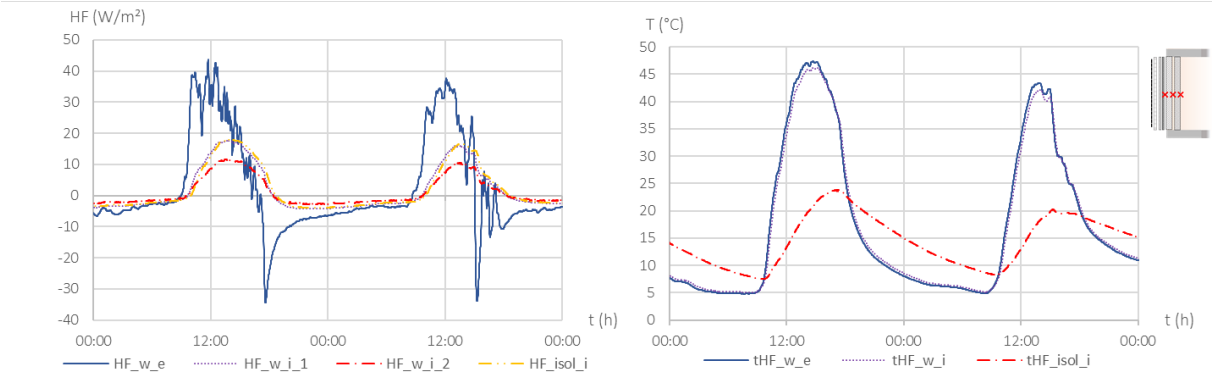


Figure 3.45 - Flux et température mesurés dans les couches de la paroi testée pour les journées du 9 et 10 février 2022.

La Figure 3.46 montre les densités de flux et températures mesurées dans les couches du STEGOS, c'est-à-dire sur les clapets (indices $_{fl_e}$ et $_{fl,i}$), sur l'aluminium côté extérieur (indice $_{al,e}$) et sur l'extérieur de la paroi opaque (indice $_{w,e}$). De l'extérieur vers l'intérieur, les températures mesurées sont progressivement moins élevées, à l'exception de celle mesurée sur la face intérieure des clapets, bien inférieure aux autres températures ; une comparaison avec la

température extérieure indique un décollement probable du capteur, et donc une mesure de l'air compris entre le clapet et la fine plaque d'aluminium, plutôt que de la surface intérieure du clapet.

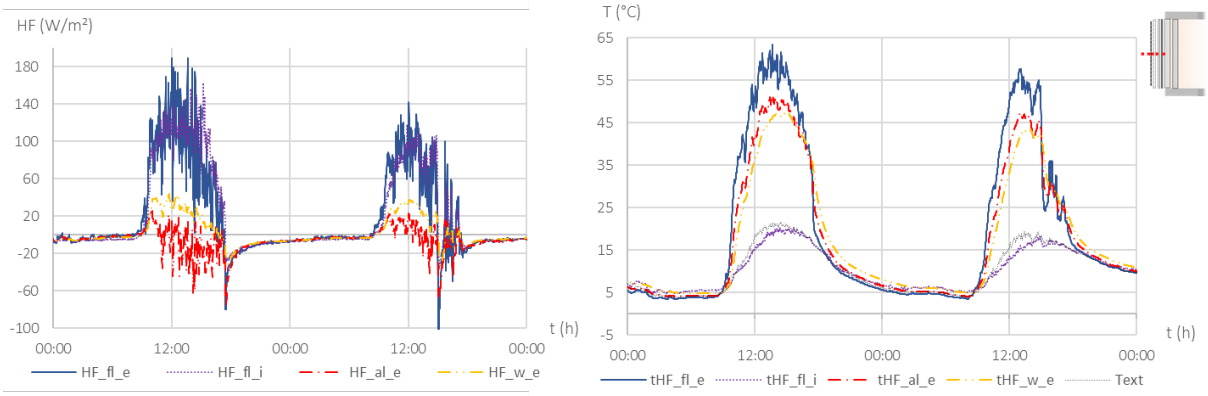


Figure 3.46 - Flux et températures mesurés dans les couches du STEGOS pour les journées du 9 et 10 février 2022.

De manière similaire à ce qui est présenté dans l'article de **Energies**, les flux mesurés sur les clapets ont un ordre de grandeur bien supérieur aux flux des couches suivantes. L'ajout de mousse sur les bords de STEGOS n'a donc pas réduit les pertes supposées par convection de façon visible. En outre, à températures quasi égales, le flux mesuré sur l'aluminium est plus faible que le flux mesuré sur la couche extérieure du contreplaqué. Il devient même négatif en milieu de journée, suggérant un échange significatif par convection avec la fine couche d'air emprisonnée entre le clapet et l'aluminium, et ce malgré le revêtement noir appliqué sur la fine couche d'aluminium (voir partie 3.3.4.3).

3.3.4.6.5 Comportement de la boîte test

La Figure 3.47 illustre l'évolution de la température intérieure de la boîte test comparée aux variations de températures extérieures. Le déphasage entre les deux températures (environ 4 heures) permet d'observer l'inertie totale de la boîte.

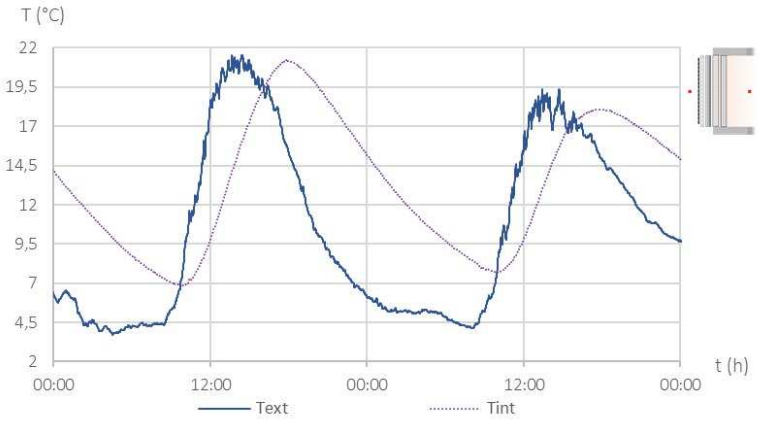


Figure 3.47 - Comparaison de la température intérieure de la boîte test avec la température d'air extérieure les journées du 9 et 10 février 2022.

Les flux mesurés sur toutes les parois internes de la boîte test sont représentés sur la Figure 3.48. En journée, tous les flux sont négatifs excepté le flux traversant la boîte test. La tendance est inversée la nuit. Le flux sur la paroi nord est le plus faible en journée, car non exposée au

rayonnement solaire. Hormis la façade testée, les flux des parois à l'est et au plafond sont les plus réactifs du fait de l'incidence solaire.

Le bilan des flux, également présenté sur la Figure 3.48, n'est pas nul. Il peut correspondre aux pertes par infiltrations et ponts thermiques que les fluxmètres, en positions centrales sur les parois, ne peuvent mesurer.

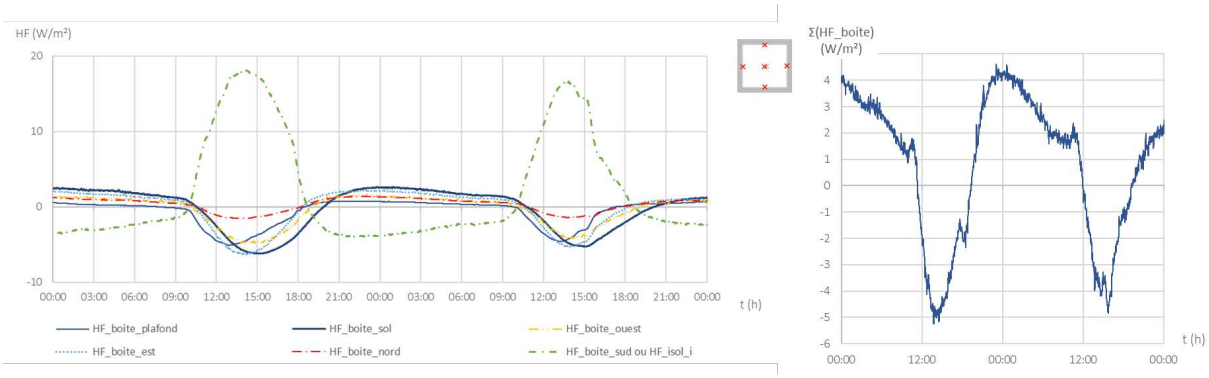


Figure 3.48 - Flux mesurés sur toutes les parois intérieures de la boîte test pour les journées du 9 et 10 février 2022. Le graphe de droite présente le bilan de tous les flux.

3.3.4.6.6 Température de clapets de nuit

La Figure 3.49 montre que la température de la face extérieure des clapets mesurée sur les dates sélectionnées est inférieure d'environ 1°C à la température d'air extérieure et à celle d'une couche intérieure de la paroi, suggérant l'existence d'échanges radiatifs en grandes longueurs d'onde avec la voûte céleste. Notons qu'il aurait été intéressant de mesurer la nébulosité du ciel et de l'intégrer à cette comparaison.

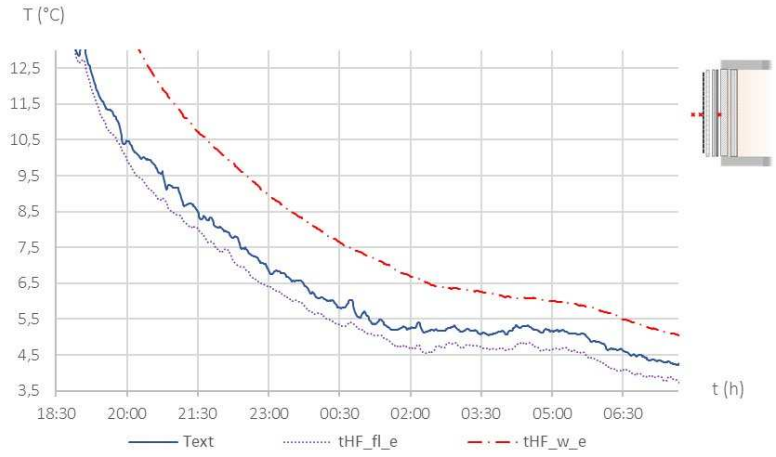


Figure 3.49 - Températures mesurées de l'air extérieur, de la surface extérieure des clapets, et à l'interface mousse-contreplaqué la nuit du 9 au 10 février 2022.

3.3.4.6.7 Discussion

Le banc d'essai intégrant le STEGOS à une paroi opaque sur une boîte test permet de suivre les variations en température et en densité de flux du système dans des conditions climatiques réelles et mesurées.

L'analyse d'un extrait de la séquence n°1 nous indique une erreur de mesure du fluxmètre placé à l'arrière de l'un des clapets (fl_e), très probablement lié à son décollement. Ces mesures ne seront donc pas considérées. Elle suggère également un problème de mesure lié à l'un des fluxmètres situés à l'interface contreplaqué - isolant. Seul le deuxième fluxmètre sera utilisé lors des analyses et modèles proposés par la suite. Par ailleurs, les comparaisons entre capteurs dupliqués sont cohérentes.

Malgré les modifications apportées après les premières mesures (présentées en 3.3.4.3), le banc d'essai présente toujours une réduction importante du flux thermique entre l'aluminium et la paroi opaque.

3.3.4.7 Analyse comparative pour différentes couleurs et orientations de clapets

3.3.4.7.1 Entre les couleurs

Nous souhaitons ici comparer l'influence de la couleur des clapets sur le comportement général de la façade testée et de la boîte test. Les mesures sont moyennées toutes les 5 minutes.

Pour les clapets fermés, les séquences n°1 et n°5 sont comparées. Les Figure 3.52 et Figure 3.53 comparent les flux et températures observés le long de la paroi testée. L'ensoleillement de la façade et la température extérieure pour les jours choisis sont tracés en Figure 3.50 et Figure 3.51.

On observe flux solaire vertical maximal autour de 800 W/m² en février contre 600 W/m² en mars, en raison de l'orientation sud de la mesure et de la latitude du lieu d'expérimentation. Pour des rayonnements incidents verticaux moyens journaliers différents, la grandeur du flux mesuré sur les clapets en face extérieure est donc difficilement comparable d'une séquence à l'autre. Elle semble cependant en accord avec les revêtements utilisés et les grandeurs des rayonnements incidents, avec des pics pour la séquence n°1 plus élevés que ceux observés pour la séquence n°5. Rappelons cependant que les fluxmètres utilisés ont un revêtement cuivré, et donc n'ont pas la même émissivité que les clapets. Il est donc préférable de comparer les flux aux couches suivantes, indépendantes de leurs propriétés émissives car aux interfaces.

Les variations des flux mesurés dans les différentes couches de la paroi sont similaires d'une séquence à l'autre, mais les grandeurs sont jusqu'à cinq fois plus faibles pour la séquence n°5. Cela pourrait correspondre à un comportement de protection thermique dans le cas des clapets blancs, renforcé par une température intérieure plus faible que la température extérieure ; néanmoins, le vent mesuré est plus élevé lors du jour sélectionné de la séquence n°5 (2 m/s contre 0,2 m/s), ce qui favoriserait les échanges convectifs avec l'air ambiant et aiderait de sorte à réduire les flux intrants.

Les températures mesurées selon les couches sont visiblement plus élevées avec les clapets noirs. Dans les deux cas, l'élévation de la température en face extérieure est suivie par celles des températures de la plaque aluminium, puis du contreplaqué. L'effet s'arrête au niveau de de la couche suivante en polystyrène, qui joue son rôle d'isolant.

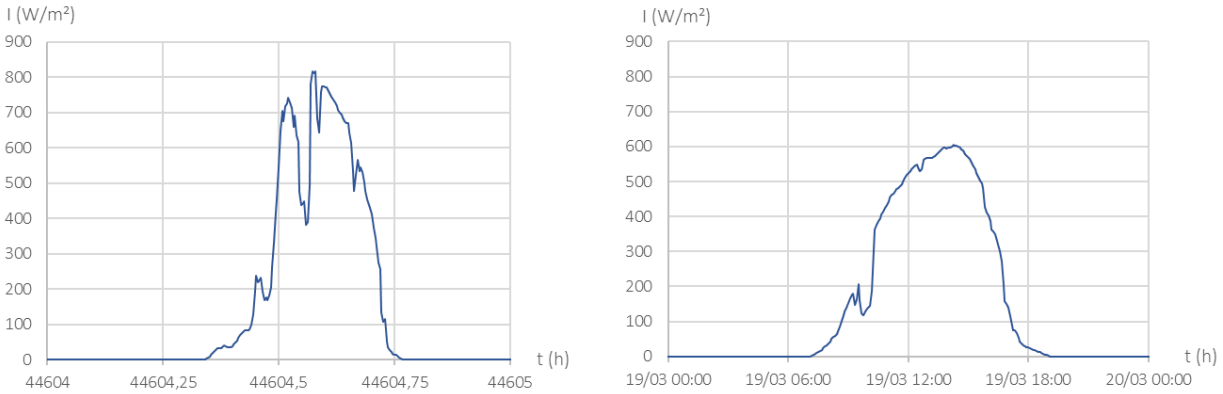


Figure 3.50 - Comparaison des flux solaires incidents entre la séquence n°1 à gauche, et la séquence n°5 à droite.

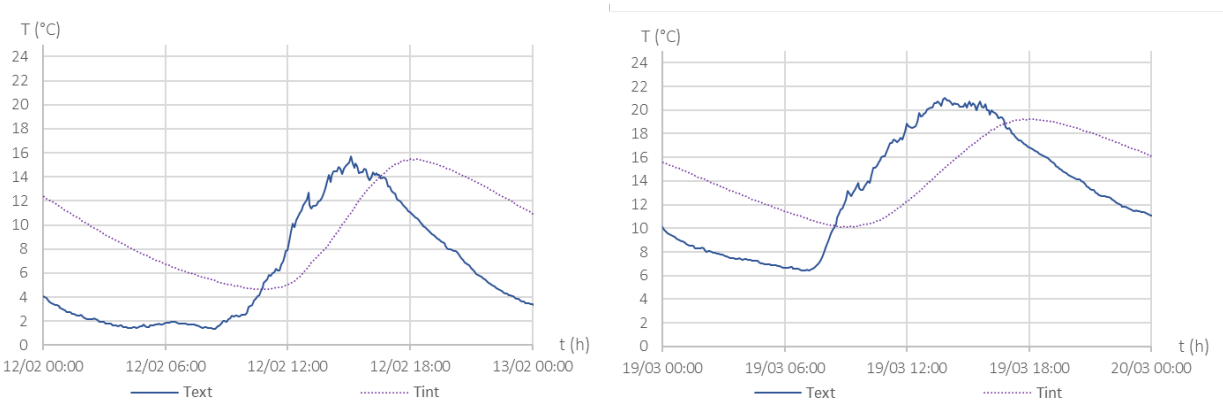


Figure 3.51 - Comparaison des températures d'air extérieur et intérieur entre la séquence n°1 à gauche, et la séquence n°5 à droite.

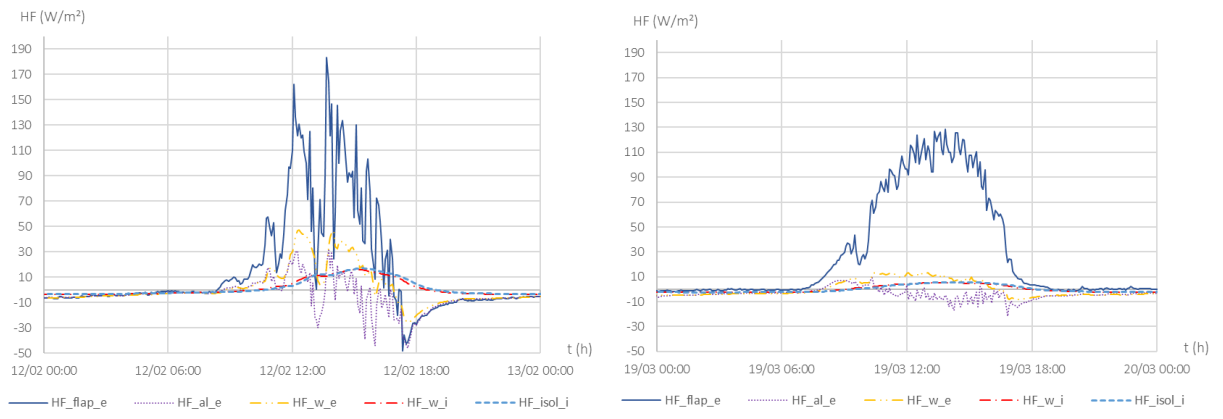


Figure 3.52 - Comparaison des flux aux différentes couches de la paroi entre la séquence n°1 à gauche, et la séquence n°5 à droite.

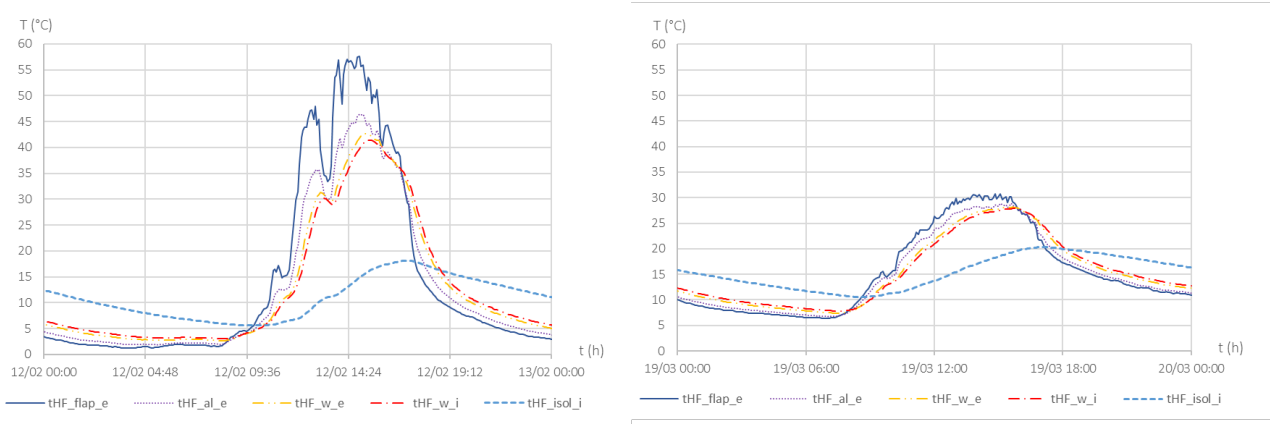


Figure 3.53 - Comparaison des températures aux différentes couches de la paroi entre la séquence n°1 à gauche, et la séquence n°5 à droite.

Dans la position avec clapets ouverts, la même démarche de comparaison peut être effectuée entre une journée ensoleillée de la séquence n°2 et une de la séquence n°6 (mesures en Annexe E). Les températures dans les couches de la paroi indiquent une transmission de la chaleur depuis la couche d'aluminium, à nouveau stoppée à l'interface entre le contreplaqué et l'isolant.

Les flux observés semblent plus faibles pour les clapets de couleur blanche, mais une fois encore, les conditions météorologiques entre les deux journées sont différentes pour attribuer cette différence à la couleur de clapet ; la vitesse du vent est par exemple plus élevée, favorisant les échanges convectifs entre la paroi et l'air extérieur.

En outre, l'ouverture des clapets à plusieurs semaines d'intervalle implique une ombre projetée différente d'une mesure à l'autre. La Figure 3.54 présente le coefficient de transmission τ_{STEGOS} calculé aux jours sélectionnés de la séquences n°2 et n°6 pour une ouverture de clapets à 90° (méthode de calcul présentée partie 3.2.1 et dans l'article **Energies**).

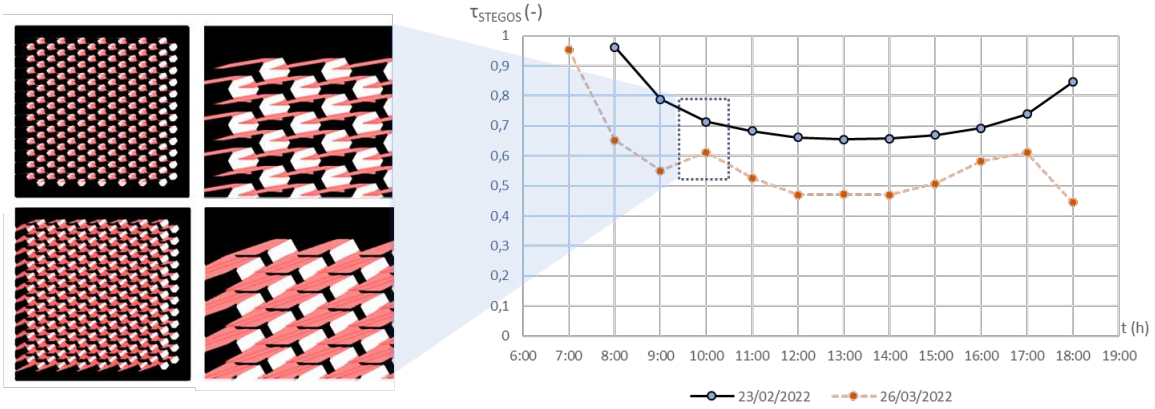


Figure 3.54 - Comparaison du coefficient de transmission τ calculé géométriquement entre le 23/02 (séquence n°2) et le 26/03 (séquence n°6).

3.3.4.7.2 Entre les ouvertures

La comparaison des différentes ouvertures, à couleur fixe, nécessite la mise en parallèle de journées des séquences n°1, n°2, et n°3 pour les clapets peints en noirs, et des séquences n°4,

n°5 et n°6 pour les clapets peints en blancs. La différence thermique entre la fine couche d'aluminium (derrière les clapets) et la température surfacique intérieure de la paroi est tracée sur la Figure 3.55 en fonction du rayonnement solaire incident pour les trois ouvertures de clapets blancs.

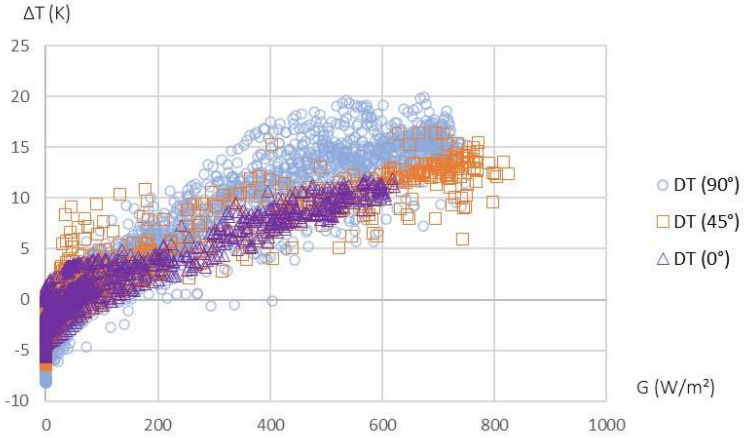


Figure 3.55 - Nuages de points des différences thermiques horizontaux dans la paroi en fonction du rayonnement solaire incident mesuré, pour les clapets blancs (séquences entières n°4, n°5, n°6). $\Delta T = tHF_{isol,i} - tHF_{al,e}$.

Le nuage de points est le plus diffus pour une ouverture de clapets à 90°. Une corrélation affine pour chaque jeu indique une corrélation entre le ΔT et des valeurs de rayonnement proches, bien que légèrement plus élevée pour 90°, puis 0°. L'ouverture intermédiaire des clapets peut potentiellement créer des effets de réflexion et convection qui prédominent sur un ensoleillement solaire direct.

Les données à ensoleillement nul des séquences n°4, n°5, et n°6 sont sélectionnées. La Figure 3.56 trace le nuage de points du gradient de température entre la température de surface des clapets et la température extérieure. Ce gradient est majoritairement négatif pour une ouverture de clapets à 90° et une vitesse de vent très faible. Dans ce cas, on peut raisonnablement supposer que les clapets, directement orientés vers le ciel, sont refroidis par échanges radiatifs avec la voûte céleste, et ont une température inférieure à la température ambiante.

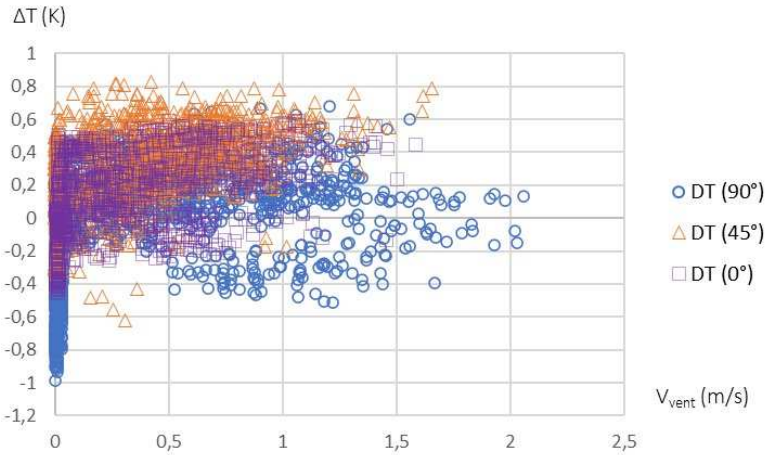


Figure 3.56 - Nuages de points des gradients thermiques entre la surface extérieure des clapets et la température d'air, pour les clapets blancs. $\Delta T = tHF_{fl,e} - T_{ext}$.

3.4 Conclusion

L'un des concepts proposés lors des ateliers d'idéation a mené à un principe de paroi adaptative permettant potentiellement de réguler les transferts de masse (d'air), de chaleur et d'accès à la lumière. Une version de ce concept, appelée STEGOS, a été prototypée puis intégrée à un banc d'essais, pour des mesures en conditions climatiques réelles, selon deux configurations : devant un vitrage, pour des tests lumineux, et devant une paroi opaque, pour mesurer son impact thermique sur un volume donné. Sur cette dernière version, nous avons fait varier entre chaque mesure des paramètres tels que l'ouvertures de clapets, ou la couleur de leur revêtement.

La mesure réalisée pour des séquences de deux ou trois jours représentatifs a été présentée et discutée. La confrontation des mesures selon différentes configurations du STEGOS s'avère hasardeuse, car les expérimentations ont été réalisées dans des conditions climatiques réelles mais difficilement comparables. Les variations et grandeurs des températures, et des flux thermiques intrants et extrants, sont conditionnées par de multiples facteurs climatiques, tels que le flux solaire incident, le vent, la température ambiante, et la hauteur du soleil. Il serait donc maladroit d'émettre des conclusions quant aux différences observées entre les mesures.

Celles-ci peuvent cependant être combinées à des modèles de type boîte grise qui permettraient de caractériser et comparer les systèmes sur des paramètres à déterminer. En outre, elles suggèrent des phénomènes physiques à inclure à la modélisation, comme par exemple des échanges radiatifs avec la voûte céleste, et l'influence de la vitesse du vent sur les échanges convectifs extérieurs.

Chapitre 4

De l'expérimentation à la modélisation

Ce dernier chapitre initie une démarche de modélisation de l'élément d'enveloppe bio-inspiré intégré à un banc d'essai, par le couplage des mesures réalisées à un modèle théorique partiel de type RC. Ce travail est réalisé en vue d'évaluer l'impact d'un tel système sur la performance d'un bâtiment, s'inscrivant dans une amélioration progressive de ce cas d'application pour la méthode de conception explorée.

Les choix de modélisation, basés sur l'observation de plusieurs phénomènes physiques lors de l'analyse des mesures, sont d'abord présentés. La démarche de calibration du modèle proposé, intégrant une analyse de sensibilité de certains de ses paramètres, est ensuite détaillée. Les résultats obtenus sont mis en perspective, en abordant les limites du modèle et une suite potentielle de ces travaux.

Sommaire

4.1 Méthodologie de modélisation de la façade ... 183
4.1.1 Choix du modèle ... **183**
4.1.1.1 Typologie de modèles ... 183
4.1.1.2 Transferts de chaleur impliqués ... 184
4.1.1.3 Modélisation par analogie rhéoélectrique ... 184
4.1.2 Présentation des choix de modélisation ... **185**
4.1.2.1 Échanges radiatifs ... 186
4.1.2.2 Échanges convectifs ... 188
4.1.2.3 Écriture des bilans d'énergie ... 190
4.1.3 Algorithme de calcul ... **191**
4.2 Caractérisation thermique par calibration du modèle RC ... 192
4.2.1 Démarche globale ... **192**
4.2.2 Analyse de sensibilité ... **193**
4.2.2.1 Méthodes existantes ... 194
4.2.2.2 Fonction coût ... 195
4.2.2.3 Classification des paramètres ... 196
4.2.2.4 Synthèse ... 203
4.2.3 Algorithmes de calibration ... **204**
4.2.3.1 Méthodes existantes ... 204
4.2.3.2 Principes des algorithmes évolutionnaires ... 205
4.2.3.3 Utilisation sous langage Python pour la calibration ... 208
4.2.3.4 Identification des paramètres ... 209

4.2.3.5 Interprétation des résultats 210
4.2.4 Discussions 212
4.3 Perspectives 213
4.3.1 Inférences bayésiennes 213
4.3.2 Vers un modèle pour un système adaptatif 214
4.3.3 Conclusion 214

4.1 Méthodologie de modélisation de la façade

L'analyse des pratiques de la bio-inspiration (Chapitre 1) a souligné une rare évaluation de l'impact des applications bio-inspirées sur la performance globale et la durabilité des bâtiments. Lorsqu'elle existe, la comparaison entre les consommations énergétiques prédites et celles mesurées d'un bâtiment montre de façon quasi-systématique un écart important (Darakdjian 2018). Cet écart est associé à divers paramètres : la non connaissance ou la mauvaise prise en compte de certains phénomènes au sein du bâtiment, l'incertitude sur les mesures réalisées sur le bâtiment, une utilisation incorrecte de ses systèmes, ou encore des défauts de construction ou d'intégration de ceux-ci. Dans le cas d'un bâtiment dont l'enveloppe intègre une composante bio-inspirée, les outils de simulations existants ne permettent pas toujours une modélisation pertinente ; les éléments d'enveloppes peuvent être dynamiques, l'intégration des éléments ou les matériaux employés atypiques, etc.

Le travail qui suit est une démarche de modélisation du prototype bio-inspiré STEGOS en vue de sa caractérisation. Les objectifs sont multiples :

- Meilleure compréhension des phénomènes physiques en jeu et leur quantification ;
- Évaluation de la performance du STEGOS dans les configurations testées (ouvertures des clapets et revêtements utilisés) et envisagées (devant vitrage et en tant qu'enveloppe) ;
- Exploitation du modèle en vue d'améliorer la conception du concept ;
- Possible intégration d'un tel élément d'enveloppe dans des plateformes de simulation énergétique dynamique.

4.1.1 Choix du modèle

4.1.1.1 Typologie de modèles

Dans le secteur du bâtiment, le recours à la simulation permet de prédire le comportement d'un système en fonction du temps, lorsqu'il est soumis à des phénomènes physiques divers. Il est possible de différencier trois grandes classes de modèles : boîte noire, boîte blanche et boîte grise.

La boîte noire est une représentation d'un système sans considérer son fonctionnement interne, en se basant exclusivement sur les données utilisées. Au contraire, la boîte blanche est un système dont les mécanismes sont connus et déterminés. Enfin, les modèles de type boîte grise sont un intermédiaire entre boîte blanche et boîte noire : ils combinent un modèle de la physique du système étudié avec un traitement statistique de données mesurées. En général, ils utilisent une représentation physique simplifiée du bâtiment étudié et présentent l'avantage d'un nombre de paramètres plus réduit ou d'un temps de simulation plus court comparé aux boîtes noires et blanches. Ils demandent néanmoins une connaissance plus avancée des phénomènes physiques que pour une boîte blanche, pour un niveau de détail adapté au niveau d'information recherché. Au vu des objectifs émis, l'approche par boîte grise est utilisée pour ces travaux. Celle-ci permet

de s'appuyer sur les mesures décrites dans le Chapitre 3 pour la quantification des phénomènes physiques observés.

4.1.1.2 Transferts de chaleur impliqués

Les transferts thermiques dans le bâtiment s'effectuent par conduction, convection et rayonnement :

- La conduction traduit les échanges thermiques dans des milieux immobiles. Elle se caractérise par la conductivité thermique, la masse volumique, et la chaleur massique des matériaux en jeu.
- La convection est due à l'interaction entre fluides en mouvement ou à une interface fluide - solide. Dans le prototype STEGOS et la paroi opaque, elle y prend donc trois formes : des transports convectifs naturels, associés aux renouvellements d'air à travers la paroi par infiltration ; des échanges convectifs forcés par le vent entre l'air externe et le STEGOS ; et des échanges convectifs entre les clapets ou la fine couche d'aluminium, et l'air environnant.
- Le rayonnement est une onde électromagnétique à travers un milieu non opaque. Les rayonnements en courtes longueurs d'onde (CLO) s'étendent de 0,25 µm à 2,5 µm et les rayonnements en grandes longueurs d'onde (GLO) de 2,5 µm à 100 µm. Le STEGOS a donc des échanges radiatifs en CLO avec le soleil, et en GLO avec la voûte céleste et son environnement proche (bâtiment, sol, végétation).

La Figure 4.1 donne une représentation de ces transferts thermiques au sein du STEGOS intégré à la paroi opaque.

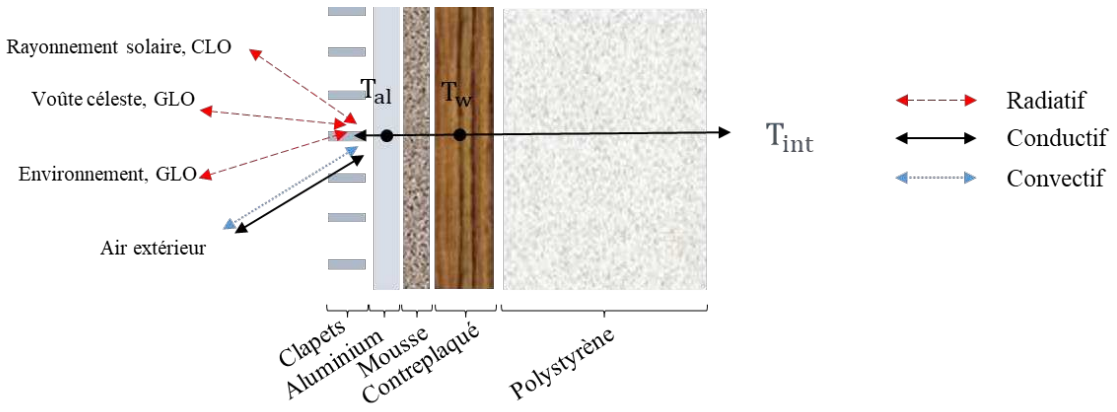


Figure 4.1 - Phénomènes de transferts thermiques sur la paroi intégrée à la boîte test.

4.1.1.3 Modélisation par analogie rhéoélectrique

Plusieurs méthodes de modélisation de ces transferts de chaleurs existent. Les phénomènes physiques peuvent être modélisés à l'aide de configurations de type RC, c'est-à-dire par analogie rhéoélectrique. Cette approche consiste à modéliser un corps homogène à l'aide d'un couple composé d'une résistance électrique *R* et d'une capacité thermique *C*, selon :

$$R = \frac{e}{\lambda \times S} \quad \text{E4.1}$$

$$C = m \times C_p \quad \text{E4.2}$$

Avec :

- e (m) l'épaisseur du matériaux ;
- λ (W/m.K) la conductivité thermique ;
- S (m²) la surface d'échange ;
- m (kg) la masse du corps ;
- C_p (J/kg.K) la capacité thermique massique.

La Figure 4.2 illustre un cas générique de paroi multicouches divisée en n (entiers naturels) mailles. Dans des hypothèses de flux monodirectionnels, la loi de Fourier permet d'écrire le bilan d'énergie au nœud T_i :

$$e_i \cdot \rho_i \cdot C_{pi} \frac{dT_i}{dt} = \frac{T_{i+1} - T_i}{R_{i,i+1}} + \frac{T_i - T_{i-1}}{R_{i,i-1}} \quad \text{E4.3}$$

Avec ρ_i (kg/m^3) la masse volumique de la couche i.

L'écriture de ce même bilan à chaque nœud donne un système d'équations qui couple résistances, capacités et températures.

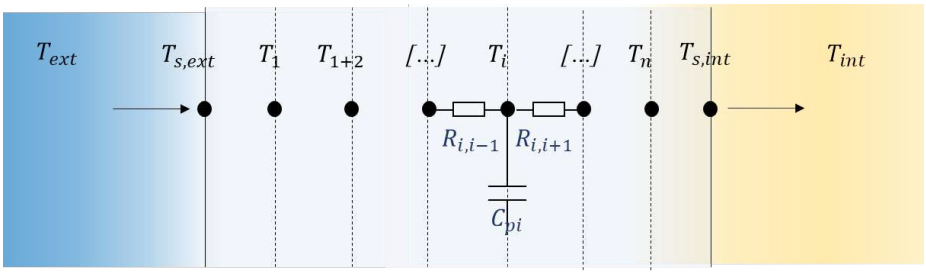


Figure 4.2 - Modèle RC d'une paroi homogène.

L'analogie RC a été choisie pour la modélisation de la paroi testée car simple d'utilisation, avec des temps de simulations relativement courts, et souvent utilisée sur les plateformes de simulations.

4.1.2 Présentation des choix de modélisation

Les choix de modélisation sont un compromis entre les phénomènes physiques identifiés sur le système *a priori* des mesures réalisées, et ceux observés ou du moins interprétés lors de l'analyse des mesures en partie (3.3.4.6).

4.1.2.1 Échanges radiatifs

4.1.2.1.1 Rayonnement en CLO

Les échanges radiatifs en courtes longueurs d'onde sont d'origine solaire. La longueur d'onde d'un rayonnement électromagnétique dépend de la température de surface du corps émetteur, et de la loi de Planck permettant d'obtenir la longueur d'onde du maximum d'émission selon la température. Le rayonnement solaire, une fois filtré par l'atmosphère terrestre, est compris dans la bande spectrale de 0,25 µm et 2,5 µm.

La densité de flux à travers une paroi opaque liée aux sollicitations radiatives solaires s'exprime sous la forme :

$$\varphi_{sol,CLO} = f_s \times I \qquad \text{E4.4}$$

Avec :

- I (W/m²) la densité de flux solaire incident ;
- f_s (-) un facteur transmission solaire défini par la norme ISO 9288:1989 comme la fraction transmise de l'énergie solaire incident.

Le facteur solaire est lié au flux $\Phi_{sol,CLO}$ (W) directement transmis par rayonnement en CLO, au flux Φ_{GLO} absorbé puis réémis en GLO, et au flux convectif Φ_{conv} (W) entre la paroi et l'air (Figure 4.3). Il peut se calculer selon :

$$f_s = \frac{\Phi_{sol,GLO} + \Phi_{GLO} + \Phi_{conv}}{S_p \times I} \qquad \text{E4.5}$$

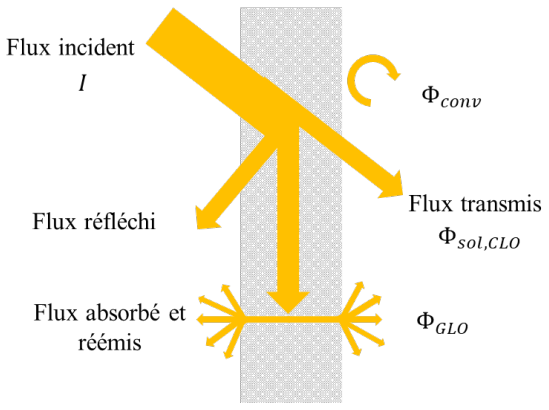


Figure 4.3 - Composantes du facteur solaire.

4.1.2.1.2 Rayonnement en GLO

Le bilan d'énergie radiative d'un corps sur la surface terrestre inclut le rayonnement de l'atmosphère et le rayonnement des surfaces autour de ce corps. Le rayonnement d'un corps à une température T (K) est caractérisé par une puissance rayonnée φ, donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\varphi_{GLO} = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad \text{E4.6}$$

Avec :

- ε (-) l'émissivité du corps ;
- σ la constante de Stefan-Boltzmann d'une valeur de $5{,}67.10^{-8}$ W/m².K^4.

La densité de flux incident sur une paroi externe peut s'écrire comme la somme d'une densité de flux incident de l'environnement externe et d'une densité de flux incident de la voûte céleste :

$$\varphi_{GLO,ciel\leftrightarrow env} = F \times \varepsilon_{env}\sigma\, {T_{env}}^4 + (1-F) \times \varepsilon_{ciel} \times \sigma \times {T_{ciel}}^4 \quad \text{E4.7}$$

Avec :

- F (-) le facteur de forme entre la surface considérée et l'environnement. Cet environnement comprend tout ce qui est au regard de la surface excepté la voûte céleste. F peut être calculé géométriquement à l'aide de modèles géométriques tels que présenté dans le Chapitre 3 sur Rhinoceros Grasshopper.
- T_{env} et T_{ciel} (K) les températures de l'environnement et du ciel.

En GLO, la densité de flux net, c'est-à-dire absorbée et émise sur la surface extérieure d'une paroi de température T_p, s'écrit :

$$\varphi_{GLOnet,s} = \alpha\left(F \cdot \varepsilon_{env}\sigma\, {T_{env}}^4 + (1-F) \cdot \varepsilon_{ciel}\sigma\, {T_{ciel}}^4\right) - \varepsilon\sigma\, {T_p}^4 \quad \text{E4.8}$$

En prenant pour hypothèses $\varepsilon_{env} = 1$, $\varepsilon_{ciel} = 1$, et $\alpha = \varepsilon$, le bilan peut devenir :

$$\begin{aligned} \varphi_{GLOnet,s} &= \varepsilon_s\sigma\, F \times ({T_{env}}^4 - {T_p}^4) + \varepsilon_s\sigma\,(1-F) \times \left({T_{env}}^4 - {T_p}^4\right) \\ \varphi_{GLOnet,s} &= h_{env} \times (T_{env} - T_p) + h_{ciel} \times (T_{ciel} - T_p) \end{aligned} \quad \text{E4.9}$$

Avec :

$$\begin{aligned} h_{env} &= \varepsilon_s\sigma\, F \times ({T_{env}}^2 + {T_p}^2) \times (T_{env} + T_p) \\ h_{ciel} &= \varepsilon_s\sigma\,(1-F) \times \left({T_{env}}^2 + {T_p}^2\right)(T_{ciel} + T_p) \end{aligned} \quad \text{E4.10}$$

Notons que l'émissivité du ciel ε_{ciel} pourrait être approximée en utilisant la formule empirique de Li, Jiang and Coimbra (2017) :

$$\varepsilon_{ciel} = \varepsilon_{ciel,clair} \times (1 - c_1 CF^{c_2}) + c_3 CF^{c_4} \quad \text{E4.11}$$

Avec :

- *CF* (-) la fraction nuageuse de la voûte céleste ;
- $\varepsilon_{ciel,clair}$ (-) l'émissivité fictive de la voûte céleste par ciel clair, dépendant de pression partielle de vapeur d'eau ;
- c_1, c_2 et c_3 (-) des facteurs déterminés empiriquement.

Cette approche requiert une mesure de la nébulosité de la voûte céleste, et de la pression de vapeur d'eau, ce qui n'est pas le cas du banc expérimental installé et décrit dans le Chapitre 3. Outre le calcul de ε_{ciel}, le flux radiatif en grande longueur d'onde ou la nébulosité permettrait une approximation réaliste de la température de ciel. Dugué (2013) compare différentes méthodes proposées par la littérature qui établissent par exemple des expressions de températures de ciel basées sur des mesures de flux infrarouge du ciel. Sur les calculs proposés, nous retenons celui donné par Duffie and Beckman (2013), basée uniquement sur la température du ciel comme suit :

$$T_{ciel} = 0{,}0552 \times {T_{ext}}^{1,5} \quad \text{E4.12}$$

Evins, Dorer and Carmeliet (2014) soulignent l'influence non négligeable des températures de surfaces environnantes sur le bilan énergétique des parois extérieures d'un bâtiment, et indiquent une utilisation généralisée dans les outils de simulation (notamment EnergyPlus) de l'approximation de ces températures à la température de l'air extérieur. N'ayant pas de mesure des émissivités des surfaces environnantes, nous retiendrons donc :

$$T_{env} = T_{ext} \quad \text{E4.13}$$

4.1.2.2 Échanges convectifs

Les échanges convectifs ont été distingués en trois sortes (voir partie 4.1.1.2). Le transport convectif associé au renouvellement d'air à travers la paroi n'étant pas pris en compte pour la caractérisation du STEGOS, seules les convections naturelle et forcée sont développées dans cette section. Le coefficient d'échange convectif entre les clapets du STEGOS avec l'air extérieur peut s'écrire comme la somme de deux composantes liées à la convection naturelle h_n (W/m².K) et la convection forcée h_f (W/m².K) :

$$h_{conv} = h_n + h_f \quad \text{E4.14}$$

4.1.2.2.1 Convection naturelle

La densité de flux surfacique de l'échange convectif naturel d'une surface externe avec l'air extérieur s'écrit simplement :

$$\varphi_{conv} = h_{conv} \times (T_{ext} - T_p) \quad \text{E4.15}$$

Avec h_{conv} (W/m².K) un coefficient d'échange surfacique avec l'air extérieur.

4.1.2.2.2 Convection forcée par le vent

La composante de convection forcée est exprimée dans la littérature de nombreuses façons, faisant souvent intervenir la dureté de la surface concernée et l'orientation – même indicative – du vent (face ou sous le vent, comme proposées par Sparrow et al. (1979), par exemple). Nous nous basons ici sur la formule donnée par McAdams (1994), souvent reprise dans la littérature, qui, sous une forme affine, introduit une part fixe et une part variable dépendant de la vitesse de vent pour définir un flux convectif entre l'air extérieur et la paroi :

$$h_{conv} = f_n + f_v \times v_{vent} \quad \text{E4.16}$$

Avec :

- v_{vent} (m/s) la vitesse du vent ;
- f_n (W/m².K) et f_v (W.s/m^3.K) des coefficients déterminés empiriquement (f_n = 5,7 et f_v = 3,8 selon McAdams (1994)).

Ce modèle a l'avantage de ne pas dépendre de la direction du vent, qui n'a pas été mesurée lors des expérimentations menées, ni de la rugosité de la surface considérée. Notons que cette expression est valable pour une surface verticale et non pas inclinée. Elle est donc applicable pour déterminer le flux convectif entre des clapets fermés et l'air extérieur, ou entre l'aluminium et l'air extérieur en configuration ouverte, moyennant cependant une réidentification des coefficients f_n et f_v en raison de la présence des clapets comme casquette. Elle semble moins adaptée pour des clapets inclinés à 45° ou fermés.

Pour une orientation intermédiaire, telle que 45°, il serait souhaitable d'adapter la formule. Avec une mesure de la direction du vent, il est par exemple possible de se baser sur les méthodes numériques proposées par Emmel et al. (2007), par une formule qui serait fonction de l'angle d'incidence du vent θ sur les clapets :

$$h_f = a(\theta) \cdot {v_{vent}}^{b(\theta)} \quad \text{E4.17}$$

Avec :

- θ (°) l'angle d'incidence entre le vent et la surface considérée ;
- a (-) et b (-) des coefficients variables selon l'angle θ.

Dans le cas de clapets fermés, le flux convectif entre la plaque d'aluminium et l'air enfermé par les clapets pourrait s'apparenter à celui d'une fine lame d'air fermée, caractérisé par un simple coefficient d'échange h_{conv} tel que présenté dans l'équation E.4.15. Cependant, cette fine lame d'air n'est pas totalement étanche, et dépend donc des variations de vitesse d'air à la surface du clapet.

4.1.2.3 Écriture des bilans d'énergie

La modélisation de type boîte grise décrite par analogie rhéoélectrique pour la façade est schématisée sur la Figure 4.4. Les conditions extérieures sont données par la mesure de la température d'air extérieur, du rayonnement solaire incident, et par la température du ciel calculée selon l'équation E.11. La condition intérieure est une condition aux limites de Dirichlet sur le flux thermique mesuré en surface de l'isolant.

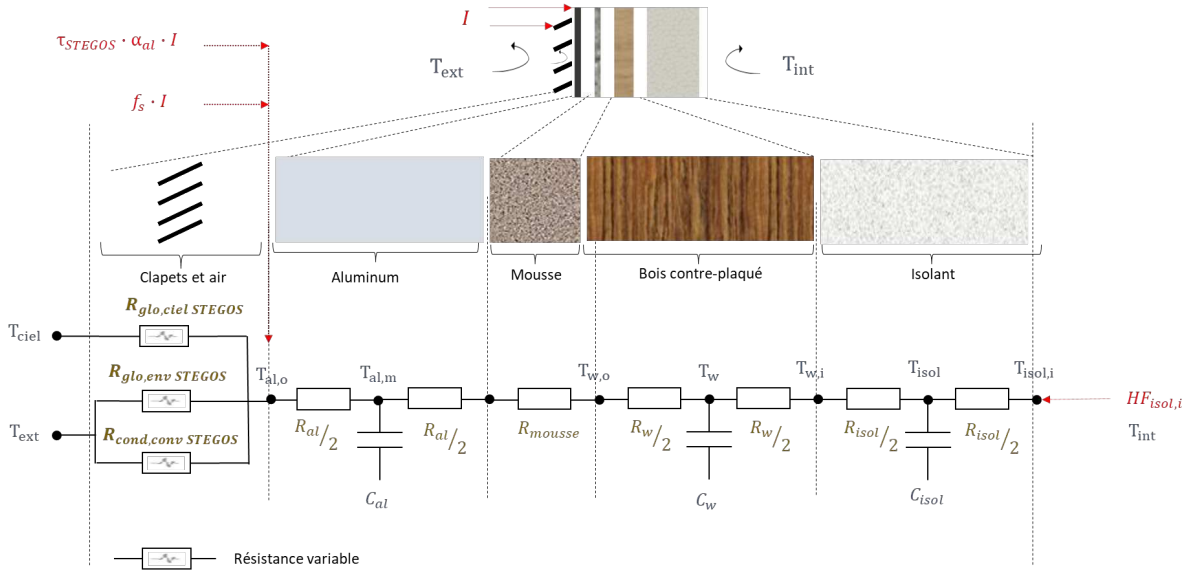


Figure 4.4 - Représentation schématique du modèle RC appliqué à la paroi testée.

Le choix de position des nœuds s'est fait à chaque interface entre les couches opaques, et en leur centre. À ceux-ci ont été attribués des capacités thermiques à l'exception de la légère mousse – utilisée pour assurer une continuité entre l'aluminium et le contreplaqué – de sorte à simplifier le modèle. Notons que les résistances se suivant mais n'étant pas séparées par des capacités thermiques auraient pu être combinées en une seule et même résistance (c'est par exemple le cas de $R_{al/2}$, R_{mousse} et $R_{w/2}$). N'ajoutant pas ou très peu de temps de calculs à la résolution du modèle, cette dissociation a été faite par soucis de représentation.

Les formes des flux convectifs, conductifs et radiatifs présentées en 4.1.2, sont utilisées pour écrire le bilan d'énergie sur ce qu'on considère comme la face externe fixe du STEGOS, c'est-à-dire la plaque d'aluminium (indice *al*). Le bilan d'énergie au nœud $T_{al,e}$ s'écrit :

$$\varphi_{sol,abs} + \varphi_{sol,indirect} + \varphi_{GLO,ciel} + \varphi_{GLO,env} + \varphi_{conv} = \varphi_{cond(al,e \rightarrow al,m)} \qquad \text{E4.18}$$

Les termes associés aux flux solaires sont $\varphi_{sol,abs}$ la part transmise par le STEGOS et absorbée par l'aluminium, et $\varphi_{sol,indirect}$ la part résultante de l'absorption par les clapets :

$$\varphi_{sol,abs} = \tau_{STEGOS} \cdot \alpha_{al} \cdot I$$
$$\varphi_{sol,indirect} = f_s \cdot I \qquad \text{E4.19}$$

Avec :

- τ_{STEGOS} (-) le rapport de lumière projetée calculé à l'aide de modèles géométriques ;
- α_{al} (-) le coefficient d'absorption de l'aluminium ;
- I (W/m²) le rayonnement total solaire normal à la paroi ;
- f_s (-) un facteur solaire qui exprime la part solaire absorbée indirectement à travers les clapets du STEGOS. Notons que dans le cas où les clapets sont fermés, $\varphi_{sol,abs}$ est nul.

Les densités de flux radiatif en GLO vers le ciel $\varphi_{ciel,glo}$ et vers l'environnement $\varphi_{env,glo}$ sont exprimés sous la forme de l'équation E 4.12 avec des coefficients d'échange sous une forme simplifiée, respectivement f_c et f_{env} :

$$h_{env} = f_{env} \cdot \sigma \cdot ({T_{env}}^2 + {T_{al,e}}^2)(T_{env} + T_{al,e}) \qquad \text{E4.20}$$

$$h_c = f_c \cdot \sigma \cdot ({T_{ciel}}^2 + {T_{al,e}}^2)(T_{ciel} + T_{al,e})$$

Avec :

- f_{env} (-) et f_c (-) des facteurs, compris entre 0 et 1, englobant l'émissivité de l'aluminium et des facteurs de vue « équivalents » vers respectivement l'environnement et le ciel depuis l'aluminium, quelle que soit l'ouverture des clapets.

Le flux convectif φ_{conv} est donné par l'équation E 4.19 en fixant f_n à la valeur empirique proposée par McAdams (1994) et en laissant f_v comme un paramètre ouvert à déterminer.

La densité de flux conductif vers le nœud $T_{al,m}$ s'exprime à l'aide de l'équation E 4.3 :

$$\varphi_{cond(al,e \to al,m)} = \frac{(T_{al,m} - T_{al,e})}{R_{al/2}} \qquad \text{E4.21}$$

4.1.3 Algorithme de calcul

Le modèle a été réalisé sous *OpenModelica*. *OpenModelica* est un logiciel de simulation, libre d'accès et ouvert, basé sur le langage informatique Modelica (programmation orientée objet, déclarative et multi-domaine (Tiller)) pour la modélisation, la simulation, l'optimisation et l'analyse de systèmes dynamiques complexes.

La modélisation de circuits RC pour des applications en thermique du bâtiment est simple grâce l'interface graphique fournie par OMEdit (*OpenModelica* Connection Editor). Le schéma du réseau de notre modèle dans l'interface graphique *d'OpenModelica* est proposé en Figure 4.5. Les valeurs des paramètres fixes sont données dans le Tableau 3.4 du Chapitre 3.

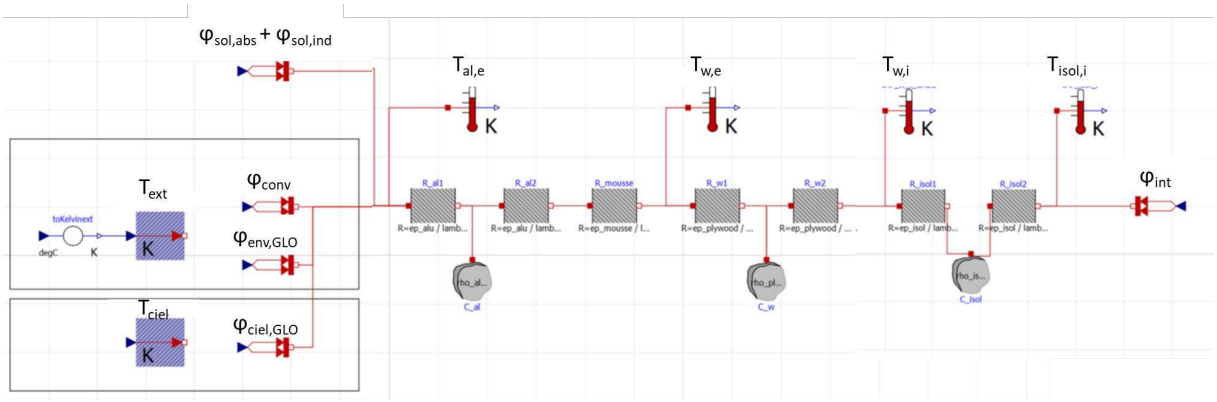


Figure 4.5 - Schéma RC du modèle sous *OpenModelica*.

Le lancement des simulations est effectué par un compiler (OMC pour *OpenModelica* Compiler) qui convertit le code Modelica en langage C. Le solveur utilisé pour résoudre notre système est le système DASSL, solveur proposé par défaut dans *OpenModelica*, car considéré comme stable pour une large gamme de modèles.

Ce solveur est basé sur la formule de différenciation inverse (Backward Differentiation Formula), qui est une famille de méthodes implicites d'intégration numérique. La méthode implicite consiste à déterminer la ou les solutions du modèle à un temps $t + \Delta t$, en résolvant une équation prenant en compte la valeur de la fonction en t et en $t + \Delta t$. La méthode explicite, elle, résout l'équation au temps $t + \Delta t$ à partir de la valeur de la fonction en t.

4.2 Caractérisation thermique par calibration du modèle RC

4.2.1 Démarche globale

Le modèle proposé et l'écriture du bilan d'énergie à sa surface extérieure (voir partie 4.1.2.3) mettent en évidence cinq paramètres à déterminer pour la caractérisation du système STEGOS :

- f_v (W.s/m^3.K) facteur d'échange thermique convectif ;
- f_c (-) facteur d'échange radiatif vers la voûte céleste ;
- f_{env} (-) facteur d'échange radiatif vers l'environnement ;
- α_{al} (-) le coefficient d'absorption de l'aluminium peint en noir ;
- f_s (-) un facteur solaire qui exprime l'apport indirect solaire dans la façade via les clapets.

L'identification de ces paramètres est ici réalisée à l'aide d'un modèle boîte grise. Cette approche par problème inverse consiste en l'identification des entrées X_i d'un modèle F (état initial, sollicitations et/ou paramètres de structure) à partir de la connaissance de ses sorties Y (voir Figure 4.6). Dans notre cas, nous souhaitons calibrer des paramètres constants à partir de sollicitations externes (conditions climatiques) et internes (intérieur de la boîte test) connues.

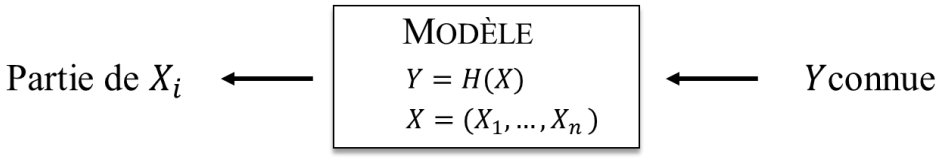


Figure 4.6 - Schématisation du problème inverse.

Cette identification est obtenue par optimisation, c'est-à-dire en minimisant l'écart entre les données de sortie du modèle *Y*, et celles mesurées. Cet écart, communément appelé fonction coût ou fonction objectif, est décrit en 4.2.2.2. Le choix de l'algorithme d'optimisation se base sur de multiples critères, tels que les temps de calculs ou le nombre de paramètres du modèle à identifier.

Pour s'assurer de la pertinence des résultats de l'optimisation, au sens où ils permettent une description correcte des phénomènes physiques en jeu, il faut au préalable vérifier que les variables d'entrées choisies aient un impact significatif sur la fonction coût. Pour cela, nous proposons en amont de l'optimisation, une analyse de sensibilité sur les paramètres du modèle. Les sections qui suivent présentent la démarche d'analyse de sensibilité, suivie de la caractérisation du système STEGOS.

L'analyse de sensibilité est réalisée sur les mesures avec clapets noirs, pour des angles de 0°, 45°, et 90° (utilisation des séquences n°1 à n°3). Les paramètres ont ensuite été identifiés à l'aide d'algorithmes d'optimisation pour des angles de 0° et 90°.

4.2.2 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité est l'étude de la manière dont l'incertitude de la sortie d'un modèle peut être attribuée à différentes sources d'incertitude dans l'entrée du modèle (Saltelli 2008). Elle permet donc d'identifier les paramètres les plus influents sur une sortie spécifique observée. Une utilisation courante de l'analyse de sensibilité est liée à la simplification d'un modèle de type boîte blanche ou grise, en supprimant les paramètres les moins influents de sorte à par exemple réduire les temps de calcul

Dans notre cas, une analyse de sensibilité permet d'étudier la pertinence des cinq paramètres listés en 4.2.1, et de connaitre leur ordre d'importance sur l'erreur du modèle prise ici comme la fonction coût. Elle permet également de s'assurer que d'autres paramètres, considérés *a priori* de l'analyse comme connus, ont également une influence significative, qui suggérerait alors une sélection différente des paramètres à identifier lors de l'optimisation pour l'identification. En outre, si l'analyse montre l'influence significative d'un paramètre d'entrée dans un sens inattendu (faible ou forte influence), il sera opportun de remettre en cause la qualité du modèle. Les facteurs trouvés comme très peu influents pourront être considérées comme des paramètres fixes dans l'optimisation.

4.2.2.1 Méthodes existantes

Trois classes de méthodes d'analyse de sensibilité peuvent être différenciées (Saltelli 2008) : les méthodes locales, globales et dites de *screening* (ou par criblage).

- Les méthodes locales ne font varier qu'un paramètre à la fois en fixant les autres à une valeur fixe ; elles évaluent donc quantitativement l'impact sur la sortie d'une variation locale en entrée.
- Les méthodes d'analyse de sensibilité globale étudient comment l'ensemble du domaine d'incertitude des entrées se répercute sur la variation de la sortie, en déterminant quelle part de variance de la sortie est due à telle entrée ou tel ensemble d'entrées.
- Les méthodes de *screening* peuvent être vues comme un intermédiaire entre les méthodes globales et locales, bien que pouvant être considérées comme une sous-catégorie des méthodes d'analyse de sensibilité globale. Comme les méthodes locales, elles consistent en une analyse de la sensibilité de la variable de sortie aux variables d'entrée, avec cependant moins d'évaluation du modèle que les méthodes globales.

De ces trois classes, l'analyse de sensibilité globale et les méthodes de screening semblent les plus pertinentes pour notre problème, car elles portent sur la variabilité de la réponse du modèle. La méthode de Morris (screening) et une analyse de variance par l'estimation des indices de Sobol (méthode globale) ont été choisies comme outils d'analyse de sensibilité de notre modèle et de certains de ces paramètres. Elles sont décrites dans les sections qui suivent.

4.2.2.1.1 Méthode de Morris

Cette méthode repose sur la répétition de plans OAT (« One step At a Time »), où les paramètres du modèle varient un à un à chaque exécution. Cette méthode permet de traiter un grand nombre de paramètres incertains pour un nombre d'évaluations du modèle relativement faible.

À chacun des paramètres à analyser est attribué un intervalle d'incertitude, qui est discrétisé en un nombre choisi d'intervalle q, puis normalisé. La méthode répète ensuite r fois un plan OAT de façon aléatoire dans l'espace pour créer un échantillonnage. À chaque répétition i, la valeur de tous les paramètres d'entrée est donc modifiée une fois, et la méthode calcule un effet élémentaire, noté E_j^i, pour chaque paramètre j :

$$E_j^i = \frac{H\left(x_1^i, \dots, \pm\delta, .., x_n^i\right) - H\left(x_1^i, \dots, x_j^i, .., x_n^i\right)}{\Delta} \qquad \text{E4.22}$$

Avec :

- i la répétition ;
- j le paramètre considéré ;
- H le modèle étudié ;
- x_1, …, x_n les n facteurs incertains ;
- n le nombre total de paramètres incertains ;

- Δ le saut des paramètres, proportionnel à la variation des paramètres et recommandé par Morris à $\Delta = \frac{q}{2(q-1)}$.

Deux indices, μ_j^* pour la moyenne des valeurs absolues de ces effets et σ_j pour l'écart type de ces effets, sont calculés comme suit :

$$\mu_j^* = \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}\left|E_j^i\right| \quad \text{E4.23}$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{r-1}\sum_{i=1}^{r}\left(E_j^i - \mu_j\right)^2} \quad \text{E4.24}$$

Plus μ_j^* est élevé, plus le paramètre j contribue à une sortie incertaine, et plus σ_j est élevé, plus les effets d'interaction entre les paramètres du modèle sont marqués. Le tracé de σ_j en fonction de μ_j^* est souvent utilisé pour distinguer les facteurs ayant des effets négligeables, linéaires et/ou avec interactions (Iooss 2009). Outre cette interprétation visuelle, il est aussi possible de calculer la distance euclidienne d à l'origine pour obtenir l'effet total du paramètre incertain.

4.2.2.1.2 Indices de Sobol et estimations

Soit une fonction F ayant pour variable d'entrée X_i, et variable de sortie Y. Les indices de Sobol permettent d'étudier combien la variance de Y est impactée par la valeur de X_i grâce à un indice de sensibilité S_i, indicateur normalisé qui est d'autant plus grand que la variable X_i est importante vis à vis de la variance de Y :

$$S_i = \frac{V(E[Y|X_i])}{V(Y)} \quad \text{E4.25}$$

Avec $E[Y|X_i]$ l'espérance de Y connaissant X_i, et $V(Y)$ la variance de Y. Ici, S_i mesure l'effet principal de X_i sans considérer ses interactions avec les X_j ($j \neq i$).

S_i est l'indice de sensibilité de premier ordre de Sobol (Sobol′ 2001), qualifiant la sensibilité de la sortie Y à la variance d'entrée X_i. La somme des indices de tous ordres est égale à 1. Ceux-ci étant tous positifs, plus ils sont proches de 1, plus la variable a de l'importance sur la sortie.

La décomposition de cette fonction en somme de fonctions de dimensions croissantes permet de définir des indices de sensibilité d'ordre supérieur à 1 ; les indices de sensibilité d'ordre 2 expriment par exemple la sensibilité de la variance Y à l'interaction des variables X_i et X_j.

4.2.2.2 Fonction coût

Lors d'une analyse de sensibilité ou d'une optimisation, la fonction coût peut être basée sur différents critères, considérant par exemple plusieurs variables de sorties. Dans notre cas de

transfert monodirectionnel, une fonction coût basée uniquement sur une mesure de température ou de densité de flux thermique dans la paroi est optée.

Deux indicateurs de performance sont utilisés pour ces travaux, l'erreur moyenne normalisée NMBE (Normalize Mean Bias Error) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne CV(RMSE) (Coefficient de Variation de l'erreur quadratique moyen), exprimés selon les équations suivantes :

$$NMBE = \frac{1}{\bar{y}} \frac{\sum_{t=1}^{N}(y_t - \hat{y}_t)}{N} \quad \text{E4.26}$$

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N}(y_t - \hat{y}_t)^2}{N-1}} \quad \text{E4.27}$$

Avec :

- y_t la variable de sortie mesurée au pas de temps t et $\bar{y}$ sa valeur moyenne ;
- $\hat{y}_t$ la variable de sortie calculée au pas de temps t ;
- $\overline{y_t}$ la valeur moyenne de la variable de sortie mesurée y_t ;
- N le nombre de valeurs de la variable de sortie.

Ces indicateurs ne traduisent pas les mêmes écarts. Le RMSE quantifie la dispersion quadratique entre mesure et simulation, tandis que le NMBE, lié à la moyenne de cet écart, indique si la simulation est plus ou moins centrée autour de la mesure. Moins fiable que le RMSE pour juger de la robustesse d'un modèle, son observation peut aider à voir si une modèle sur- ou sous-prédit une variable de sortie. Le CV(RMSE) sera la fonction coût utilisée pour l'identification des paramètres lors de l'optimisation.

4.2.2.3 Classification des paramètres

La démarche d'analyse de sensibilité comporte les étapes suivantes :

- La définition d'un intervalle de variation et des distributions de probabilité des paramètres incertains ;
- L'échantillonnage selon une taille d'échantillon et une méthode d'échantillonnage ;
- Les calculs des sorties du modèle ;
- Le calcul des indices de sensibilité ;
- L'interprétation des résultats.

Dans le cas d'un modèle coûteux en temps d'exécution, ou bien d'un modèle avec un grand nombre de facteurs (quelques dizaines), la méthode de Morris est un moyen simple de faire un premier tri parmi les facteurs selon leur influence. Nous utilisons donc dans un premier temps cette méthode, pour une observation des influences globales de nombreux facteurs, puis nous réalisons une analyse plus fine à l'aide de l'estimation des indices de Sobol, sur les facteurs prépondérants indiqués par la méthode de Morris.

4.2.2.3.1 Intervalles de variation

Les intervalles d'incertitude des paramètres incertains choisis pour cette analyse de sensibilité sont donnés dans le Tableau 4.1. Ces intervalles sont choisis selon notre estimation des valeurs des paramètres ou selon notre connaissance de sa valeur avec une incertitude de plus ou moins 20%.

Tableau 4.1 - Paramètres incertains : intervalles de variations utilisées.

Paramètre	Unité	Nom	Valeur minimale	Valeur maximale
f_v	W.s/m^3.K	Facteur d'échange thermique convectif	1	40
f_c	-	Facteur d'échange radiatif vers la voûte céleste	0,01	0.5
f_{env}	-	Facteur d'échange radiatif vers l'environnement	0,01	0,9
α_{al}	-	Coefficient d'absorption de l'aluminium	0,01	0,9
f_s	-	Facteur solaire indirect	0,1	0,9
ρ_{al}	kg/m^3	Masse volumique de l'aluminium	2160	3240
ρ_{mousse}	kg/m^3	Masse volumique de la mousse	16	24
ρ_w	kg/m^3	Masse volumique du contre-plaqué	360	540
ρ_{isol}	kg/m^3	Masse volumique de l'isolant polystyrène	26	39
λ_{al}	W/m.K	Conductivité de l'aluminium	8	12
λ_{mousse}	W/m.K	Conductivité de la mousse	0,048	0,072
λ_w	W/m.K	Conductivité du contre-plaqué	0,104	0,156
λ_{isol}	W/m.K	Conductivité de l'isolant polystyrène	0,025	0,032

4.2.2.3.2 Méthodes d'échantillonnage

L'échantillonnage peut être regroupé en trois familles principales (Recht 2016) : aléatoire (ou pseudo-aléatoire), stratifié, et quasi-aléatoire.

- Le tirage aléatoire est assimilé à la technique de tirage de Monte Carlo (Lemieux 2009) ; pour chacun des paramètres incertains, on effectue un grand nombre de tirages aléatoires dans leur distribution de probabilité, afin de déterminer la probabilité d'occurrence de chacun des résultats.
- L'échantillonnage stratifié, une alternative à la méthode de Monte-Carlo, consiste à subdiviser le domaine de chaque paramètre d'entrée en des segments de taille fixe ou variable et à ensuite trier aléatoirement un point dans chacun de ces segments.
- Enfin, l'échantillonnage quasi-aléatoire remplace les séquences générées aléatoirement avec la méthode de Monte-Carlo par des séquences prédéterminées visant à espacer les points du plan le plus possible les uns des autres et minimiser le volume des zones vides de l'espace. Il repose sur la discrépance (Lemieux 2009), c'est-à-dire la déviation de la répartition des points échantillonnés par rapport à une distribution.

Les méthodes aléatoires peuvent se révéler particulièrement lentes. Menant parfois à une mauvaise exploration de certaines dimensions (Faivre et al. 2013), les échantillonnages stratifiés et quasi-aléatoires lui sont souvent préférés.

Si dans la pratique, les indices de Sobol doivent être estimés en utilisant des intégrales de Monte Carlo, (Saltelli 2002) présente une stratégie d'échantillonnage en entrées qui peut être utilisée pour estimer les indices de premier ordre, de second ordre et totaux à un coût respectif de $N \cdot (n + 2)$ et $N \cdot (2n + 2)$ évaluations (N étant le nombre d'échantillons souhaités et n le nombre de paramètres incertains). L'échantillonnage réalisé pour Sobol est quasi-aléatoire à faible discrépance, et génère des échantillons uniformes de l'espace des paramètres.

L'échantillonnage pour Morris consiste en un ensemble de trajectoires aléatoires, chaque facteur ne variant qu'une seule fois par trajectoire (voir la partie 4.2.2.1.1).

4.2.2.3.3 Application : analyse de sensibilité par la méthode de Morris

Une analyse de sensibilité sur les paramètres listés en Tableau 4.1 est effectuée en utilisant la méthode de Morris. Elle est réalisée sur une fonction de coût d'erreur quadratique calculée sur la température en $_{w,e}$. Le jeu de données utilisé se compose d'un extrait de trois jours consécutifs sur chacune des séquences n°1 à n°3, ayant à chaque fois des profils d'ensoleillement et de vitesse de vent différents. La Figure 4.7 montre le jeu de données sélectionné dans la séquence n°1, c'est-à-dire pour les clapets fermés.

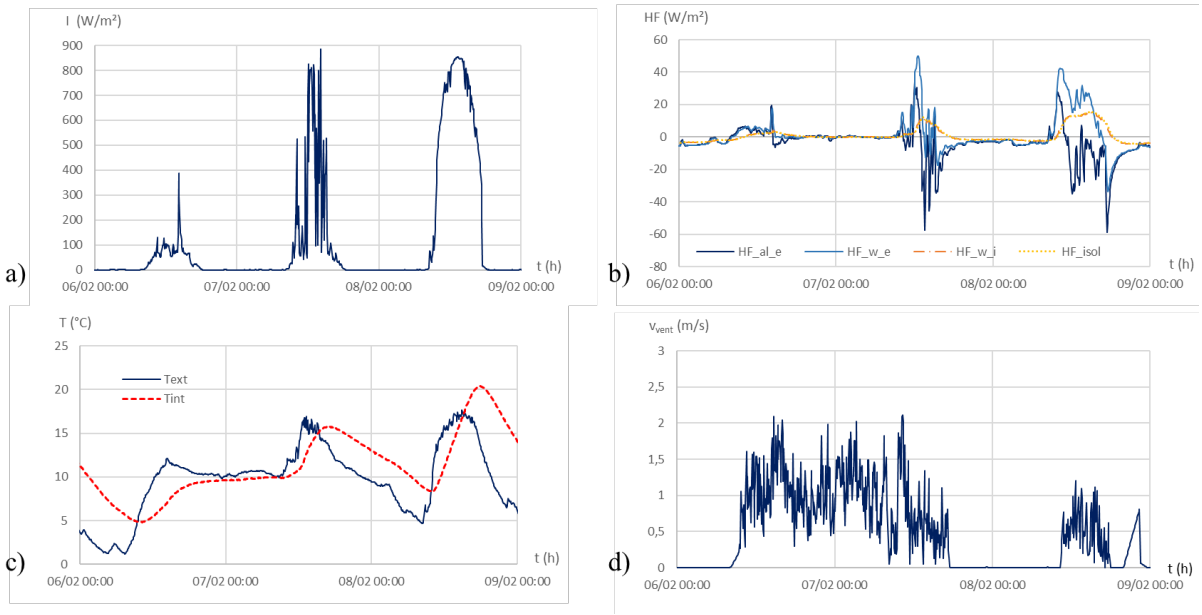


Figure 4.7 - Jeu de données extrait de la séquence n°1 pour l'analyse de sensibilité. a) Flux solaire incident, b) Flux mesurés dans les couches de la paroi testée, c) Températures d'air intérieure et extérieur, d) Vitesse du vent.

Dans le cadre de cette thèse, nous utilisons la bibliothèque SAlib développée en langage Python pour l'échantillonnage (Herman et Usher 2017). 15 répétitions OAT ont été simulées, avec un nombre d'intervalles de q = 5, et donc une discrétisation de l'espace de chaque paramètre de Δ = 0,6 (voir la partie 4.2.2.1.1). Le temps de calcul associé est d'environ 1 heure (processeur 11th Gen Intel(R), Core(TM) i7-1165G7, fréquence 2.80GHz).

Le poids total des paramètres sur l'erreur quadratique du modèle, pour clapets fermés, ouverts, et en position intermédiaire, est montrée en Figure 4.8. Les résultats montrent l'influence majoritaire des paramètres f_s, f_{ciel}, f_{env}, f_v dans le cas d'une configuration à clapets fermés. Le

coefficient α_{al} s'ajoute aux paramètres impactants pour les configurations avec clapets ouverts (45° ou 90) ; cette influence sur la variance de la variable de sortie est due à un ensoleillement projeté τ_{STEGOS} élevé en hiver, dans une localisation où l'élévation du soleil est faible à cette période de l'année.

L'observation des cinq paramètres incertains indique un poids prépondérant du facteur f_v lié au vent pour une ouverture de clapet à 90°. Cela peut suggérer un échauffement par projection solaire sur les clapets beaucoup plus sensible à la vitesse de vent, que l'on pourrait s'attendre à observer pour les clapets ouverts à 45°.

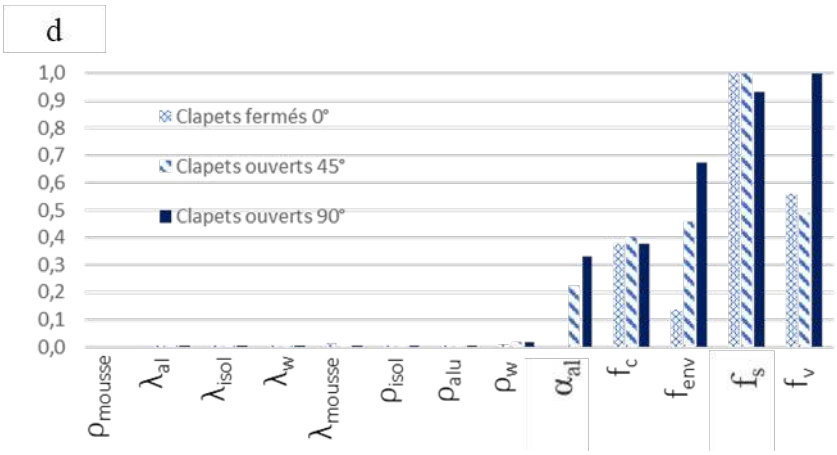


Figure 4.8 - Distance euclidienne normalisée d entre les deux indices de Morris (μi^*, σi) pour les trois ouvertures de clapets.

4.2.2.3.4 Application : analyse de sensibilité par estimation des indices de Sobol

Une analyse plus fine sur les cinq paramètres ouverts, se basant sur l'estimation des indices de Sobol d'ordre 1, fournit un rang d'influence sur l'erreur quadratique calculée en $T_{w,e}$. Comme pour la méthode de Morris, la bibliothèque SALib est utilisée pour l'échantillonnage, celle-ci permettant de calculer une estimation des indices de Sobol d'ordres 1, 2, et total. La Figure 4.9 présente les valeurs estimées des indices de Sobol à configurations ouverte (45°) et fermée. Bien que non représentée, la configuration complètement ouverte, c'est-à-dire avec des clapets à 90° en casquette, présente des résultats similaires à ceux des clapets à 45°.

Pour les trois configurations, le facteur le plus significatif sur l'erreur du modèle est le facteur solaire f_s, impactant le flux solaire incident I, un terme prépondérant du bilan. Dans la configuration ouverte, le facteur lié au vent f_v a également un poids significatif sur l'erreur. Comme observé avec le criblage de Morris, cela indique certainement un échauffement solaire de la paroi, qui n'est plus seulement associé à de la transmission par absorption des clapets mais aussi à une part absorbée par l'aluminium, sur laquelle le vent peut avoir un impact important par échanges convectifs forcés.

Les facteurs céleste f_c et d'environnement f_{env} ont un impact qui dépend peu des configurations. Dans tous les cas, les estimations de f_{env} proches de 5% indiquent un faible impact du coefficient, et ce malgré un intervalle de valeurs très large (voir Tableau 4.2). Cela suggère une

identification moins pertinente que pour les autres paramètres, dans le sens où la « qualité » de la valeur identifiée aura peu de poids sur la minimisation de la fonction coût.

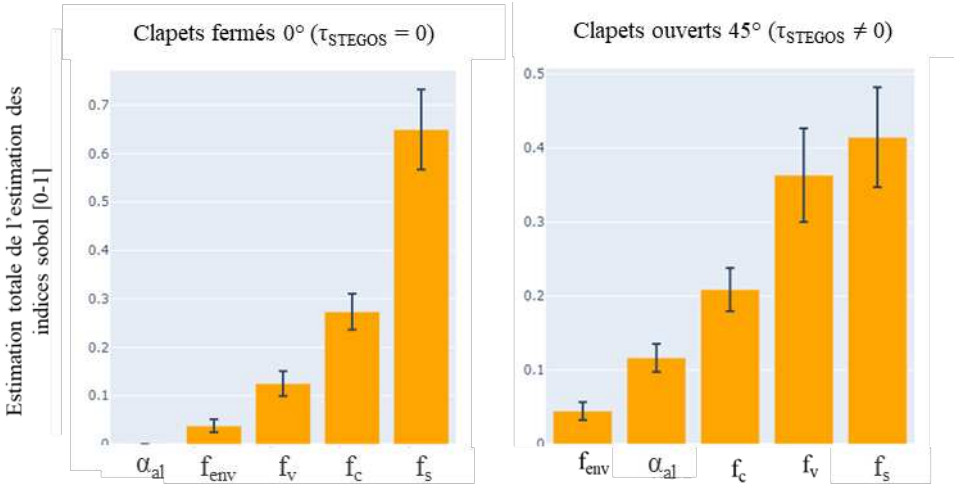


Figure 4.9 - Estimations des indices de Sobol sur les paramètres à identifier pour clapets fermés et ouverts.

Dans les deux cas, nous avons fixé l'échantillonnage à N = 600, donc 4200 échantillons. Le temps de calcul pour chaque configuration est d'environ 4 heures (processeur 11th Gen Intel(R), Core(TM) i7-1165G7, fréquence 2.80 GHz).

Notons que pour s'assurer de la validité de ces estimations, la somme totale des indices de Sobol doit se rapprocher de la valeur théorique de 1. La somme des indices vaut respectivement pour clapets fermés et ouverts 1,08 et 1,15. Une estimation des indices de Sobol pour clapets fermés avec un échantillonnage à N = 400, bien que deux fois plus rapide en temps de calculs, résulte en une somme des estimations à 1,39 et à un classement entre les paramètres f_{env}, f_v et f_c différent. Cela met en évidence l'importance de la taille de l'échantillonnage lors de l'analyse de sensibilité.

La visualisation en coordonnées parallèles de l'espace exploré lors de ces analyses de sensibilité, comme illustré en Figure 4.10, souligne des points d'attention pour l'identification des valeurs optimales de ces paramètres. En configuration ouverte, elle indique pour des estimations « centrées » et des erreurs quadratiques faibles des valeurs faibles du facteur céleste f_c avec des valeurs plutôt élevées pour f_{env}. Les paramètres incertains affectant le terme associé au flux solaire incident semblent se compenser car ils ont tous deux un impact sur l'apport solaire à travers la paroi. Cela présage donc un problème de capacité à identifier les deux facteurs. Pour les clapets fermés, cette même visualisation met en avant une sous-estimation de la température $T_{w,e}$ du modèle, indication possible d'informations manquantes dans la modélisation ou des erreurs de mesures potentielles.

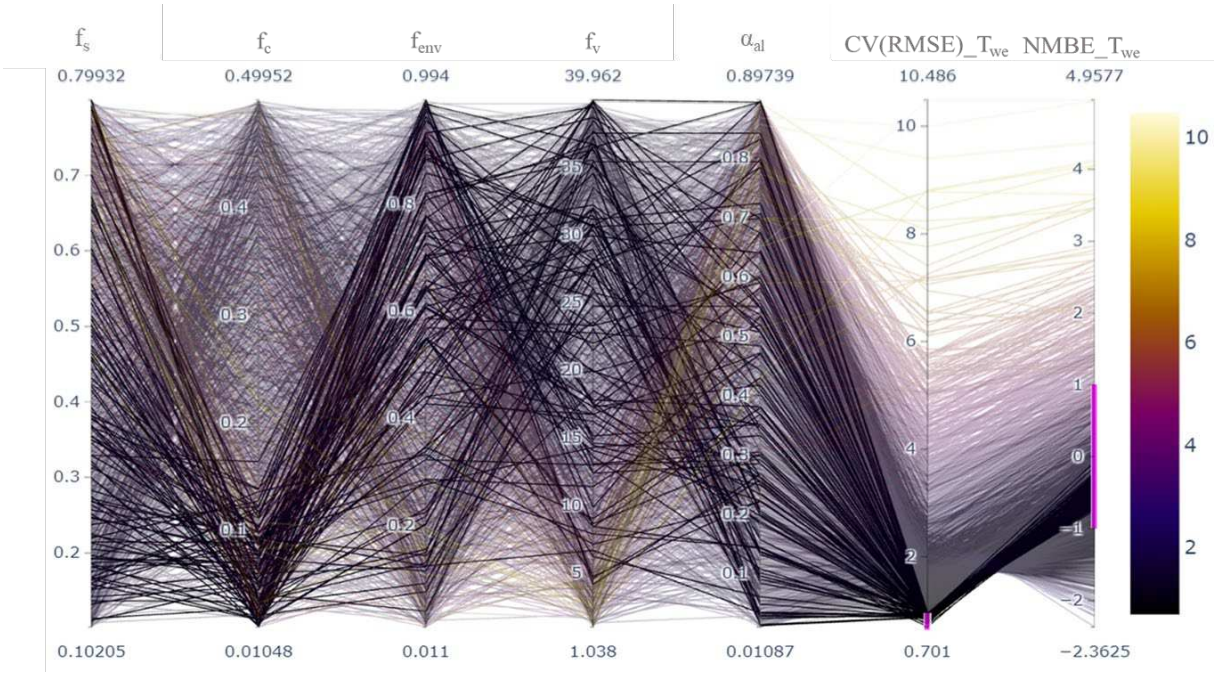


Figure 4.10 - Graphique en coordonnées parallèles représentant toutes les simulations réalisées lors de l'analyse de sensibilité pour la configuration à clapets ouverts avec les erreurs moyennes (NMBE) et quadratiques (CV(RMSE)).

Sur ce graphe dynamique, des plages de valeurs acceptables pour le CV(RMSE) et le NMBE ont été manuellement renseignées, minimisées pour le RMSE et centrées sur 0 pour le NMBE. Les simulations respectant ces contraintes apparaissent avec une intensité de couleur plus forte que les autres simulations. Il apparait que f_c tend à être minimisé, f_{env} et f_v plutôt maximisés, tandis que f_s et α prennent des valeurs sur toute leur plage de variation. Ceci peut s'expliquer par le fait que ce sont deux facteurs multiplicatifs du flux solaire incident. Ainsi, la baisse de l'un est compensée par la hausse de l'autre.

Cette dépendance pourrait être mise en avant par une analyse de sensibilité utilisant les estimations des indices de sensibilité de Sobol d'ordre 2.

4.2.2.3.5 Analyse de sensibilité dynamique

Si le facteur solaire n'intervient *a priori* qu'en journée, les autres paramètres ont également un impact non constant sur l'erreur du modèle ; l'impact du facteur céleste f_c dépend par exemple de la nébulosité, et f_v de la vitesse de vent. Une analyse de sensibilité dynamique a été réalisée pour pointer les périodes auxquelles les paramètres à identifier sont prépondérants sur l'erreur du modèle.

La Figure 4.11 présente l'estimation des indices de Sobol d'ordre 1 avec pour fonction coût l'erreur moyenne (NBME) en $T_{w,e}$ et pour fréquence d'estimations 15 minutes.

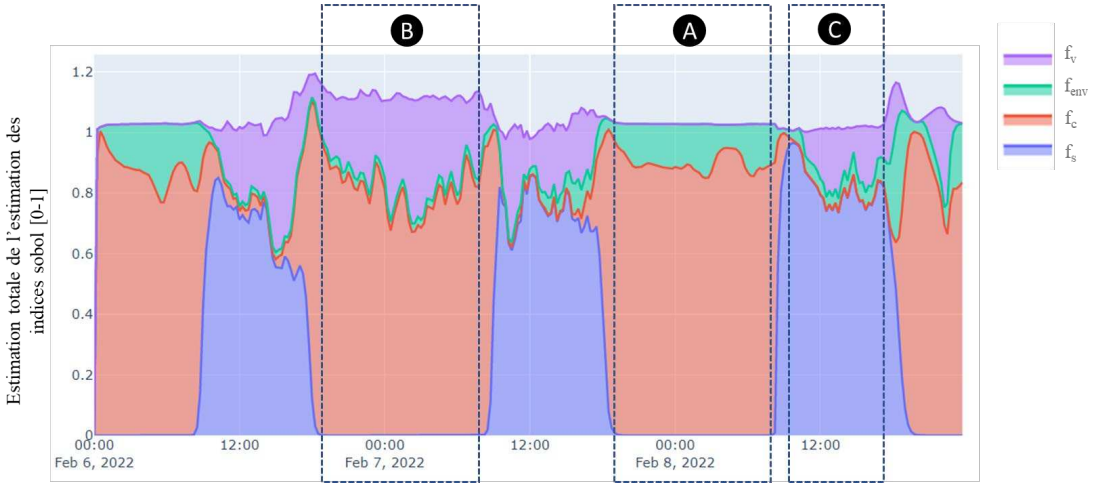


Figure 4.11 - Analyse de sensibilité dynamique et plages possibles pour une optimisation par partie sur l'erreur moyenne de $T_{w,e}$.

Elle indique le poids de chaque facteur sur la variance de l'erreur du modèle à différents instants. De façon très marquée, le facteur solaire f_s est prépondérant sur l'erreur en journée, et le facteur céleste f_c la nuit. En l'absence de vent la journée du 8 février, comme observé sur la Figure 4.7, le facteur f_v n'a presque aucune influence. Cette analyse semble également indiquer des échanges radiatifs avec l'environnement de nuit plus marqués (ou *a minima* plus impactants sur l'erreur du modèle) en l'absence de vent.

Notons que la somme de tous les indices estimés est à plusieurs reprises supérieure à 1, notamment la nuit. Lorsque l'erreur est faible, il est plus difficile d'expliquer sa variation. Les pics d'erreurs (somme des indices supérieure à 1 sur la Figure 4.11) apparaissent lorsque la température prédite et la température mesurée se croisent, l'erreur est alors très proche de 0. Il est aussi possible que la variation des paramètres influence moins la variation de l'erreur à ces moments-là, et souligne un problème lié aux entrées ou à la structure même du modèle.

Théoriquement, il serait possible de réaliser une identification séquentielle pour chaque paramètre : la plage considérée est restreinte à la période pendant laquelle son influence est la plus forte. Ici, nous proposerions d'identifier d'abord f_{env} et f_c sur la période (A), puis f_v sur la période (B) et enfin f_s sur la période (C). Afin de reconsidérer le problème dans sa totalité, une dernière identification peut être faite sur la base des valeurs trouvées de manière séquentielle avec des plages de valeurs possibles restreintes.

Cette méthode d'identification a été testée mais a montré des limites. Le facteur environnemental f_{env} et le facteur céleste f_c ont d'abord été minimisés sur la période (A), les valeurs identifiées étant aux bornes basses des intervalles de variation proposés, même lorsque ceux-ci ont été diminués par un facteur 10 à 100. Lors de la période (B), la valeur identifiée du facteur f_v est, elle, maximisée dans un premier temps à sa borne supérieure, fixée à 40 W.s/m^3.K, puis identifiée aux alentours de 60 W.s/m^3.K. Un tracé de toutes les simulations de $T_{w,e}$ faites avec l'échantillon de simulation de l'analyse de sensibilité indique en Figure 4.12 une sous-estimation systématique de la température prédite et ce pour toutes les valeurs possibles des paramètres du modèles. L'algorithme d'optimisation, cherchant ainsi à réduire la fonction coût,

converge donc sur des valeurs de f_c permettant un échange convectif important avec l'air extérieur, aidant ainsi à s'approcher de sa température. La valeur identifiée pour le facteur solaire sur la période (C) est ensuite naturellement maximisée.

Nous aurions par ailleurs pu suggérer un ordre d'identification basé sur la classification des paramètres obtenue par l'estimation des indices de Sobol : d'abord identifier f_s, puis f_s, etc. Notons que ces indices de sensibilités sont « relatifs », car ils sont normés par la variance à chaque pas de temps. Une prise en compte d'estimations des indices de Sobol non normés fournirait une information sur l'influence « absolue » de chaque paramètre, indiquant peut-être des périodes d'identifications plus adaptées que celles proposées sur la base de la Figure 4.7.

Malgré cela, l'optimisation par partie ne semble pas applicable dans étant donnée la sous-estimation systématique de la température prédite. Cet écart indique une erreur du modèle ou plus probablement de la mesure qu'il reste à résoudre. Les jeux de 3 jours sélectionnés, présentant des profils de rayonnement solaire, de vitesse de vent, et de température extérieure différentes, devrait cependant permettre une identification adéquate à valider sur une période différente.

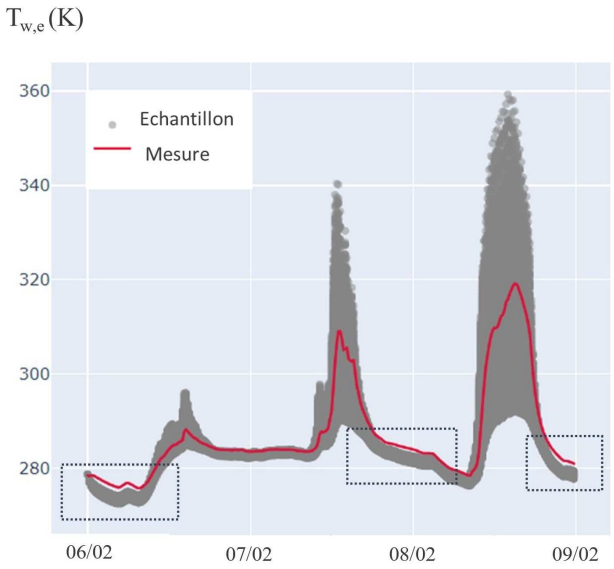


Figure 4.12 - Comparaison entre mesure et simulations de l'analyse de sensibilité ; les parties encadrées indiquent une sous-estimation des prédictions.

4.2.2.4 Synthèse

L'analyse de sensibilité en deux temps, à l'aide d'abord de la méthode de Morris puis avec l'estimation des indices de Sobol, a montré que les cinq paramètres identifiés sont bien les plus impactants du modèle proposé.

Le classement proposé par l'analyse utilisant l'estimation des indices de Sobol indique un facteur céleste f_c négligeable sur l'erreur du modèle lorsque les clapets sont fermés. Cela sous-entend que les échanges radiatifs avec le ciel sont intégrés au modèle sous une autre composante et que l'optimisation de ce paramètre aura peu d'importance pour minimiser la fonction coût.

Aux quatre facteurs ouverts pour clapets fermés s'ajoute le coefficient α_{al}, prenant en compte l'apport du rayonnement transmis à travers la plaque d'aluminium, lors que les clapets sont ouverts. Quelle que soit la configuration, le facteur f_s a le poids le plus important sur la variabilité de sortie de modèle.

Ces analyses ont donc aidé à anticiper les étapes d'optimisation, et certaines de leurs limites. La visualisation en coordonnées parallèles a par exemple indiqué un grand nombre de solutions pour un CV(RMSE) et un NMBE faibles, aux valeurs de paramètres variées, suggérant un problème d'identifiabilité. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité dynamique a mis en avant une piste de réflexion pour une identification des paramètres par partie, qui dans le cas présent semble inapplicable. La superposition de toutes simulations calculées pour l'estimation des indices de Sobol a souligné des limites dans le périmètre même du modèle ou des erreurs potentielles liées à la mesure.

4.2.3 Algorithmes de calibration

La recherche d'un ensemble optimal pour des paramètres incertains peut être complexe. Si le modèle proposé n'a pas un nombre élevé de paramètres, il reste nécessaire d'opter pour un algorithme d'optimisation adapté, qui évitera d'un part des temps de calculs trop longs ou des convergences vers des optimum locaux.

4.2.3.1 Méthodes existantes

Trois familles de méthodes d'optimisation sont présentées dans la littérature : énumératives, déterministes, et stochastiques (Goldberg et Holland 1988; Recht 2016).

- Les méthodes énumératives sont basées sur des processus combinatoires finis et permettent une résolution exacte du problème mais avec des temps de calcul élevés. La plus simple de ces méthodes est appelée « force brute » ou « naïve » et consiste à évaluer toutes les solutions existantes du problème de façon exhaustive.
- Les méthodes déterministes nécessitent des propriétés mathématiques de la fonction coût, telles que la continuité, la dérivabilité, ou encore la convexité. Elles peuvent être classées en méthodes déterministes directes et indirectes. Les méthodes déterministes directes s'appuient directement sur les sorties du modèle dans la fonction coût, les indirectes utilisent la valeur du gradient et des propriétés mathématiques calculées à partir de la fonction coût.
- Enfin, les méthodes stochastiques utilisent des processus d'exploration (pseudo-) aléatoires, dont l'optimisation dépend de la mémorisation des meilleures solutions, ou bien pseudo-aléatoires. Ces derniers utilisent une exploration « intelligente » de l'espace de décision : les solutions qu'ils apportent ne sont pas forcément optimales, mais peuvent être suffisantes selon le degré de précision recherché par l'optimisation.

L'approche stochastique pseudo-aléatoire semble adaptée pour notre application, car relativement rapide. Parmi elles, on peut trouver les méthodes métaheuristiques de voisinage,

qui opèrent par trajectoire en faisant progresser une solution à la fois. On peut également dissocier les méthodes métaheuristiques distribuées, qui elles, manipulent un ensemble de solutions du problème appelé « population ». Peuvent être cités dans la littérature les algorithmes d'estimation de distribution (essaim particulaire (Kennedy et Eberhart 1995), colonie d'abeilles artificielles (Kiran et Babalik 2014), colonie de fourmis (Maniezzo, Gambardella, et de Luigi 2004)) ou les algorithmes évolutionnaires.

Dans le cadre de travaux annexes à cette thèse, menés au sein de l'équipe de recherche commune GP2E[8] entre l'Université de Bordeaux et NOBATEK/INEF4, des algorithmes génétiques, un type d'algorithme évolutionnaire, ont été utilisés sur des modèles RC de bâtiment pour la détermination de paramètres ouverts. Par continuité, notre choix s'est porté sur ces algorithmes génétiques.

4.2.3.2 Principes des algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires sont des méthodes d'optimisation basées de la théorie de l'évolution de Darwin. Comme souligné par Recht (2016), ils ont l'avantage de ne pas nécessiter de connaissance sur la régularité (linéarité, monotonie) du modèle optimisé. Seule la connaissance des valeurs des fonctions à optimiser aux points échantillonnés est requise, permettant ainsi une exploration globale de l'espace de recherche par la manipulation d'un ensemble de solutions. Le principe des algorithmes évolutionnaires repose sur deux mécanismes du vivant abordés dans le Chapitre 2 : la sélection naturelle et l'échange de matériel génétique *via* la reproduction. Ainsi, ils font évoluer un ensemble (ou « population ») de solutions (ou « individus »).

Les algorithmes sont conçus de sorte que meilleure est la qualité de leur phénotype (ou « *fitness* »), plus ils ont de chance de transmettre leur génotype à la génération suivante de la population.

4.2.3.2.1 Déroulement

Le processus de l'algorithme regroupe deux types d'opérateurs principaux : des **opérateurs de sélection** pour la sélection et le remplacement, et des **opérateurs de variation**, pour la mutation et le croisement. La Figure 4.13 présente les mécanismes mis en jeu.

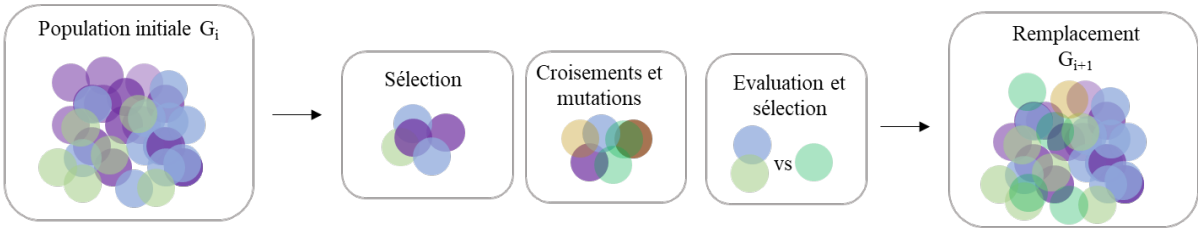


Figure 4.13 - Principe de fonctionnement des algorithmes évolutionnaires pour le passage d'une génération G_i à la génération suivante G_{i+1}.

[8] GP2E : « Garantie des performances énergétique et environnementale des bâtiments »

Dans un premier temps, la sélection des individus consiste à détecter et sélectionner les individus de la population ayant un bon *fitness*, c'est-à-dire une bonne réponse au regard des critères d'optimisation fixés. Après sélection, la reproduction génère des descendants à l'aide d'opérateurs de variation par croisement. Enfin, la sélection pour le remplacement sert à engendrer la population de la génération suivante. Bien souvent, l'algorithme sélectionne une part des meilleurs individus existants, population initiale ou descendante. Le processus d'itération prend fin selon un critère d'arrêt qui peut être défini par un nombre fixe d'itérations, sur une vitesse de convergence ou de dispersion de la population.

4.2.3.2.2 Opérateurs de sélection

Les stratégies de sélection mises en œuvre dans la littérature sont nombreuses. On trouve par exemple la « sélection proportionnelle », qui effectue un tirage aléatoire, biaisé par des probabilités proportionnelles aux performances des individus (Schaffer 1985). La « sélection par rang » attribue une probabilité de sélection proportionnelle au rang de chaque individu au sein de la population classée par ordre de performance décroissant (Lutton 2004). Plus simplement, la sélection par tournoi consiste à choisir le meilleur individu parmi une sélection aléatoire de p individus dans la population. Ces approches sont variées, et l'hybridation d'une ou plusieurs d'entre elles n'est pas exclue.

4.2.3.2.3 Opérateurs de variation

Les deux objectifs des opérateurs de variation sont le croisement et la mutation. Le croisement consiste en la transmission du matériel génétique de plusieurs individus à leurs descendants. Il existe différents niveaux d'organisation pour le patrimoine génétique : chromosome, gènes, puis allèles. Les différentes versions alléliques d'un même gène peuvent être codées à l'aide de suites binaires, appelées bits. Si le modèle à optimiser est décrit de façon binaire, les opérateurs génétiques auront lieu sur les différents bits des chaines binaires qui le constitue, au regard d'une probabilité de croisement p_c donnée. La littérature présente divers opérateurs, tels que croisement à un ou deux points de coupure (voir Figure 4.14), ou encore croisement uniforme. Pour un modèle où la représentation binaire se prête mal, les opérateurs pour une représentation réelle (ou continue) permettent un mélange des génotypes à l'aide de croisement spécifiques. Le croisement barycentrique étendu permet par exemple la génération d'un descendant $c(i)$ à partir de deux individus $p_1(i)$ et $p_2(i)$ tel que :

$$c(i) = p_1(i) + \beta[p_2(i) - p_1(i)] \qquad \text{E4.28}$$

Avec :

- β une variable uniforme aléatoire $\in [-a, 1+a]$;
- a un paramètre positif ou nul, dont la valeur fixée à $a = 0{,}5$ est préconisée par Eshelman and Schaffer (1993).

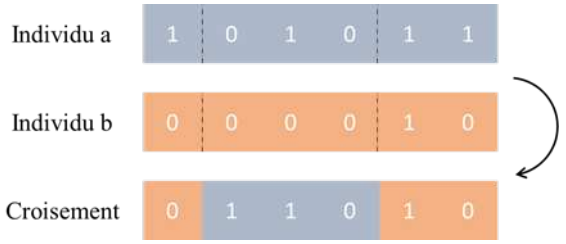


Figure 4.14 - Croisement binaire à deux points de coupure.

La mutation implique des changements aléatoires spontanés dans le patrimoine génétique d'un individu, créant de fait des phénotypes parfois inédits. En représentation continue, les opérateurs classiques sont les mutations uniformes, gaussiennes, et gaussiennes auto-adaptatives.

4.2.3.2.4 Choix de l'algorithme à évolution différentielle

Comme précisé en amont, le choix de l'algorithme d'optimisation doit se porter sur un algorithme capable de fournir de bonnes propriétés de convergence pour un minimum global de la fonction coût. L'algorithme évolutionnaire choisi pour notre problème est un algorithme à évolution différentiel, proposé par Storn & Price (1997).

La méthode utilise *NP* vecteurs $x_{i,G}$ comme population pour une génération *G* (*NP* entiers naturels, étant fixes pendant le processus d'optimisation). La population initiale de vecteurs est choisie au hasard et doit couvrir tout l'espace des paramètres. L'algorithme génère de nouveaux vecteurs, appelés « vecteurs candidats », en choisissant aléatoirement un vecteur de population qu'il ajoute à la différence pondérée entre deux autres, également choisis aléatoirement :

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + \beta \cdot \left(x_{r2,G} - x_{r3,G}\right) \qquad \text{E4.29}$$

Avec :

- $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \ldots, \mathrm{NP}\}$ des indices aléatoires différents ;
- $\beta \in \{1, 2, \ldots, NP\}$ un facteur constant positif contrôlant l'amplification de la variation entre $x_{r2,G}$ et $x_{r3,G}$;
- $x_{r1,G}$ le candidat originel, qui est la meilleure solution locale actuelle (c'est-à-dire avec la fonction coût la plus faible ou le meilleur *fitness c*).

Une distribution binomiale est ensuite réalisée pour savoir si ce nouveau vecteur est conservé à la place du candidat originel. C'est le cas si un nombre aléatoirement généré compris entre 0 et 1 est inférieur à la constante de recombinaison, connue sous le nom de probabilité de croisement ou CR (*CRossover probability*).

La *fitness c* du vecteur candidat est ensuite évaluée et comparée au candidat initial pour sélectionner le vecteur de paramètre final :

$$x_{i,G+1} = v_{i,G+1} \text{ si } c\left(v_{i,G+1}\right) > c\left(x_{i,G}\right) \qquad \text{E4.30}$$

$$x_{i,G+1} = x_{i,G} \text{ sinon}$$

La Figure 4.15 illustre le processus de génération des vecteurs de paramètres pour tendre vers un minium.

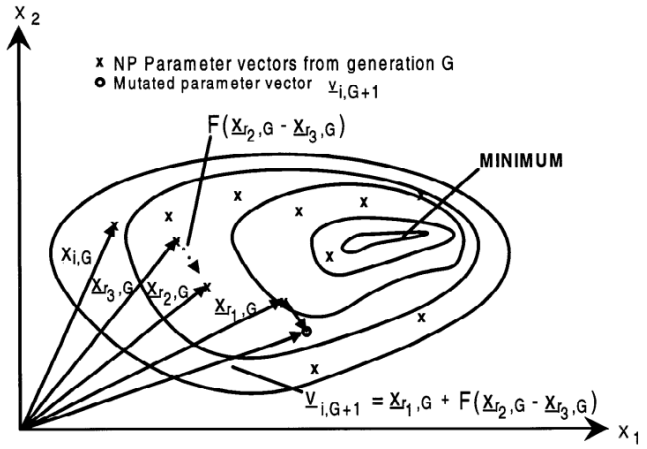


Figure 4.15 - Exemple d'une fonction de coût à 2 dimension, montrant ses lignes de contour et le processus de génération des vecteurs de paramètres $v_{i,G+1}$ (Storn et Price 1997).

Les chances de trouver un minimum global peuvent être augmentée avec une taille de population et des constantes de mutation plus élevées et des probabilités de croisement plus faibles. Si le rayon de recherche est élargi, cela a pour contrepartie de ralentir la convergence.

4.2.3.3 Utilisation sous langage Python pour la calibration

L'algorithme de calibration a été utilisé sous Python à l'aide de deux librairies : OMPython (*OpenModelica* Python), créant le lien entre l'interface *OpenModelica* et Python, et SciPy, proposant des algorithmes d'évolution différentielle (*SciPy documentation*). La Figure 4.16 présente le processus d'optimisation utilisé et les environnements associés.

Par défaut, SciPy propose une probabilité de croisement de $CR = 0{,}7$. La constante de mutation, F est par défaut contenue dans la plage [0 ; 2] et modifiée de manière aléatoire, génération par génération.

Le temps de calcul associé à l'évaluation des paramètres est de l'ordre de 30 minutes (processeur 11th Gen Intel(R), Core(TM) i7-1165G7, fréquence 2.80 GHz).

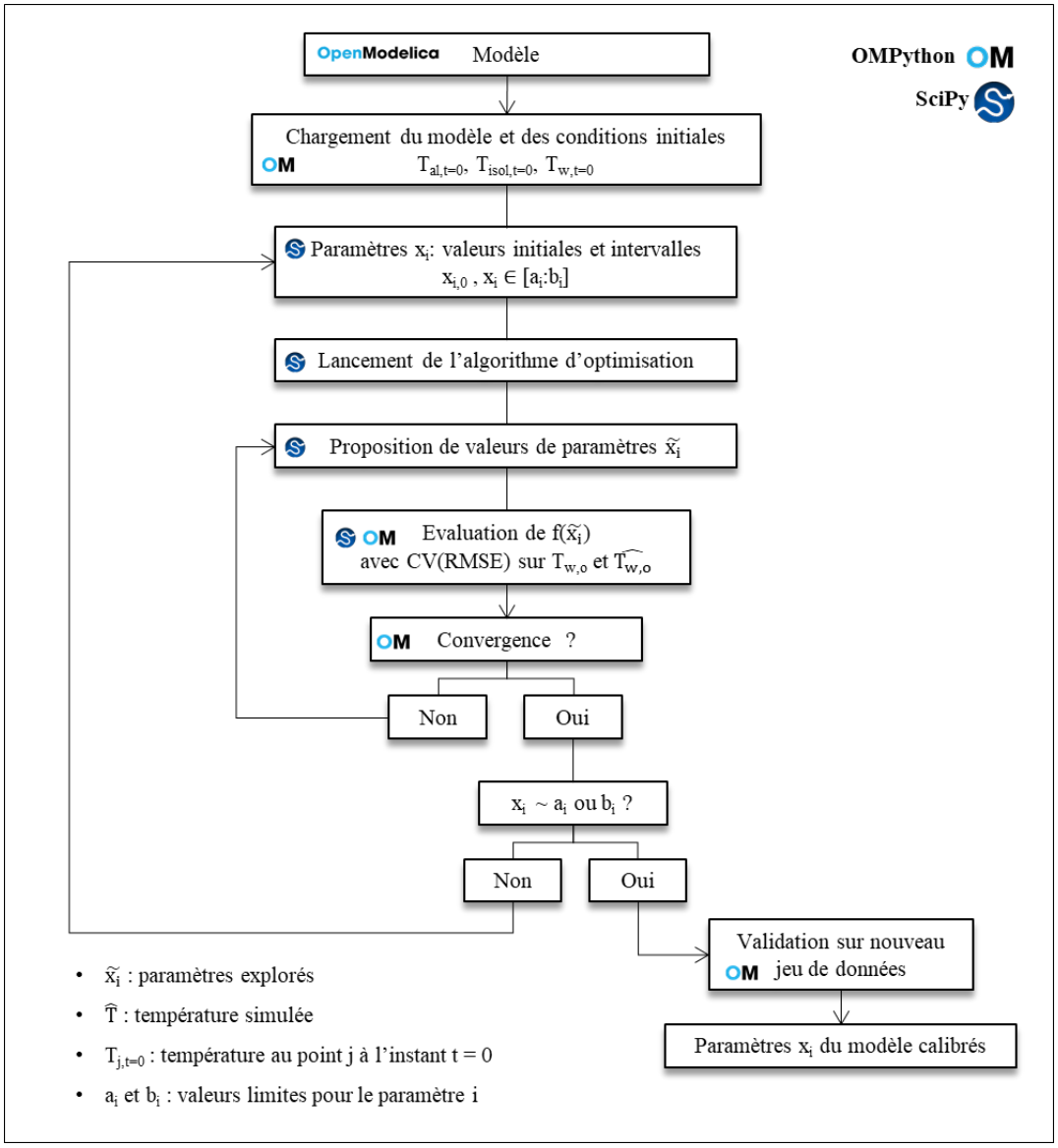


Figure 4.16 - Processus de calibration et interfaces utilisées.

Notons qu'il arrive que les paramètres proposés par l'algorithme prennent une valeur finale proche ou égale aux valeurs limites inférieures ou supérieures définies avant lancement de l'optimisation. Quand c'est le cas, il convient alors d'itérer le processus de calibration en modifiant les bornes initiales, afin de laisser plus de liberté à l'algorithme lors de l'exploration des valeurs et des croisements réalisés.

4.2.3.4 Identification des paramètres

L'identification des paramètres a été effectuée sur les journées utilisées pour les analyses de sensibilité, à savoir pour la séquence n°1 et la séquence n°2. La simulation sur 4 autres journées de ces séquences a ensuite permis une étape de validation des valeurs proposées par l'optimisation, en indiquant un NBME et CV(RMSE) faibles. Les conditions initiales des paramètres pour les clapets en position fermée (45°) et en position ouverte (90°) sont données dans le Tableau 4.2.

Les résultats de l'optimisation apparaissent dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.2 - Paramètres incertains : intervalles de variations.

	Clapets fermés (0°)			Clapets ouverts (90°)		
x_i	Init	min	max	Init	min	max
f_v	1	0.002	2	5	1	20
f_c	0,1	0,001	0,5	0,1	0,05	0.5
f_{env}	0,05	0,001	0,5	0,5	0,05	0,9
α_{al}	-	-	-	0,1	0,05	0,6
f_s	0,3	0,05	0,9	0,1	0,05	0,6

Tableau 4.3 - Valeurs des paramètres après optimisation et erreurs associées.

	Clapets fermés (0°)					Clapets ouverts (90°)				
		Calibration (06/02 – 09/02)		Validation (10/02 – 14/02)			Calibration (22/02 – 25/02)		Validation (18/02 – 21/02)	
x_i	$x_{i,cal}$	NMBE	CV (RMSE)	NMBE	CV (RMSE)	$x_{i,cal}$	NMBE	CV (RMSE)	NMBE	CV (RMSE)
f_v	0,020					7,1				
f_c	0					0,11				
f_{env}	0,0013	0,24%	0,65%	0,38%	0,86%	0,55	0.21 %	0,61 %	0,42 %	0,92 %
α_{al}	-					0,15				
f_s	0,16					0,32				

Notons que les valeurs CV(RMSE) et NMBE sont très faibles, car calculées sur des températures en Kelvin (température en SI dans *Modelica*) et non en Celsius. La comparaison de leur valeur entre périodes de calibration et validation indique néanmoins une estimation des paramètres qui permet une simulation de qualité sur une période différente de celle utilisée par l'algorithme d'optimisation.

4.2.3.5 Interprétation des résultats

L'optimisation sur les deux configurations montrent des estimations de paramètres différents. Pour des clapets fermés, le facteur solaire f_s de 0,16 signifie que 16 % du flux solaire incident est absorbé par la plaque aluminium. L'apport solaire total pour clapets ouverts est bien plus élevé, puisqu'il comprend à la fois un facteur solaire de 0,32 et une contribution directe par projection solaire.

Le facteur de vitesse du vent f_v est à comparer à l'indice proposé par McAdams (1994) de 3,4, qui reflète la protection contre le vent assurée par les clapets. Lorsque ceux-ci sont ouverts, la valeur fournie par l'optimisation de 7,1 est cohérente avec la valeur de référence (voir partie 4.1.2.2), montrant bien l'intégration d'une composante convective forcée par le vent bien incluse dans le bilan énergétique du mur. Cependant, lorsque les clapets sont fermés, le facteur lié au vent devient insignifiant. Nous pourrions nous interroger sur l'influence des jeux de mesures utilisés pour l'identification, et de la vitesse de vent associée. Néanmoins, les jeux de données choisis pour la calibration présentent tous les deux des séquences avec et sans vent, suggérant une identification non impactée par la présence ou absence excessive de vent.

Les algorithmes d'optimisation tendent à minimiser le facteur céleste pour les deux cas, quelles que soient les conditions initiales, suggérant une contribution biaisée des échanges radiatifs avec le dôme céleste pour le modèle. Pour une émissivité proche de $\varepsilon_{al,noir} = 0,9$, un facteur f_c de 0,11 suggèrerait un facteur de vue vers le ciel de l'ordre de 0,12, ce qui parait réaliste. De façon attendue, le facteur d'échange radiatif avec l'environnement indique une valeur très faible pour les volets fermés mais plus élevée lorsqu'ils sont ouverts, avec une valeur de 0,55 correspondant à un facteur de vue.

Les Figure 4.17 et Figure 4.18 présentent la comparaison entre températures prédites et mesurées sur la plage d'optimisation pour clapets fermés et ouverts, en $T_{w,e}$.

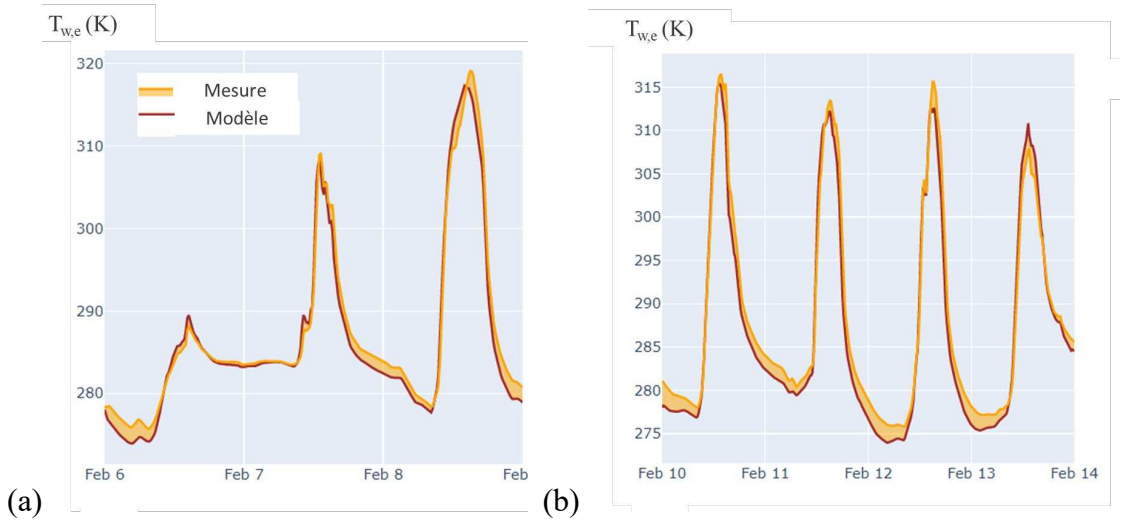


Figure 4.17 - Mesure et modèle pour (a) la période d'entrainement et (b) la période de validation sur clapets fermés.

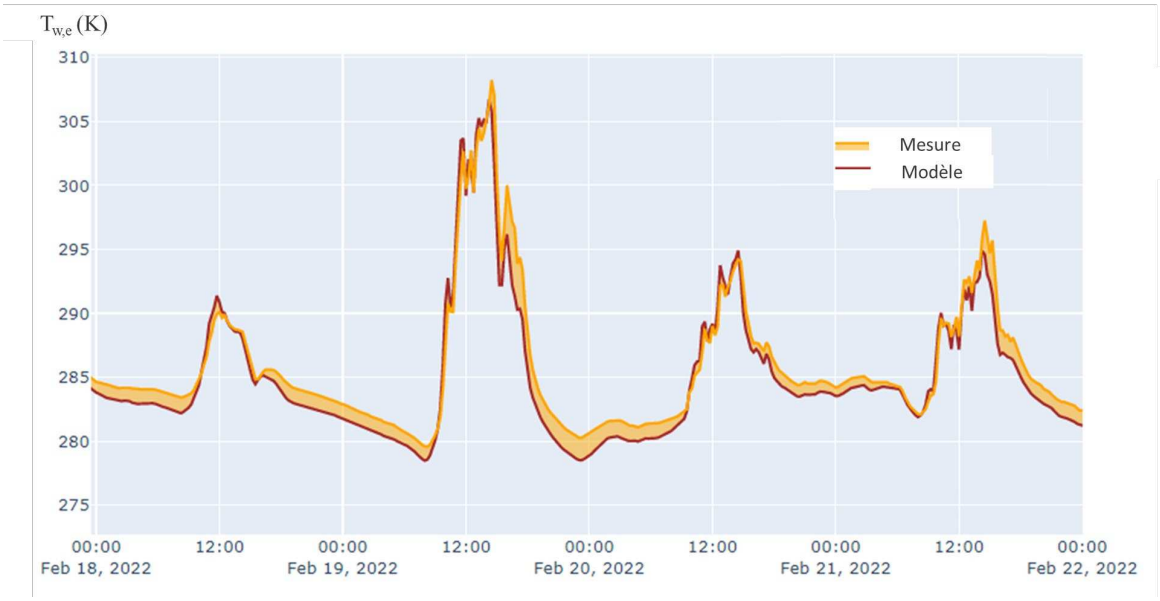


Figure 4.18 - Mesure et modèle pour la période de validation sur clapets ouverts.

Le modèle calibré reproduit de façon réaliste le comportement mesuré, notamment en journée avec les sollicitations solaires. Comme observé lors de l'analyse de sensibilité dynamique, la prédiction sous-estime néanmoins la température la nuit.

4.2.4 Discussions

Le choix des cinq paramètres à identifier a été validé par une analyse de sensibilité qui a montré leur influence sur l'erreur du modèle. Les valeurs trouvées par optimisation à l'aide d'algorithmes à évolution différentielle sont cohérentes avec les deux configurations d'ouvertures de clapets du système testé. Par exemple, le facteur lié à l'environnement a une valeur proche de 0 quand les clapets sont fermés, indiquant l'absence d'échanges radiatifs entre la plaque aluminium et l'environnement extérieur, et une valeur de 0,55 consistante avec un facteur de vue.

L'optimisation a cependant confirmé quelques limites du modèle, que l'analyse de sensibilité avait laissé entrevoir. Si le CV(RMSE) et NMBE sont faibles, une erreur systématique sur la prédiction de $T_{w,e}$ persiste, suggérant un ou plusieurs phénomènes physiques non pris en compte dans le modèle, ou bien de façon incorrecte. Cette erreur systématique peut également être liée à la mesure. En outre, lors de l'identification de certains paramètres, l'algorithme d'optimisation a plusieurs fois convergé sur des valeurs de paramètres à leurs bornes d'intervalle, notamment f_{env} pour la configuration en clapets fermés, et f_c pour les deux configurations. Le modèle tel que calibré peut donc être discuté dans son périmètre d'utilisation.

4.2.4.1.1 Les conditions aux limites

Rappelons qu'une partie des conditions aux limites externes (températures de l'environnement et du ciel) sont calculées en utilisant la mesure de la température d'air extérieur. S'il est courant de prendre la température extérieure ambiante comme approximation pour la température de l'environnement, le calcul de la température du ciel sans prendre en compte la nébulosité est plus critiquable, et pourrait donc être une source d'erreur la nuit par temps nuageux. L'accès à des données météorologiques libres de droit a été envisagée pour pallier ce manque d'information, mais celle-ci n'existe généralement qu'avec un pas de temps de 1 heure, et parait donc moins pertinente pour un modèle d'un pas de temps de 15 minutes. Il serait néanmoins intéressant de réestimer les paramètres avec un modèle au pas de temps plus long et comparer les résultats de modèles avec le calcul de température de ciel, et avec un calcul autre, prenant en compte la nébulosité.

La condition limite intérieure a été fixée par la mesure de la densité de flux surfacique sur la surface intérieure. Le choix aurait pu se porter sur la température intérieure mais aurait de fait ajouté une résistance d'échange surfacique convective au modèle dont l'erreur paraissait non négligeable.

Enfin, la possibilité d'erreurs de mesure aux conditions limites doit être envisagées. Bien que doublées, celles-ci ont montré quelques différences lors des comparaisons faites en 3.3.4.6 qui pourraient être sources de problème dans la calibration du modèle.

4.2.4.1.2 Fonction coût

La fonction coût a été calculée sur la température $T_{w,e}$, de façon à observer des variations très impactées par les sollicitations extérieures. Il serait néanmoins intéressant de tester un point de mesure sur une interface plus éloignée, telle que $T_{w,i}$. Cependant la mesure double en ce point a montré des valeurs un peu différentes, la confiance en la mesure sélectionnée est donc moindre. Le choix d'utiliser une température plutôt qu'un flux est par ailleurs arbitraire. Quelques essais sur *OpenModelica* indiquent une erreur sur la prédiction plus élevée, certainement due à une variation de flux mesuré plus importante comparée à la température. Une comparaison entre température ou flux comme fonction coût pour l'identification des paramètres nécessiterait cependant la prise en compte d'incertitudes liées à l'erreur des capteurs sur la modélisation.

4.2.4.1.3 Structure du modèle

Outre les conditions aux limites et les fonctions coût choisis, le modèle même est discutable dans sa structure. Il est possible de s'interroger sur la pertinence de l'absence d'un nœud sur les clapets, qui permettrait d'intégrer des échanges radiatifs avec la fine plaque d'aluminium. Ces échanges expliqueraient peut-être une partie du flux négatif observé sur la plaque d'aluminium malgré un bilan positif au travers de la paroi en journée (voir 3.3.4.6.4). En revanche, ils ajouteraient d'autres échanges à modéliser, et donc d'autres inconnues et incertitudes associées.

La convection naturelle et forcée par le vent pourrait prendre en compte cette température, en adaptant des modèles basés sur vitesse de vent et gradient de température avec la température ambiante (par exemple les modèles proposés sur surface vitrées verticales, ou bien face/contre le vent par Yazdanian & Klems (1993)).

4.3 Perspectives

4.3.1 Inférences bayésiennes

Une attention particulière sur les résultats de l'optimisation est requise. Malgré la convergence d'un algorithme d'optimisation, il reste possible – selon le type d'algorithme choisi – de trouver un minimum local, ne donnant pas une solution optimale ou adéquate au problème. Un modèle, dont la description physique est erronée, mais dont la combinaison de paramètres fournit des variables de sorties proches de la mesure, est également une possibilité à éviter. Il est donc nécessaire de garder un regard critique sur les résultats obtenus afin de s'assurer qu'ils ont bien un sens physique.

Dans notre cas, certains résultats sont difficiles à expliquer, notamment les phénomènes physiques en jeu la nuit, qui interrogent sur la validité des paramètres identifiés et de leur estimation.

Une approche complémentaire pour la validation des paramètres serait d'employer l'approche bayésienne, au sens du théorème de Bayes, afin de savoir ce qu'il est possible d'obtenir à partir

des données mesurées et des valeurs des paramètres prises *a priori*. Pour cette approche, Kennedy and O'Hagan (2001) proposent une manière de calibrer les modèles numériques en faisant usage des inférences bayésiennes, qui présentent deux avantages notables. D'une part, les paramètres sont représentés sous la forme de fonctions de densité de probabilité. La méthode permet donc d'améliorer nos connaissances *a priori* des paramètres afin d'en obtenir une densité de probabilité *a posteriori* : plutôt qu'une seule valeur, on aurait ainsi une distribution. D'autre part, l'approche peut considérer l'erreur du modèle (ou « *model discrepancy* ») qui permettrait de tenir compte de phénomènes physiques mal modélisés voire absents. Certains problèmes, tels que ceux observés la nuit, pourraient potentiellement être résolus.

Des travaux sur cette approche ont été initialisés avec l'utilisation de la librairie PyMC sur Python (Anon [2009] 2022), pour la modélisation statistique bayésienne. Néanmoins, ils sont à ce jour trop peu avancés pour que des résultats soient présentés dans cet ouvrage.

4.3.2 Vers un modèle pour un système adaptatif

L'identification des paramètres pour la configuration avec des clapets orientés à 45° reste à faire pour établir des conclusions sur l'évolution que prennent les paramètres d'une configuration à l'autre. Cette évolution pourrait être non monotone, notamment à cause de phénomènes convectifs et radiatifs très impactés par l'ouverture du clapet au regard de la plaque aluminium. C'est d'ailleurs ce qui avait été suggéré en comparant certaines mesures en 3.3.9.2.

Il serait pourtant souhaitable d'obtenir un modèle où les paramètres décrivant le STEGOS (tels que les cinq paramètres étudiés dans notre modèle) sont fonction des clapets, et notamment de leur angle de rotation et de leurs propriétés radiatives. L'identification de ces paramètres pour clapets noirs, puis blancs, à différentes ouvertures devrait aider à s'orienter vers un modèle harmonisé. Cette démarche permettrait en autres de pouvoir caractériser un système muni d'un revêtement thermochromique, dont le coefficient d'absorption solaire s'exprimerait en fonction de la température des clapets. De futures expérimentation pourraient permettre la validation d'un tel modèle ou l'aide à sa calibration.

4.3.3 Conclusion

Le modèle présenté dans ce chapitre a pour but d'évaluer l'impact thermique du STEGOS, notamment devant une paroi opaque, selon l'angle d'orientation de ses clapets et la couleur de leur revêtement.

L'approche classique d'optimisation sur une période de trois jours donne des résultats satisfaisants. En revanche, l'utilisation d'une calibration par partie sur la base d'une analyse de sensibilité dynamique a montré des limites. Le modèle peut être discuté sur son périmètre, la modélisation de l'erreur elle-même (ou plus probablement de la mesure) et notamment sur la précision des capteurs de température. L'utilisation prochaine de méthodes d'inférences bayésiennes pourrait peut-être pallier ce problème.

Par ailleurs, la caractérisation proposée a été réalisée dans une configuration avec clapets noirs fermés et ouverts, et devra être confrontée à d'autres mesures ; dans un premier temps à la configuration clapets noirs ouverts à 45°, dont les phénomènes physiques en surface extérieure devraient différer au niveau des échanges radiatifs et convectifs, puis au revêtement blanc, et enfin à un revêtement thermochromique, nécessitant la réalisation d'une nouvelle campagne de mesures.

Si la calibration du modèle proposé n'est pas tout à fait aboutie, elle introduit une démarche à adopter qui, à terme, permettrait la caractérisation du STEGOS selon les trois configurations envisagées : opaque, devant vitrage, et en tant qu'enveloppe. Cette dernière, dont la paroi testée serait seulement composée de la plaque aluminium perforée et des clapets orientables, nécessiterait toutefois une modélisation complexe des écoulements d'air au sein du système, ainsi qu'un couplage avec de nouvelles séries de mesures. Pour favoriser l'écoulement de l'air dans la paroi ouverte, tout en permettant la mesure, un trou dans la paroi opposée munie d'un anémomètre à fil chaud semble une solution adaptée.

Le STEGOS n'est qu'une version du concept bio-inspiré issu d'un atelier d'idéation. La composante déformable de celui-ci a, dans un premier temps, été écartée à la faveur de l'évaluation de l'inclinaison des clapets sur une structure rigide et plate. Son évaluation potentielle, à l'aide du prototype déformable montré en fin de Chapitre 3, bénéficierait ainsi considérablement de la calibration des modèles déjà effectuée. Nous pourrions ainsi avoir un seul modèle décrivant tous les phénomènes physiques, s'appuyant sur toutes les séquences afin de s'assurer d'une certaine cohérence physique dans les identifications de paramètres.

En outre, cette approche considère les principaux transferts de chaleur, et est donc déclinable pour tout type de solutions de parois. Le système d'enveloppe STEGOS, ou le concept déformable, pourrait être combiné à d'autres types de parois que celles proposées. Par exemple, l'échauffement important observé sur le STEGOS en journée pourrait être mis à profit en le combinant à une paroi ayant une forte inertie, ou encore à des matériaux à changement de phase pour une restitution différée de la chaleur stockée.

D'autres éléments d'enveloppes innovants pourraient également être testés et caractérisés, avec par exemple des temps de mesure plus longs (de plusieurs semaines) que ceux utilisés pour ces travaux. Un pilotage de la température intérieure pour une meilleure connaissance des échanges conductifs pourrait être réalisée, par sa stabilisation ou sa sollicitation par des séquences de chauffage. Cette deuxième approche permettrait d'obtenir une décorrélation entre les phénomènes physiques du système testé et les conditions climatiques extérieures.

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté a porté sur la proposition d'une méthode de conception de systèmes d'enveloppes de bâtiment inspirés du vivant. L'analyse de la littérature et de cas pratiques a souligné quelques freins à la concrétisation de principes bio-inspirés, ainsi qu'une absence d'harmonisation des processus de conception employés par les praticiens. Ainsi, nous avons entrepris de nous approprier les différentes étapes de la conception d'une enveloppe de bâtiment bio-inspirée, et de porter la démarche jusqu'à son terme à travers une application expérimentale.

L'étude bibliographique a indiqué un nombre élevé de principes bio-inspirés, dont seule une faible part est poussée jusqu'à l'intégration à des bâtiments. En raison de la nature interdisciplinaire de la démarche, les concepteurs doivent relever des défis qui sont propres à la bio-inspiration : la recherche et sélection de modèles biologiques pertinents notamment, et le transfert de multiples fonctions trouvées dans le vivant vers une solution technologique viable. Pour mieux comprendre cet écart, une analyse de trente applications d'enveloppes bio-inspirées a été menée, en lien direct avec les concepteurs. S'il existe un large éventail de méthodes et outils dans la littérature pour soutenir les processus de conception bio-inspirés, il est ressorti de ces échanges une absence quasi-systématique de méthodologie de conception rigoureuse. Cela a indiqué une volonté des concepteurs de s'appuyer sur des méthodes et habitudes de processus de création qui leur sont propres. La collaboration avec des biologistes, par interventions ponctuelles ou co-développements, est par ailleurs apparue comme levier fort pour la proposition de concept bio-inspirés multifonctionnels, qui dépasse rarement le stade de prototype.

Face à ces observations, nous avons choisi de développer un cadre de conception structurant intégrant des outils accompagnant l'idéation de concepts. Ainsi, nous avons d'abord décrit les exigences et attentes liées à l'enveloppe du bâtiment afin d'identifier un ou plusieurs domaines biologiques dont s'inspirer dans notre démarche. Les constructions animales et les enveloppes biologiques ont été retenues comme périmètre biologique exclusivement étudié dans le cadre de ces travaux. Selon des critères variés, plus de 50 modèles biologiques ont été décrits sous un regard de concepteur mettant en avant une à plusieurs fonctions régulatrices répondant à des sollicitations environnementales biotiques ou abiotiques. Cette caractérisation a été synthétisée sous la forme d'une base de données, détaillant des techniques constructives, propriétés de matériaux et comportements divers. Pour la tester en tant qu'outil d'abstraction, plusieurs ateliers d'idéation intégrant des profils variés du secteur du bâtiment ont été organisés pour la proposition de concepts d'enveloppes bio-inspirées. Une proposition basée sur les propriétés thermiques du papillon morpho et du caméléon a été formalisée en un concept de membrane déformable composée d'une multitude de clapets orientables dont le revêtement présente un

coefficient d'absorption adaptatif lié aux changements de température. Il permet ainsi la gestion de chaleur, d'air et de lumière, selon son intégration devant une paroi, un vitrage ou en tant qu'enveloppe intégrale. Sa conception a ensuite nécessité différentes itérations, entre conceptions paramétriques et étapes de prototypage.

Un prototype de 1 m² non déformable mais constitué de clapets orientables et peints avec une peinture thermochromique, a été réalisé et appelé STEGOS. Afin de mesurer les phénomènes physiques en jeu à une échelle représentative et dans des conditions climatiques réelles, un banc de mesure mobile pouvant intégrer le STEGOS a été conçu et instrumenté. L'exploitation des séquences de mesures, menées en faisant varier le revêtement et le degré d'ouverture des clapets, a permis l'observation de plusieurs phénomènes physiques, néanmoins complexes à comparer entre configurations pour des conditions climatiques variables. Nous avons donc combiné ces mesures à un modèle théorique partiel de type RC, intégrant cinq paramètres à identifier. Validés comme impactants sur l'erreur du modèle par une analyse de sensibilité, ces paramètres ont ensuite été optimisés pour quelques configurations à l'aide d'algorithmes à évolution différentielle. Les valeurs identifiées indiquent notamment un apport solaire total plus élevé pour une configuration avec des clapets ouverts, mais une prise en compte des échanges radiatifs avec le ciel complexe, suggérant de potentiels problèmes de mesure à intégrer à notre analyse.

L'objectif de ces travaux est la proposition d'une méthode de conception accompagnée d'outils dédiés aux concepteurs, afin de faciliter la conception d'enveloppes du bâtiment bio-inspirées performantes. En nous basant sur un état de l'art des pratiques de conception, nous avons exploré une démarche expérimentale et participative, permettant l'idéation d'un concept et son transfert vers un produit.

L'approche utilisée pour aider à l'inspiration et l'idéation de concept a été mixte, balancée entre attraits technologiques (*problem-driven*) et poussées biologiques (*solution-based*). D'une part lors de la sélection d'un périmètre biologique comme source d'inspiration et choisi en lien avec les exigences relatives à l'enveloppe ; ce choix a certes limité les modèles exploités lors des ateliers, mais en a permis un meilleur approfondissement et a assuré leur pertinence vis-à-vis de l'enveloppe du bâtiment. D'autre part dans l'animation des ateliers, dont les cahiers des charges spécifiés aux participants ont été soit superficiels, pour la recherche d'idée sans trop de contraintes, soit très spécifiques pour une recherche active vers un but précis. La créativité est un comportement humain complexe, si bien qu'un cadre de conception trop structurant, comme suggéré par les échanges avec les concepteurs menés lors de l'état de l'art, est un risque de contre-productivité pour la création de concepts nouveaux.

En outre, la caractérisation menée sur les enveloppes biologiques et les constructions animales, base des réflexions menées lors des ateliers, a été proposée sous divers formats : recherche d'informations par mots-clés à l'aide d'une arborescence, fiches illustrées, tableaux de base de données, graphiques radar, etc. Cette variation de supports, d'un atelier à l'autre, a eu pour but

d’appréhender leur capacité à stimuler mentalement les participants à penser à des applications créatives, autrement dit à les inspirer.

Le concept bio-inspiré formalisé dans ces travaux a été prototypé en une version spécifique, et partiellement caractérisé. La performance d’un tel concept et de toutes ces variantes intégrées au bâtiment – en termes de bénéfices énergétiques et de durabilité – n’a donc pas été évaluée. Cependant, cette première phase de conception est une étape indispensable pour montrer comment l’inspiration par le vivant peut *in fine* participer à la performance d’un bâtiment. Cet approfondissement du concept, de sa faisabilité et de ses limites, est une confrontation entre la pratique et la conception numérique. Bien que souvent opposés, les travaux menés ont souligné de nombreuses itérations entre les deux domaines : guidé par un concept initial pouvant évoluer au cours du processus, des itérations entre étapes de fabrications et conception numérique ont été menées pour des améliorations progressives. La méthode de conception proposée est donc un compromis entre une approche rigide, théorisée et ayant trait aux sciences, et une approche libre et plus intrinsèquement itérative.

Les activités explorées ont nécessité le développement d’outils de conception, un apport majeur et original étant l’enrichissement d’une base de données sur les enveloppes du vivant avec les constructions animales. Sa structuration, dédiée aux concepteurs d’enveloppes, devrait permettre le lien entre biologie et technologie pour inspirer de nouveau systèmes. A l’instar de AskNature (Deldin et Schuknecht 2014b), site open-source structurant 2,000 entrées de modèles biologiques, l’interface de notre base de données pourrait prochainement être retravaillée, de sorte à faciliter sa navigabilité, et élargir son accessibilité. Sur ce sujet, plusieurs institutions de recherche telles que le MNHN, le Ceebios et des partenaires industriels, ont entamé en 2020 des recherches collaboratives afin d'initier une infrastructure mutualisée contenant une matériauthèque du vivant caractérisée (Ceebios). Si l’outil proposé sert de passerelle vers la biologie pour les concepteurs, rappelons qu’il a nécessité une interaction avec des biologistes continue, qui a permis son enrichissement et la validation de la base de données. Outre ces collaboration, l’accès à la donnée biologique est un pan crucial pour le développement de la pratique bio-inspirée. Ainsi, de la même façon qu’une compétence en biologie est nécessaire, nous encourageons à intégrer une compétence industrielle dès les phases amonts de la conception, de sorte à prendre en compte les enjeux de fabrication à grande échelle et éviter des applications bio-inspirées ponctuelles, dont la conception s’achèverait au stade de prototype.

La base de données biologiques fournie aux participants lors du premier atelier avait, pour une raison chronologique au regard du début des travaux de thèse, un nombre limité d’entrées. Si les travaux se sont plus concentrés ensuite sur les constructions animales, le concept développé est basé sur l’analyse d’enveloppes biologiques. De nouveaux ateliers, focalisés sur les constructions animales, pourront aboutir dans un avenir proche à la proposition de nouveaux concepts formalisés.

Des travaux sur la modélisation restent à faire. Le modèle du STEGOS a été défini par plusieurs paramètres inexploitables au regard de logiciels de simulation thermique. Il serait pertinent de

réduire le modèle actuel à un modèle caractérisé par deux paramètres propres au STEGOS : un coefficient de transmission thermique U_{STEGOS} et un facteur solaire f_{STEGOS}, eux-mêmes fonctions des propriétés géométriques et radiatives des éléments qui les composent. Le STEGOS ayant un comportement proche d'un collecteur solaire, cette détermination permettrait la prédiction des coefficients de transmission thermique et facteurs solaires résultants devant des parois diverses. Ainsi, il serait possible de travailler par simulation sur le pilotage des clapets et de leur couleur, en permettant par exemple un captage de chaleur maximisé l'hiver, et minimisé l'été, et ce sur diverses parois. A cela s'ajoutent deux autres contraintes à prévoir : le caractère dynamique du système (couleur, position des clapets, et éventuellement déformation) à intégrer dans la modélisation, et la transition à l'échelle d'un bâtiment, en vue de son évaluation globale.

Enfin, les travaux ont mené à un protocole expérimental associé à une méthode de calibration qui doit permettre la caractérisation de la performance intrinsèque d'éléments d'enveloppe. La construction et l'instrumentation de la boîte test mobile permet de mener des campagnes de mesures de différents types d'éléments d'enveloppes et de les caractériser en un temps court par l'utilisation de modèles physiques associés à des méthodes d'optimisation. De nouveaux systèmes en cours de conception, issus d'une démarche bio-inspirée ou non, pourraient bénéficier de ces développements pour leur évaluation en conditions réelles. De manière plus générale, cette approche doit être transférée vers des bancs d'essais à échelle 1:1 en cours de conception par NOBATEK/INEF4. L'objectif est alors de proposer une méthode de caractérisation de la performance de systèmes d'enveloppe complexes pour lesquelles les indices de caractérisation classiques sont limitants.

Bibliographie

Al Dakheel, Joud, et Kheira Tabet Aoul. 2017. « Building Applications, Opportunities and Challenges of Active Shading Systems: A State-of-the-Art Review ». *Energies* 10(10):1672. doi: 10.3390/en10101672.

Alexander, Christopher. 1964. « Notes on the Synthesis of Form ». *Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts* (7).

Al-Obaidi, Karam M., Muhammad Azzam Ismail, Hazreena Hussein, et Abdul Malik Abdul Rahman. 2017. « Biomimetic Building Skins: An Adaptive Approach ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79:1472-91. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.028.

Altschuller, Genrich. 1988. *Creativity as an exact science*.

Altschuller, Genrich. 2004. « And Suddenely the Inventor Appreared ». *Technical Innovation Center Inc.*

Anon. 2001. *Dictionnaire Le Grand Robert de la langue française*. Paris, France.

Anon. 2006. *Découvrir la biologie*. Bruxelles [Paris]: De Boeck.

Anon. 2021. « OliKrom, expert en intelligence des couleurs ». Consulté 26 mai 2021 (https://www.olikrom.com/fr/).

Anon. [2009] 2022. *PyMC library*. PyMC.

Anon. 2022a. « Rhino and Grasshopper Developer Documentation ». Consulté 11 mai 2022 (https://developer.rhino3d.com/).

Anon. 2022b. « SciPy documentation ». Consulté 5 mai 2022 (https://docs.scipy.org/doc/scipy/index.html).

Archer, Bruce L. 1963. « Systematic method for designers ». *Design*.

Asdrubali, Francesco, Francesco D'Alessandro, et Samuele Schiavoni. 2015. « A Review of Unconventional Sustainable Building Insulation Materials ». *Sustainable Materials and Technologies* 4:1-17. doi: 10.1016/j.susmat.2015.05.002.

Badarnah, Lidia. 2017. *Towards the LIVING envelope: biomimetics for building envelope adaptation*. Vol. 91.

Badarnah, Lidia, et Usama Kadri. 2015a. « A Methodology for the Generation of Biomimetic Design Concepts ». *Architectural Science Review* 58(2):120-33. doi: 10.1080/00038628.2014.922458.

Badarnah, Lidia, et Usama Kadri. 2015b. « A methodology for the generation of biomimetic design concepts ». *Architectural Science Review* 58(2):120-33. doi: 10.1080/00038628.2014.922458.

Barozzi, Marta, Julian Lienhard, Alessandra Zanelli, et Carol Monticelli. 2016. « The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture ». *Procedia Engineering* 155:275-84. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.029.

Baumann, H., F. Boons, et A. Bragd. 2002. « Mapping the green product development field : engineering, policy and business perspectives ». 10:409-25.

Bellia, Laura, Concetta Marino, Francesco Minichiello, et Alessia Pedace. 2014. « An Overview on Solar Shading Systems for Buildings ». *Energy Procedia* 62:309-17. doi: 10.1016/j.egypro.2014.12.392.

Benyus, Janine M. 2012. « A Biomimicry Primer: Resource handbook ». 10.

Bernard, Claude, et Georges Canguilhem. 1966. *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Reprod. en fac-sim. Paris: J. Vrin.

Blessing, Lucienne T. M. 1994. « A process-based approach to computer-supported engineering design: University of Twente, Enschede, 1994. Title ». *University of Twente, Enschede*.

Blessing, Lucienne T. M., et Amaresh Chakrabarti. 2009. *DRM: A Design Reseach Methodology*. London: Springer London.

de Buffrénil, V., J. O. Farlow, et A. de Ricqlès. 1986. « Growth and Function of Stegosaurus Plates: Evidence from Bone Histology ». *Paleobiology* 12(4):459-73. doi: 10.1017/S0094837300003171.

Burkhardt, Berthold. 2020. « Soap-film and Soap-bubble Models ». P. 569-85 in *PHYSICAL MODELS*, édité par B. Addis. Wiley.

Caldas, Luisa, Annalisa Andaloro, Giuseppe Calafiore, Keiko Munechika, et Stefano Cabrini. 2018. « Water Harvesting from Fog Using Building Envelopes: Part I ». *Water and Environment Journal* 32(4):493-99. doi: 10.1111/wej.12335.

Ceebios. s. d. « BioMIg - Bio-inspired materials open innovation generator ». 7.

Certivéa, CSTB. 2008. *Référentiel pour la qualité environnementale des batiemnts - Etablissement de santé*.

Chakrabarti, Amaresh, et Lucienne T. M. Blessing. 2014. « An Anthology of Theories and Models of Design ».

Chakrabarti, Amaresh, et Lucienne T. M. Blessing. 2015. « A review of theories and models of design ». *Journal of the Indian Institute of Science* 95(4):325-40.

Chakrabarti, Amaresh, Prabir Sarkar, B. Leelavathamma, et B. S. Nataraju. 2005. « A Functional Representation for Aiding Biomimetic and Artificial Inspiration of New Ideas ». *AI EDAM* 19(02). doi: 10.1017/S0890060405050109.

Chayaamor-Heil, Natasha, François Guéna, et Nazila Hannachi-Belkadi. 2018. « Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils ». *Cahiers de la recherche architecturale, urbaine et paysagère* (1). doi: 10.4000/craup.309.

Chirazi, Jacques, Kristina Wanieck, Pierre-Emmanuel Fayemi, Cordt Zollfrank, et Shoshanah Jacobs. 2019. « What Do We Learn from Good Practices of Biologically Inspired Design in Innovation? » *Applied Sciences* 9(4):650. doi: 10.3390/app9040650.

Clarkson, John, et Claudia Eckert. 2005. *Design process improvement*.

Collignan, Arnaud. 2012. « Méthode d'optimisation et d'aide à la décision en conception mécanique : Application à une structure aéronautique ». 211.

Correa, David, Oliver David Krieg, Achim Menges, Steffen Reichert, et Katja Rinderspacher. 2013. « Hygroskin: A Climate-Responsive Prototype Project Based on the Elastic and Hygroscopic Properties of Wood ». 10.

Costamagno, Sandrine, Carolyn Barshay-Szmidt, Delphine Kuntz, Véronique Laroulandie, Jean-Marc Pétillon, Myriam Boudadi-Maligne, Mathieu Langlais, Jean-Baptiste Mallye, et Aude Chevallier. 2016. « Reexamining the Timing of Reindeer Disappearance in Southwestern France in the Larger Context of Late Glacial Faunal Turnover ». *Quaternary International* 414:34-61. doi: 10.1016/j.quaint.2015.11.103.

Cross, Nigel. 2008. *Engineering design methods: strategies for product design*. 4th ed. Chichester, England ; Hoboken, NJ: J. Wiley.

Cruz, Estelle. 2021. « Caractérisation Multi-Critères Des Enveloppes Biologiques : Vers La Conception de Façades Multi-Fonctionelles ». MNHN-CEEBIOS, Paris, France.

Cruz, Estelle, Tessa Hubert, Ginaud Chancoco, Omar Naim, Natasha Chayaamor-Heil, Raphaël Cornette, Lidia Badarnah, Kalina Raskin, et Fabienne Aujard. 2021. « Design Processes and Multi-Regulation of Biomimetic Building Skins: A Comparative Analysis ». *Energy and Buildings* 246:111034. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111034.

Darakdjian, Quentin. 2018. « Prédiction des performances énergétiques des bâtiments avec prise en compte du comportement des usagers ». 249.

Darwin, Charles. 1859. « L'Origine des espèces ». 964.

Davidson, Diane W., et Doyle McKey. 1993. « The evolutionary ecology of symbiotic ant-plant relationships ». *Journal of Hymenoptera Research* 2:13-83.

Deldin, Jon-Michael, et Megan Schuknecht. 2014a. « The AskNature Database: Enabling Solutions in Biomimetic Design ». P. 17-27 in *Biologically Inspired Design*. Vol. 6. London: Springer London.

Deldin, Jon-Michael, et Megan Schuknecht. 2014b. « The AskNature Database: Enabling Solutions in Biomimetic Design ». P. 17-27 in *Biologically Inspired Design*, édité par A. K. Goel, D. A. McAdams, et R. B. Stone. London: Springer London.

Díaz, Sandra, Josef Settele, Eduardo Brondízio, Hien T. Ngo, Maximilien Guèze, John Agard, Almut Arneth, Patricia Balvanera, Kate Brauman, Robert T. Watson, Ivar A. Baste, Anne Larigauderie, Paul Leadley, Unai Pascual, Brigitte Baptiste, Sebsebe Demissew, Luthando Dziba, Günay Erpul, Asghar Fazel, Markus Fischer, Ana María, Madhav Karki, Vinod Mathur, Tamar Pataridze, Isabel Sousa Pinto, Marie Stenseke, Katalin Török, et Bibiana Vilá. 2019. *Résumé à l'intention des décideurs du rapport sur*

l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques.

Dubberly, Hugh. 2005. « Design Methods Compilation ». *How do you design?* 147. doi: 10.1016/j.bbamcr.2006.09.022.

Duffie, John A., et William A. Beckman. 2013. *Solar engineering of thermal processes / John A. Duffie, William A. Beckman*. 4th ed. Hoboken: John Wiley.

Dugué, Antoine. 2013. « Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments: analyse expérimentale et propositions de modélisations ».

Elghawaby, Mahmoud. 2013. « Vers un confort thermique grâce à des concepts d'enveloppes de bâtiments, inspirés de la nature : Le mur respirant comme un exemple biomimétique approprié aux bâtiments en zones chaudes ». Marseille, France.

Emmel, Marcelo G., Marc O. Abadie, et Nathan Mendes. 2007. « New External Convective Heat Transfer Coefficient Correlations for Isolated Low-Rise Buildings ». *Energy and Buildings* 39(3):335-42. doi: 10.1016/j.enbuild.2006.08.001.

Engelhardt, Sebastian, et Jamal Sarsour. 2015. « Solar Heat Harvesting and Transparent Insulation in Textile Architecture Inspired by Polar Bear Fur ». *Energy and Buildings* 103:96-106. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.053.

Eshelman, Larry J., et J. David Schaffer. 1993. « Real-Coded Genetic Algorithms and Interval-Schemata ». P. 187-202 in *Foundations of Genetic Algorithms*. Vol. 2. Elsevier.

European Comission. 2019. « Nature-Based Solutions ». Consulté 13 mai 2022 (https://web.archive.org/web/20190923161801/http://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs).

Evins, Ralph, Viktor Dorer, et Jan Carmeliet. 2014. « Simulating External Longwave Radiation Exchange for Buildings ». *Energy and Buildings* 75:472-82. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.030.

Faivre, Robert, Bertrand Loos, Stéphanie Mahévas, Bruno Goffinet, et Andrea Saltelli. 2013. *Analyse de sensibilité et exploration de modèles: application aux sciences de la nature et de l'environnement*. Paris: Editions Quae.

Farlow, James O., Shoji Hayashi, et Glenn J. Tattersall. 2010. « Internal Vascularity of the Dermal Plates of Stegosaurus (Ornithischia, Thyreophora) ». *Swiss Journal of Geosciences* 103(2):173-85. doi: 10.1007/s00015-010-0021-5.

Fathy, Hassan. 1986. *Natural Energy and Vernacular Architecture: Principles and Examples with Reference to Hot, Arid Climates*. Chicago: University of Chicago Press.

Fayemi, Pierre-Emmanuel. 2016. « Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d' un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d' un outil de transfert de connaissances ». 245.

Fondation Jean-Jaurès. 2021. « Cahier de tendances 2021 : les personnes, les objets, les lieux et les idées qui vont tout changer ». *Fondation Jean-Jaurès*. Consulté 12 mai 2022 (https://www.jean-jaures.org/publication/cahier-de-tendances-2021-les-personnes-les-objets-les-lieux-et-les-idees-qui-vont-tout-changer/).

Fraunhofer IAO. 2010. « BIOPS ». Consulté 24 juillet 2019 (http://www.greentechxchange.com/biops/demo.cgi).

French, Michael J. 1999. *Conceptual Design for Engineers*. London: Springer London.

Fu, Katherine, Diana Moreno, Maria Yang, et Kristin L. Wood. 2014. « Bio-Inspired Design: An Overview Investigating Open Questions From the Broader Field of Design-by-Analogy ». *Journal of Mechanical Design* 136(11):111102. doi: 10.1115/1.4028289.

Gene, Levinson. 2019. *Rethinking evolution: the revolution that's hiding in plain sight*. New Jersey: World Scientific.

Gero, John S. 1990. « Design Prototypes : A Knowledge Representation Schema for Design ». 11(4).

Giralt, Marta, et Francesc Villarroya. 2013. « White, Brown, Beige/Brite: Different Adipose Cells for Different Functions? » *Endocrinology* 154(9):2992-3000. doi: 10.1210/en.2013-1403.

Glier, Michael W., Joanna Tsenn, Julie S. Linsey, et Daniel A. McAdams. 2012. « Methods for Supporting Bioinspired Design ». 737-44. doi: 10.1115/imece2011-63247.

Goel, Ashok K., Daniel A. McAdams, et Robert B. Stone. 2014. *Biologically Inspired Design*.

Goldberg, David E., et John H. Holland. 1988. « Genetic Algorithms and Machine Learning ». *Machine Learning* 3(2/3):95-99. doi: 10.1023/A:1022602019183.

Graeff, Eliot, Nicolas Maranzana, et Améziane Aoussat. 2019. « Biomimetics, where are the biologists ? » *Journal of Engineering Design* (July). doi: 10.1080/09544828.2019.1642462.

Greenacre, Michael, Jorg Blasius, et Jorg Blasius. 2006. *Multiple Correspondence Analysis and Related Methods*. Chapman and Hall/CRC.

Harris, Stephen, D. W. Yalden, et Mammal Society, éd. 2008. *Mammals of the British Isles: handbook*. 4th ed. Southampton: Mammal Society.

Hatchuel, Armand, et Benoit Weil. 2009. « C-K design theory: An advanced formulation ». *Research in Engineering Design* 19(4):181-92. doi: 10.1007/s00163-008-0043-4.

He, Jiaqing, Nicolò Villa, Zhen Luo, Shun An, Qingchen Shen, Peng Tao, Chengyi Song, Jianbo Wu, Tao Deng, et Wen Shang. 2018. « Integrating plasmonic nanostructures with natural photonic architectures in Pd-modified Morpho butterfly wings for sensitive hydrogen gas sensing ». *RSC Advances* 8:32395-400. doi: 10.1039/C8RA05046E.

Hennig, Willi. 1950. *Grundzüge einer Theorie der phylogenetischen Systematik*. Berlin: Deutscher zentralverlag.

Hennig, Willi. 1999. *Phylogenetic Systematics*. Urbana Chicago London: University of Illinois Press.

Herman, Jon, et Will Usher. 2017. « SALib: An open-source Python library for Sensitivity Analysis ». *The Journal of Open Source Software* 2(9):97. doi: 10.21105/joss.00097.

Herzog, Thomas, Roland Krippner, et Werner Lang. 2004. *Facade Construction Manual*. Basel ; Boston: Birkhauser Verlag AG.

Hubert, Tessa, Antoine Dugué, Tingting Vogt Wu, Fabienne Aujard, et Denis Bruneau. 2022. « An Adaptive Building Skin Concept Resulting from a New Bioinspiration Process: Design, Prototyping, and Characterization ». *Energies* 15(3):891. doi: 10.3390/en15030891.

Hubert, Tessa, Antoine Dugué, Tingting Vogt Wu, Denis Bruneau, et Fabienne Aujard. 2022. « Exploiting the Potential of Nature for Sustainable Building Designs: A Novel Bioinspired Framework Based on a Characterization of Living Envelopes ». in *Bionics and Sustainable Design*. S.l.: SPRINGER VERLAG, SINGAPOR.

Hubka, Vladimir, et Ernst W. Eder. 1987. « A Scientific Approach to Engineering Design ». *Design Studies* 8(3):123-37. doi: 10.1016/0142-694X(87)90035-4.

Hug, Laura A., Brett J. Baker, Karthik Anantharaman, Christopher T. Brown, Alexander J. Probst, Cindy J. Castelle, Cristina N. Butterfield, Alex W. Hernsdorf, Yuki Amano, Kotaro Ise, Yohey Suzuki, Natasha Dudek, David A. Relman, Kari M. Finstad, Ronald Amundson, Brian C. Thomas, et Jillian F. Banfield. 2016. « A New View of the Tree of Life ». *Nature Microbiology* 1(5):16048. doi: 10.1038/nmicrobiol.2016.48.

Imbabi, Mohammed Salah-Eldin. 2012. « A Passive–Active Dynamic Insulation System for All Climates ». *International Journal of Sustainable Built Environment* 1(2):247-58. doi: 10.1016/j.ijsbe.2013.03.002.

Iooss, B. 2009. « Analyses d'incertitudes et de sensibilité de modèles complexes - Applications dans des problèmes d'ingénierie ». 44.

IPCC. 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*.

ISO 18458:2015. 2015. *Biomimétique - Terminologie, concepts et méthodologie*.

Jacobs, Shoshanah, Emily C. Nichol, et Michael Helms. 2014. « "Where Are We Now and Where Are We Going ?" The BioM Innovation Database ». (November). doi: 10.1115/1.4028171.

Jones, J. Christopher. 1992. *Design methods*. Van Nostrand Reinhold.

Kennedy, J., et R. Eberhart. 1995. « Particle swarm optimization ». P. 1942-48 vol.4 in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. Vol. 4.

Kennedy, Marc C., et Anthony O'Hagan. 2001. « Bayesian Calibration of Computer Models ». *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 63(3):425-64. doi: 10.1111/1467-9868.00294.

Kiran, Mustafa Servet, et Ahmet Babalik. 2014. « Improved Artificial Bee Colony Algorithm for Continuous Optimization Problems ». *Journal of Computer and Communications* 02(04):108-16. doi: 10.4236/jcc.2014.24015.

Knippers, Jan, Klaus G. Nickel, et Thomas Speck, éd. 2016. *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction*. Vol. 8. Cham: Springer International Publishing.

Knippers, Jan, et Thomas Speck. 2012. « Design and construction principles in nature and architecture ». *Bioinspiration & Biomimetics* 7(1):015002. doi: 10.1088/1748-3182/7/1/015002.

Künzel, Hartwig M. 1998. « The smart vapor retarder: An innovation inspired by computer simulations ». Atlanta.

Kuru, Aysu, Philip Oldfield, Stephen Bonser, et Francesco Fiorito. 2019. « Biomimetic Adaptive Building Skins: Energy and Environmental Regulation in Buildings ». *Energy and Buildings* 205:109544. doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109544.

Kuru, Aysu, Philip Oldfield, Stephen Bonser, et Francesco Fiorito. 2020. « A Framework to Achieve Multifunctionality in Biomimetic Adaptive Building Skins ». 28.

Kutschera, Ulrich, et KarlJ. Niklas. 2004. « The Modern Theory of Biological Evolution: An Expanded Synthesis ». *Naturwissenschaften* 91(6). doi: 10.1007/s00114-004-0515-y.

Lahonde, Nathalie. 2011. « Optimisation du processus de conception: proposition d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision ». 222.

Lamarck, Jean Baptiste Pierre Antoine de Monet de. 1873. *Philosophie zoologique, ou Exposition des considérations relatives à l'histoire naturelle des animaux*. F. Savy.

Latifi, Mehrnoush, Daniel Prohasky, Jane Burry, Rafael Moya, Jesse Mccarty, et Simon Watkins. 2016. « Breathing Skins for Wind Modulation through Morphology ». 10.

Lê, Sébastien, Julie Josse, Agrocampus Rennes, et François Husson. 2008. *FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis*. Vol. 25.

Légifrance. 2009. *LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement*.

Légifrance. 2015. *Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte*. 2015-992.

Lemieux, Christiane. 2009. *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Sampling*. New York, NY: Springer New York.

Lewis, W. J. 2003. *Tension structures: form and behaviour*. London : Reston, VA: Thomas Telford ; Distributors, ASCE Press.

Li, Mengying, Yuanjie Jiang, et Carlos F. M. Coimbra. 2017. « On the Determination of Atmospheric Longwave Irradiance under All-Sky Conditions ». *Solar Energy* 144:40-48. doi: 10.1016/j.solener.2017.01.006.

Lollini, R., W. Pasut, et al. 2020. *Regenerative technologies for the indoor environment: Inspirational guidelines for practitioners.* COST Action CA16114 RESTORE.

Louw, G. N., et M. K. Seely Longman. 1982. *Ecology of Desert Organisms*.

Love, Terence. 2002. « Constructing a Coherent Cross-Disciplinary Body of Theory about Designing and Designs: Some Philosophical Issues ». *Design Studies* 23(3):345-61. doi: 10.1016/S0142-694X(01)00043-6.

Lutton, Evelyne. 2004. « Darwinisme artificiel : une vue d'ensemble. » 33.

Maniezzo, Vittorio, Luca Maria Gambardella, et Fabio de Luigi. 2004. « Ant Colony Optimization ». P. 101-21 in *New Optimization Techniques in Engineering*. Vol. 141, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Marsh, O. C. 1891. « Restoration of Stegosaurus ». *American Journal of Science* s3-42(248):179-81. doi: 10.2475/ajs.s3-42.248.179.

Mayr, Ernst. 1999. *Systematics and the origin of species, from the viewpoint of a zoologist*. 1st Harvard University Press pbk. ed. Cambridge, Mass: Harvard University Press.

McAdams, W. H. 1994. *Heat Transmission*. 3rd Edition. New York: McGraw- Hill.

McInerney, Sarah, Banafsheh Khakipoor, Austin Garner, Thibaut Houette, Colleen Unsworth, Ariana Rupp, Nicholas Weiner, Julian Vincent, Jacquelyn K. S. Nagel, et Peter Niewiarowski. 2018. « E2BMO: Facilitating User Interaction with a BioMimetic Ontology via Semantic Translation and Interface Design ». *Designs* 2(4):53. doi: 10.3390/designs2040053.

Meagher, Mark. 2015. « Designing for Change: The Poetic Potential of Responsive Architecture ». *Frontiers of Architectural Research* 4(2):159-65. doi: 10.1016/j.foar.2015.03.002.

Menges, Achim, et Steffen Reichert. 2012. « Material Capacity: Embedded Responsiveness ». *Architectural Design* 82(2):52-59. doi: 10.1002/ad.1379.

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. 2021a. « Énergie dans les bâtiments ». *Ministère de la Transition écologique*. Consulté 13 mai 2022 (https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments).

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. 2021b. *Plan de rénovation énergétique des bâtiments*.

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. 2022. « Réglementation environnementale RE2020 ». *Ministère de la Transition écologique*. Consulté 13 mai 2022 (https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020).

Mitchell, G., et Jd Skinner. 2004. « Giraffe Thermoregulation: A Review ». *Transactions of the Royal Society of South Africa* 59(2):109-18. doi: 10.1080/00359190409519170.

Mora, Camilo, Derek P. Tittensor, Sina Adl, Alastair G. B. Simpson, et Boris Worm. 2011. « How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? » *PLoS Biology* 9(8):e1001127. doi: 10.1371/journal.pbio.1001127.

Nagel, Jacquelyn K. S., Robert L. Nagel, Robert B. Stone, et Daniel A. McAdams. 2010. « Function-Based, Biologically Inspired Concept Generation ». *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 24(4):521-35. doi: 10.1017/S0890060410000375.

Nagel, Jacquelyn K. S., et Robert B. Stone. 2012. « A Systematic Approach to Biologically-Inspired Engineering Design ». (August 2015):153-64. doi: 10.1115/detc2011-47398.

Nagel, Jacquelyn K. S., Robert B. Stone, et Daniel A. McAdams. 2010. « An Engineering-to-Biology Thesaurus for Engineering Design ». *Volume 5: 22nd International Conference on Design Theory and Methodology; Special Conference on Mechanical Vibration and Noise* (August 2015):117-28. doi: 10.1115/DETC2010-28233.

Nations Unies. 1995. *Convention sur la diversité biologique*.

Nations Unies. 1998. *Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*.

Nguyen, Tuan Anh, et Marco Aiello. 2013. « Energy Intelligent Buildings Based on User Activity: A Survey ». *Energy and Buildings* 56:244-57. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.09.005.

Ohno, Taiichi. 1988. *Toyota production system : beyond large-scale production*. Productivity Press.

Öncel, S. Ş., A. Köse, et D. Ş. Öncel. 2016. « Façade Integrated Photobioreactors for Building Energy Efficiency ». P. 237-99 in *Start-Up Creation*. Elsevier.

O'Rourke, Julia M., et Carolyn C. Seepersad. 2015. « Toward a Methodology for Systematically Generating Energy- and Materials-Efficient Concepts Using Biological Analogies ». *Journal of Mechanical Design* 137(9):091101. doi: 10.1115/1.4030877.

Pak, M., Adrian Smith, et Gordon Gill. 2013. « Ladybug : a Parametric Environmental Plugin for Grasshopper to Help Designers Create an Environmentally-conscious Design ».

Pan, Cheng An, et Taysheng Jeng. 2010. « A robotic and kinetic design for interactive architecture ». *Proceedings of SICE Annual Conference 2010* 1792-96.

Pavé, Alain. 2013. *Histoire d'une démarche : quand la vie inspire l'ingénieur*.

Pedersen Zari, Maibritt. 2007. « BIOMIMETIC APPROACHES TO ARCHITECTURAL DESIGN FOR INCREASED SUSTAINABILITY ». *SB07 New Zealand*.

Peeters, C., B. Hölldobler, M. Moffett, et T. M. Musthak Ali. 1994. « "Wall-Papering" and Elaborate Nest Architecture in the Ponerine Ant Harpegnathos Saltator ». *Insectes Sociaux* 41(2):211-18. doi: 10.1007/BF01240479.

Piker, Daniel. 2013. « Kangaroo: Form Finding with Computational Physics ». *Architectural Design* 83(2):136-37. doi: 10.1002/ad.1569.

R Core Team. 2021. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.

Recht, Thomas. 2016. « Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive ». 436.

Ricard, Patricia. 2015. « Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement ». 138.

Romano, Rosa, Laura Aelenei, Daniel Aelenei, et Enrico Sergio Mazzucchelli. 2018. « What Is an Adaptive Façade? Analysis of Recent Terms and Definitions from an International Perspective ». 13.

Rosa, Francesco, Gaetano Cascini, et Alessandro Baldussu. 2015. « UNO-BID: Unified Ontology for Causal-Function Modeling in Biologically Inspired Design ». *International Journal of Design Creativity and Innovation* 3(3-4):177-210. doi: 10.1080/21650349.2014.941941.

Rougeot, J. 1981. « Déterminisme de la répartition de la pigmentation dans le pelage et la peau des Mammifères ». 7. doi: https://doi.org/10.1186/1297-9686-13-1-9.

Royal Institute of British Architects. 1967. *RIBA: Handbook of architectural practice and management / Royal Institute of British Architects*.

Salgueiredo, C. Freitas, et A. Hatchuel. 2014. « Modeling Biologically Inspired Design with the C-K Design Theory ». 10.

Saltelli, Andrea. 2002. « Making Best Use of Model Evaluations to Compute Sensitivity Indices ». *Computer Physics Communications* 145(2):280-97. doi: 10.1016/S0010-4655(02)00280-1.

Saltelli, Andrea, éd. 2008. *Sensitivity Analysis*. Paperback ed. Chichester Weinheim: Wiley.

Schaffer, J. David. 1985. « Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms ». P. 93-100 in. L. Erlbaum Associates Inc.

Shai, Offer, Yoram Reich, Armand Hatchuel, et Eswaran Subrahmanian. 2012. « Creativity and scientific discovery with infused design and its analysis with C-K theory ». *Research in Engineering Design*. doi: 10.1007/s00163-012-0137-x.

Shelford, V. E. 1931. « Some Concepts of Bioecology ». *Ecology* 12(3):455-67. doi: 10.2307/1928991.

Siddharth, L., et Amaresh Chakrabarti. 2018. « Evaluating the impact of Idea-Inspire 4 . 0 on analogical transfer of concepts ». (November). doi: 10.1017/S0890060418000136.

Singh, Sukhvir, et Ar Rishi Raj Kapoor. 2021. « ArchiTextile: A Review on Application of Textiles in Architecture ». 12(1):16.

Sobol′, I. M. 2001. « Global Sensitivity Indices for Nonlinear Mathematical Models and Their Monte Carlo Estimates ». *Mathematics and Computers in Simulation* 55(1-3):271-80. doi: 10.1016/S0378-4754(00)00270-6.

Solga, Andreas, Zdenek Cerman, Boris F. Striffler, Manuel Spaeth, et Wilhelm Barthlott. 2007. « The dream of staying clean: Lotus and biomimetic surfaces ». *Bioinspiration & Biomimetics* 2(4):S126-34. doi: 10.1088/1748-3182/2/4/S02.

Sparrow, E. M., J. W. Ramsey, et E. A. Mass. 1979. « Effect of Finite Width on Heat Transfer and Fluid Flow about an Inclined Rectangular Plate ». *Journal of Heat Transfer* 101(2):199-204. doi: 10.1115/1.3450946.

Speck, T., et O. Speck. 2008. « Process Sequences in Biomimetic Research ». P. 3-11 in *Design and Nature IV*. Vol. I. Algarve, Portugal: WIT Press.

Srinivasan V, et Amaresh Chakrabarti. 2009. « SAPPHIRE - An approach to analysis and Synthesis ». *International Conference on Engineering Design ICED'05*.

Storn, Rainer, et Kenneth Price. 1997. « Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces ». *Journal of Global Optimization* 11(4):341-59. doi: 10.1023/A:1008202821328.

Straube, J. F., V. Acahrya, J. F. Straubeand, et V. Acahrya. 2003. « Indoor Air Quality, Healthy Buildings, and Breathing Walls Indoor Air Quality, Healthy Buildings, and Breathing Walls ». Engineering.

Sung, Doris Kim. 2011. « Skin Deep: Making Building Skins Breathe With Smart Thermobimetals ». P. 8 in *WHERE DO YOU STAND*.

Teyssier, Jérémie, Suzanne V. Saenko, Dirk van der Marel, et Michel C. Milinkovitch. 2015. « Photonic Crystals Cause Active Colour Change in Chameleons ». *Nature Communications* 6(1):6368. doi: 10.1038/ncomms7368.

The Biomimicry Institute. 2015. « Biomicry Taxonomy ».

Tiller, Michael M. « Introduction to Physical Modeling with Modelica ».

Tomiyama, T., P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, Ch. Kind, et F. Kimura. 2009. « Design Methodologies: Industrial and Educational Applications ». *CIRP Annals* 58(2):543-65. doi: 10.1016/j.cirp.2009.09.003.

Van Hooijdonk, Eloise, Serge Berthier, et Jean-Pol Vigneron. 2012. « Contribution of Both the Upperside and the Underside of the Wing on the Iridescence in the Male Butterfly *Troïdes Magellanus* (Papilionidae) ». *Journal of Applied Physics* 112(7):074702. doi: 10.1063/1.4755796.

Vattam, Swaroop, Michael Helms, et Ashok K. Goel. 2007. « Biologically-Inspired Innovation in Engineering Design: A Cognitive Study ». *Technical Report, Graphics, VIsualization and Usability Center, Georgia Institute of Technology*.

Vattam, Swaroop, Bryan Wiltgen, Michael Helms, Ashok K. Goel, et Jeannette Yen. 2011. « DANE: Fostering Creativity in and through Biologically Inspired Design ». P. 115-22 in *Design Creativity 2010*. Vol. 8. London: Springer London.

Viitanen, Hannu, et Tuomo Ojanen. 2007. « Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials ». 8.

Vincent, Julian, Olga A. Bogatyreva, Nikolaj R. Bogatyrev, Adrian Bowyer, et Anja-Karina Pahl. 2006. « Biomimetics: its practice and theory ». *Journal of the Royal Society Interface* 3. doi: 10.1098/rsif.2006.0127.

Woese, C. R., O. Kandler, et M. L. Wheelis. 1990. « Towards a Natural System of Organisms: Proposal for the Domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. » *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87(12):4576-79. doi: 10.1073/pnas.87.12.4576.

Yazdanian, M., et J. Klems. 1993. « Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings ». *LBNL Report #: LBL-34717*, Lawrence Berkeley National Laboratory.

Yim, Sungshik, Jamal O. Wilson, et W. David. 1996. « Development of an Ontology for Bio-Inspired Design using Description Logics Abstract »: *Strategies* (November 2015).

Zhang, Mingqian, Shile Feng, Lei Wang, et Yongmei Zheng. 2016. « Lotus Effect in Wetting and Self-Cleaning ». *Biotribology* 5:31-43. doi: 10.1016/j.biotri.2015.08.002.

Zuk, William, et Roger H. Clark. 1970. *Kinetic architecture*. Van Nostrand Reinhold.

Annexes

A. État de l'art 233

B. Ateliers d'idéations 238

C. Fabrication d'un prototype déformable 272

D. Présentation du banc d'absorption solaire 274

E. Fluxmètres à gradient tangentiel 276

F. Graphes additionnels des mesures réalisées sur boîte test 277

A. État de l'art

A.1. Analyse ACM

*Annexe de la partie **1.2.1 Analyse comparative d'applications bio-inspirées**.*

L'ACM est une technique descriptive des relations entre les éléments d'un grand ensemble de données qualitatives. Elle est utilisée à la fois pour détecter et explorer les relations entre diverses variables qualitatives dans un ensemble de données complexe. L'ACM est basée sur l'analyse des correspondances simples (AC) (Greenacre, Blasius, et Blasius 2006). L'AC peut être appliquée à un tableau de contingence à deux voies, conduisant à un graphique qui visualise l'association entre deux variables catégorielles. Par extension, l'ACM s'attaque aux associations d'un grand ensemble de variables. Pour ce faire, elle utilise soit une matrice indicatrice, appelée tableau disjonctif complet, soit une matrice de Burt (présentation de tous les tableaux de contingence des variables pris deux par deux et combinés en une seule matrice).

Les résultats sont modélisés comme des nuages de points dans un espace euclidien à deux dimensions (ou plus) et peuvent être interprétés graphiquement en observant les positions relatives de tous les points ainsi que leurs distributions pour chaque dimension. Plus les points sont proches les uns des autres, plus les variables ou les individus sont similaires. Le principe de l'ACM est que tous les individus (c'est-à-dire les applications ou « Bio-BS » étudiées) peuvent être résumés dans des espaces multidimensionnels : chaque dimension représente les différentes variables décrivant les individus. Plus précisément, pour chaque variable (c'est-à-dire chaque question de la fiche de données), *n-1* axes peuvent être utilisés pour décrire les corrélations entre les n modalités (c'est-à-dire les réponses) ; comme l'interprétation de graphiques comportant plus de deux ou trois axes risque d'être plus difficile que celle d'un tableau de données, l'ACM projette tous les individus sur un nouveau système de dimensions, tout en combinant la majorité des dimensions précédentes dans les premières du nouveau système.

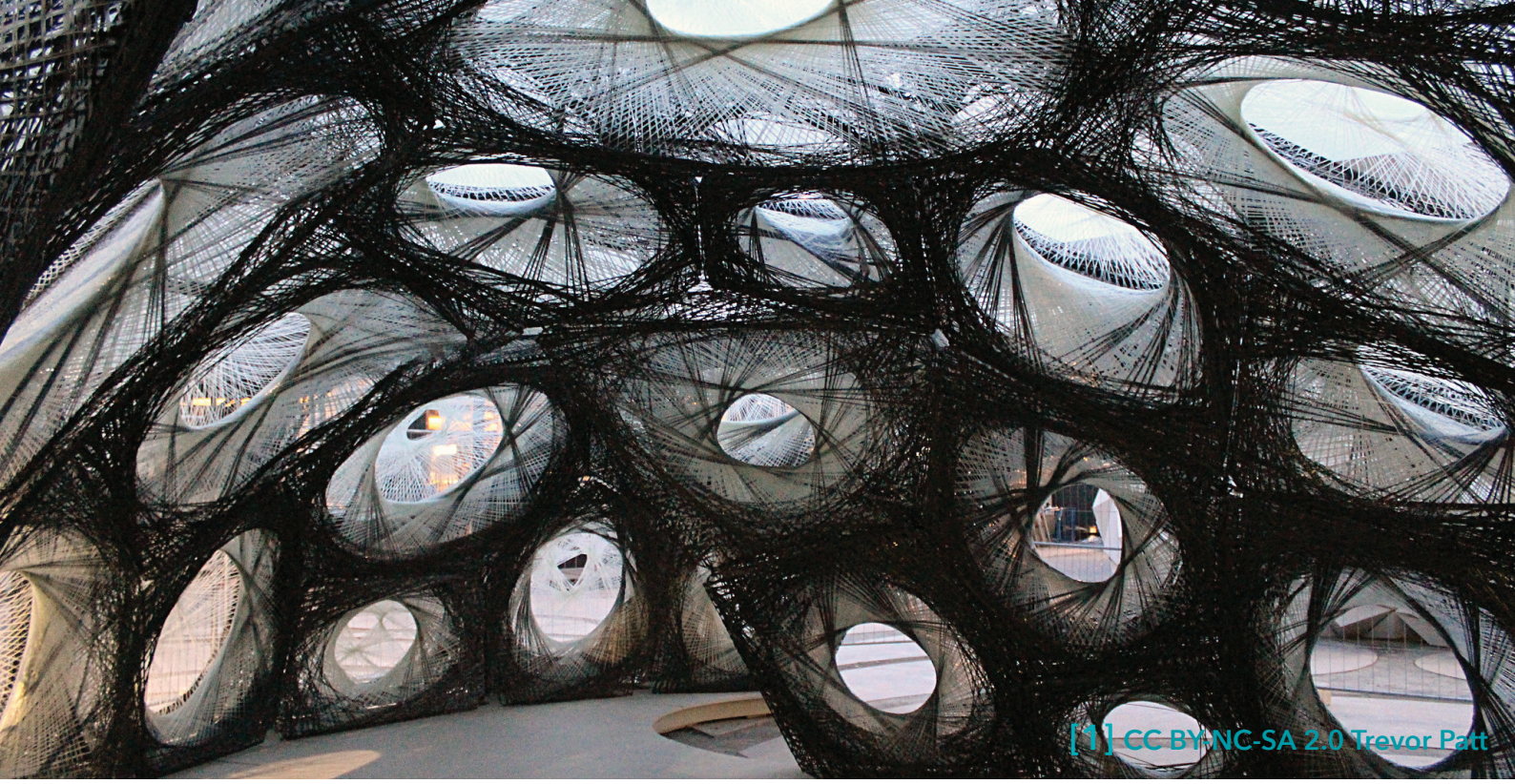
En d'autres termes, les premières nouvelles dimensions seront représentatives des corrélations entre les variables de l'ensemble de données, et les autres dimensions ne représentent qu'une petite quantité d'informations supplémentaires ; les résultats peuvent donc être résumés sous une forme graphique bidimensionnelle. Par conséquent, l'ACM est un outil puissant qui permet de comprendre un ensemble de données sans avoir besoin de faire des hypothèses préalables sur les corrélations entre les variables. Dans cette étude, afin de révéler des modèles peu clairs et d'éviter des analyses potentiellement biaisées de la part des auteurs, l'ACM est apparue comme une alternative à l'analyse méta-univariée.

L'analyse a été réalisée sur le logiciel R (R Core Team 2021) en utilisant l'outil MCA du package R "FactoMineR" (Lê et al. 2008).

A.2. Fiche issue des échanges avec les concepteurs

Les échanges menées avec les concepteurs sur les cas d'applications d'enveloppes bio-inspirées analysées dans (Cruz et al. 2021) ont été synthétisés dans des fiches (*datasheets*), disponibles dans un rapport en ligne sur le site du Ceebios[9]. Une fiche extraite de ce document est donnée dans les pages suivantes.

[9] https://ceebios.com/telechargements-references/



ICD/ITKE Elytra I Research Pavilion 2013-14. Stuttgart, Germany

This investigation of natural lightweight structures was conducted in an interdisciplinary cooperation of architects and engineers from Stuttgart University and biologists from Tubingen University. During the investigation, the Elytron, a protective shell for beetles' wings and abdomen, has proved to be a suitable role model for highly material efficient construction. The performance of these lightweight structures relies on the geometric morphology of a double layered system and the mechanical properties of the natural fiber composite. The anisotropic characteristic of this material, which consists of chitin fibers embedded in a protein matrix, allows for locally differentiated material properties.

In total 36 individual elements were fabricated, whose geometries are based on structural principles abstracted from the beetle elytra. Each of them has an individual fiber layout which results in a material efficient load-bearing system. The biggest element has a 2.6 m diameter with a weight of only 24.1 kg. The research pavilion covers a total area of 50 m² and a volume of 122 m³ with a weight of 593 kg.
Altogether the research pavilion shows how the computational synthesis of biological structural principles and the complex reciprocities between material, form and robotic fabrication can lead to the generation of innovative fiber composite construction methods.

Name: Research pavilion Elytra
Year of construction: 2013-14
Climate: Temperate (Cfb)
City: Stuttgart
Country: Germany

Surface: 40 m2
Cost (€/m²): na
Project use: Pavilion
Renovation: No

itke Institute of Building Structures and Structural Design
ICD Institute for Computational Design and Construction
University of Stuttgart Germany

Data sheet completed by Estelle Cruz & Tessa Hubert during a research exchange of three weeks at ITKE, University of Stuttgart (interview of **Prof Jan Knippers and Axel Körner)**

References

• T. van de Kamp, M. Doerstelmann, T. dos Sanots Rolo, T. Baumbach, A. Menges, and J. Knippers, "Beetle Elytra as Role Models for Lightweight Building Construction," Entomol. heute, vol. 27, no. November, pp. 149–158, 2015.

• M. Doerstelmann, J. Knippers, A. Menges, S. Parascho, M. Prado, and T. Schwinn, "ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14: Modular Coreless Filament Winding Based on Beetle Elytra," Archit. Des., vol. 85, no. 5, pp. 54–59, Sep. 2015.

© All rights reserved - Ceebios, Mecadev UMR 7179

Biomimetic

Definition
- ● Biomimetics
- ○ Bioinspiration
- ○ Biomimicry

Approach
- ○ Biology-push
- ● Technology-pull

Origins of bioinspiration
- ○ Random opportunities
- ● Interdisciplinary collaborations
- ○ Call for projects
- ○ Other

Targeted performance
- ○ Thermal comfort
- ○ Visual comfort
- ○ Acoustic comfort
- ○ Air quality
- ● Mechanical stress resistance
- ○ Water regulation

Integration scale of biomimetics
- ○ Material (facade component)
- ● Facade system
- ○ Building

Link to biology

Model kingdom
- ● Animalia: beetle (wings)
- ○ Plantae
- ○ Fungi
- ○ Bacteria/Archaea
- ○ Protozoa
- ○ Chromista

Number of models
- ● One
- ○ Two
- ○ More

Type of knowledge
- ○ Existing for general public
- ● Existing for specialist
- ● Created during the design process

Inputs in biology
- ○ Background of the designer
- ● Acquisition during the design
- ● Biologists integrated in the process

Design process

Use of design framework
- ○ Yes
- ● No

Eco-design approach
- ○ Yes
- ● No

Major constraints
- ○ Lack of funds
- ○ Use of biomimetic tools
- ○ Law regulations
- ● Technical problems
- ○ Other

Design complexity
- ● High (software, design process)
- ○ Low (well-known design)

Outcome

Technology readiness level
- ○ TRL6 - demonstrated in relevant environment
- ● TRL7 - system prototype demonstration in operational environment
- ○ TRL8 - system complete and qualified
- ○ TRL9 - actual system proven in operational environment

Overtime performance
- ○ Still operating
- ○ Not operating yet
- ● Destroyed

Construction complexity
- ● High (new technology)
- ○ Low (existing technology)

Main component of the building envelope
- ○ Polymers
- ○ Alloys
- ○ Textiles
- ○ Wood
- ○ Concrete
- ● Carbon-glass fiber (structure)

Level of innovation
- ● Breakthrough innovation
- ○ Improvement of existing systems

Adaptable to renovation
- ○ Yes
- ● No

Adaptatibility

Adaptation to stimuli
- ○ Yes
- ● No

Type of trigger (input)
- ○ Mechanical (e.g. wind load)
- ○ Thermal (e.g. air temperature)
- ○ Electromagnetic
- ○ Optical (e.g. daylight level)
- ○ Air quality (e.g. humidity)
- ○ Occupancy
- ○ Other (internet data, BMS, etc.)

Type of actuator (output)
- ○ Mechanical
- ○ Pneumatical
- ○ Electromagnetic
- ○ Thermal
- ○ Chemical
- ○ Other

Control
- ○ Intrinsic (auto-reactive)
- ○ Extrinsic (external control)

Response time
- ○ Seconds
- ○ Minutes
- ○ Hours
- ○ Days
- ○ Weeks
- ○ Months

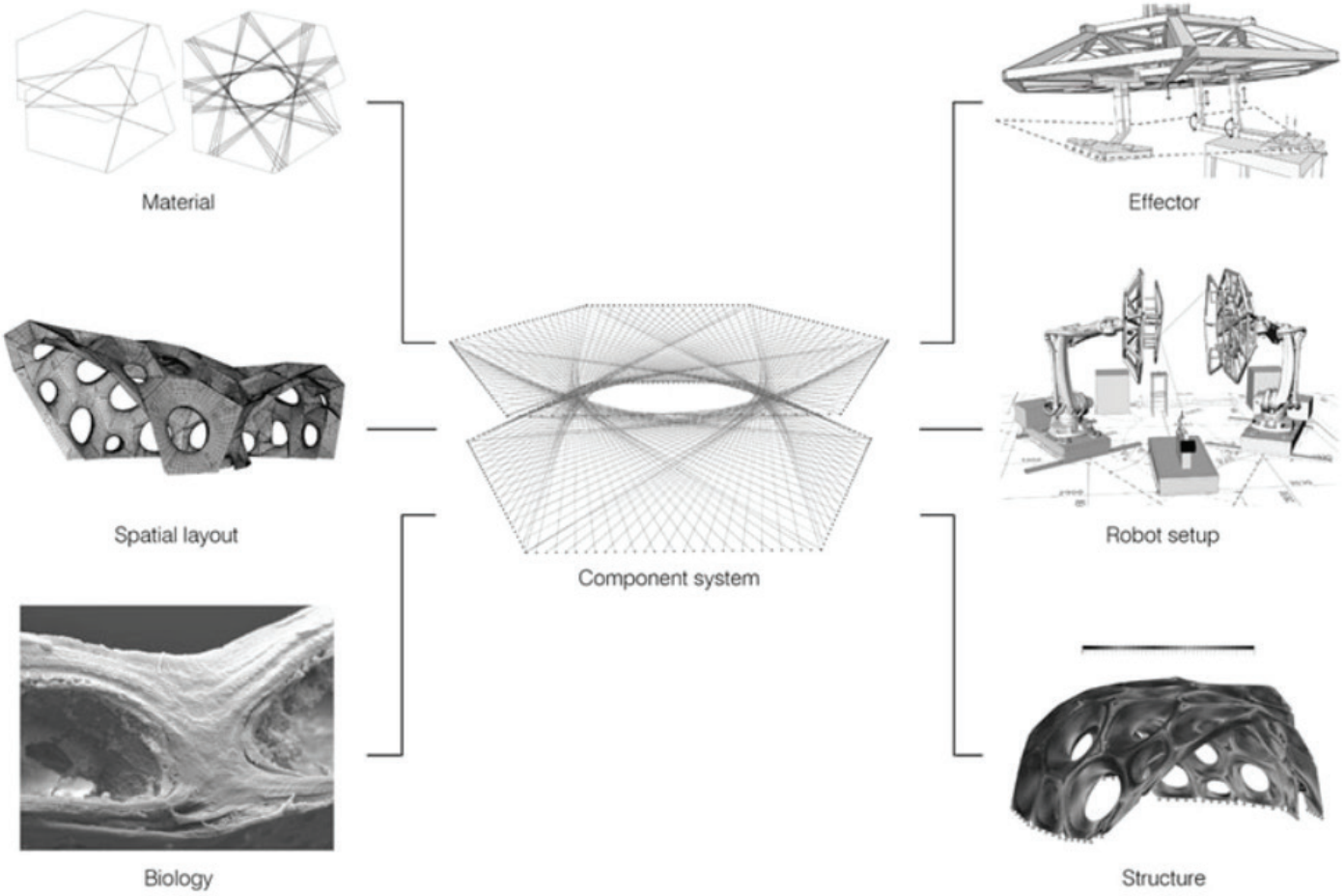
Spatial adaptation
- ○ Nanometers
- ○ Micrometers
- ○ Millimeters
- ○ Centimeters
- ○ Meters

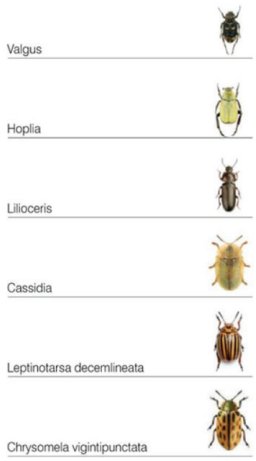
Material adaptation
- ○ Elasticity
- ○ Inflatable
- ○ Bi-material
- ○ Other

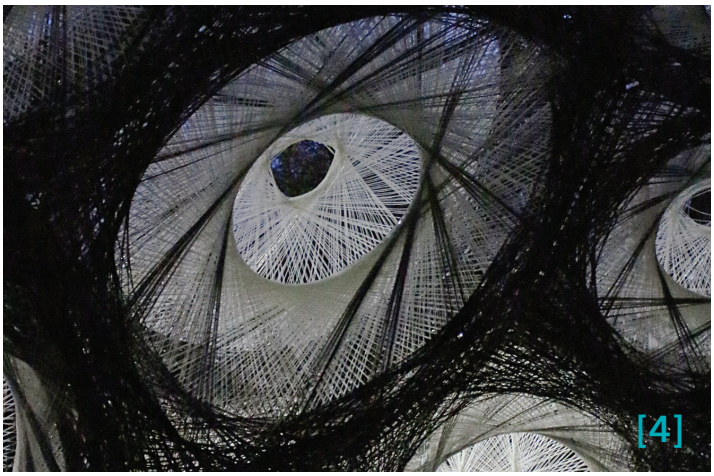
Degree of adaptability
- ○ On-Off
- ○ Gradual

© All rights reserved - Ceebios, Mecadev UMR 7179

[2]







Credits

[2,3,5] ©ICD/ITKE University of Stuttgart
[1,4] CC BY-NC-SA 2.0 Trevor Patt

[1] Pavilion top view,

[2] Pavilion construction

[3] Beetle test

[4] Pavilion inside view

[5] Beetle wing 3D modelling

© All rights reserved - Ceebios, Mecadev UMR 7179

B. Ateliers d'idéations

*Annexes de la partie **3.1 Du principe bio-inspiré vers le domaine technique**.*

Le programme des divers ateliers est indiqué dans le Tableau B.1.

Tableau B.1 - Chronologie et description des ateliers.

N°	Profils	Date	Durée	Consigne	Outils fournis
1	Architectes Architectes-ingénieurs Ingénieurs (n=10)	Avril 2020	2 x 4 heures + 1 semaine perso	Concept bio-inspiré multifonctionnel sur fonction(s) de leur choix	+ Fiches (7 enveloppes vivantes & 2 constructions animales)
2	Elèves architectes (ENSAP) Professeurs de l'ENSAP Ingénieurs (n = 12)	Mai 2021	4 heures	Concept bio-inspiré qui répond à une problématique donnée	+ Fiches + Tableur avec 100 fonctions et stratégies de constructions animales + Fiche alternative (chien de prairie)
3	Elèves ingénieurs (ENSAM) (n = 13)	Mai 2021	4 x 7 heures	Concept bio-inspiré et pistes technologiques	+ Fiches + Tableur + Ressources en ligne

B.1. Atelier n°1

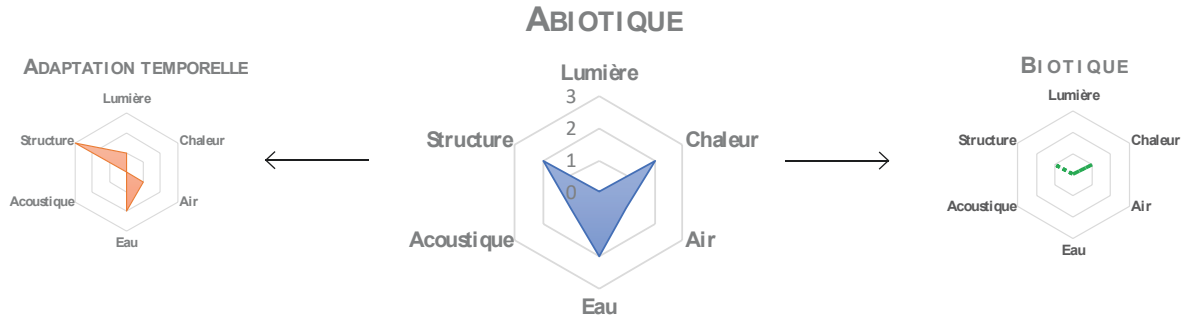
Cet atelier, son déroulement et les outils proposés aux participants, sont décrits en 2.2.2.4 Chapitre – **Bionics and Sustainable Design**, partie 5.1 Technology Pull Framework. Les fiches de référencement données aux concepteurs, accompagnée d'une fiche d'instruction pour faciliter leur exploration, sont présentées dans les pages suivantes.

LECTURE DES FICHES
POUR L'ATELIER BIO-INSPIRÉ

Pour cet atelier, des fiches d'informations sur différentes espèces ont été réalisées. Ces fiches contiennent des **données générales** (localisation, climat, anatomie, physiologie...), et des points clés permettant, si on le souhaite, un zoom sur une ou plusieurs stratégies ou propriétés biologiques.

Ces propriétés sont **analysées selon leur impact (positif ou négatif)** sur les fonctions de régulation des enveloppes biologiques (peau, fourrure, écailles), telles que transfert de chaleur, d'air, propriétés acoustiques, ou encore structurelles.

Pour favoriser le transfert de ces propriétés vers des designs architecturaux, deux **filtres de lecture supplémentaires** seront proposés : la variabilité temporelle (cycles temporels) de ces propriétés et l'impact de facteurs biotiques (comportement de l'animal, organismes vivants extérieurs au système...).



Lexique

Facteurs abiotiques : Ils représentent l'ensemble des facteurs physico-chimiques d'un écosystème ayant une influence sur un être vivant ou un ensemble d'êtres vivants donnés. C'est l'action du non-vivant sur le vivant. Il peuvent se classer en plusieurs catégories tels que facteurs climatiques (température, lumière), chimiques (composition de l'air), topographiques (altitude).

Facteurs biotiques : Ils représentent l'ensemble des interactions du vivant sur le vivant dans un écosystème. Opposables aux facteurs abiotiques, ils constituent une partie des facteurs écologiques de cet écosystème. Il s'agit des ressources alimentaires, des relations entre espèces vivantes traduites par prédation, coopération, compétition, parasitisme, etc.

Adaptabilité temporelle : Cette notion traduit une adpatation / un changement possible de facteurs biotiques ou abiotiques dûe à une variation temporelle (par exemple, la fourrure d'un animal varie en densité selon la saison).

Exemple de stratégies intéressantes relevées dans une espèce, tel que donné en début de chaque fiche.

Adaptation temporelle
Facteur biotique
Impact Lumière

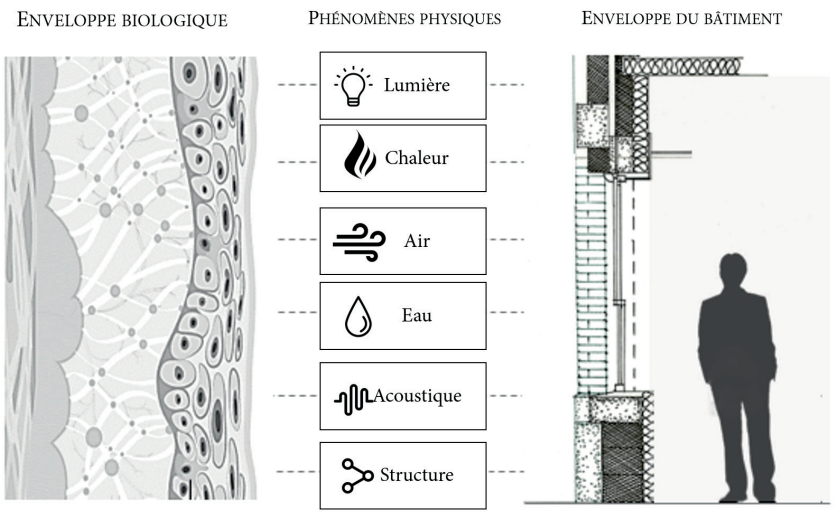
Destruction de l'ouverture principale quand les oiseaux sont en age de voler. Modificiation structurelle avec impact sur apport de lumière.

Faceurs abiotique
& biotique
Impact Chaleur

Bonne inertie themrique du matériaux, et espace confiné et réchauffé par présence du fournier lors de l'incubation.

Traduction des phénomènes physiques

Les systèmes tégumentaires (peau) et enveloppes des espèces vivantes peuvent être comparées à l'enveloppe du bâtiment d'un point de vue des fonctions de régulation (lumière, chaleur, air, eau, acoustique) et des aspects structurels (intégrité physique, solidité).



[Cruz, 2021]

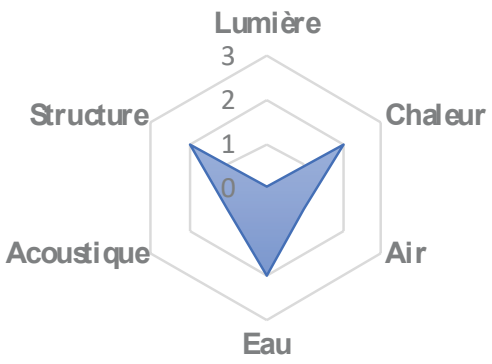
Les propriétés remarquables peuvent être traduites sous forme de phénomènes physiques de la manière suivante : Fonction (ex : Rrégulation de lumière) > Grand principe (ex: Diffuser) > Facteur (ex: Macro-géométrie) > Description (ex: «Nanostructuration créant des changement de couleur par iridescence»).

De plus amples exemples de facteurs sont données si dessous :

- Macro-géométrie : structure, forme, orientation, distribution, taille
- Variation temporelle : seconde, minute, heure, journée, semaine, mois, saison, année
- États de surfaces : couleurs (pigment, structure), etc.
- Composition de la matière : chitine, kératine, etc.
- Agencement de la matière : densité, opacité, etc.
- Mouvement : déplacement, migration, etc.
- Propriété du fluide : vitesse, concentration, composition, sens d'écoulement, température.
- Propriété de l'onde mécanique: perméabilité, température, etc.

Les phénomènes physiques sont fournis dans un tableau comme suit :

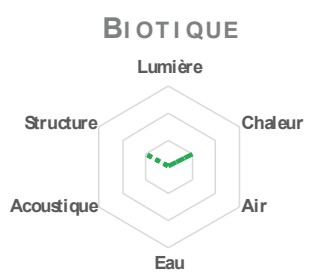
Fonctions régulations	**Principes**	**Facteurs**	**Descritption** Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)
Lumière *Se protéger, filtrer, transmettre*	Réfléchir Absorber Diffuser Transmettre	*Macro-géométrie* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Propriété lumineuse intéressante par diffusion dûe à la macro-géométrie de l'enveloppe. **(aB)**
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Ouverture/fermeture du système pour réguler la température. Impacté par comportement de l'espèce **(B)** • Variation temporelle de cette propriété, effective en hiver uniquiment. **(A)**



Analyse principale (facteurs abiotiques) : Evaluation de l'enveloppe biologique vis-à-vis de sa capacité à réguler (air, chaleur, eau, lumière, son) et propriétés structurelles.

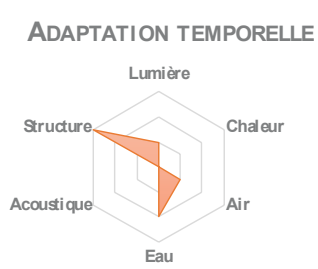
0 : N'assure pas la fonction du tout ou N/a
1 : Assure peut-être la fonction (suspicion ou doutes dans la littérature)
2 : Assure la fonction de manière intéressante
3 : Assure complètement la fonction

Facteurs biotiques : Impact externe (espèce vivante) ou interne (métabolisme, comportement de l'espèce) sur les fonctions :



0: Pas d'impact ou N/a
1: Impact possible
2: Impact modéré
3: Impact fort

Adaptabilité temporelle : Variabilité des impacts abiotiques et biotiques en fonction du temps (cycles, saisons).



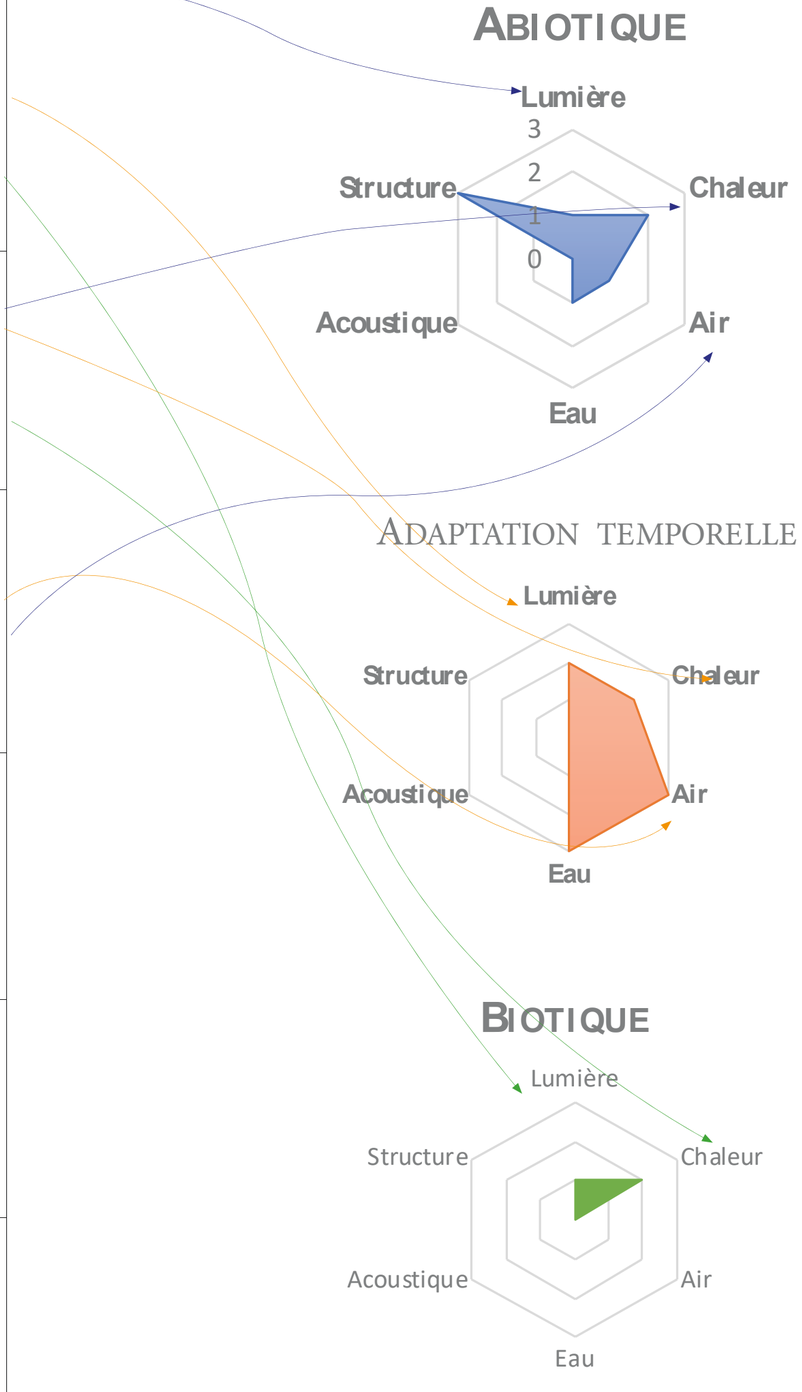
0: Pas d'impact ou N/a
1: Impact possible
2: Impact modéré
3: Impact fort

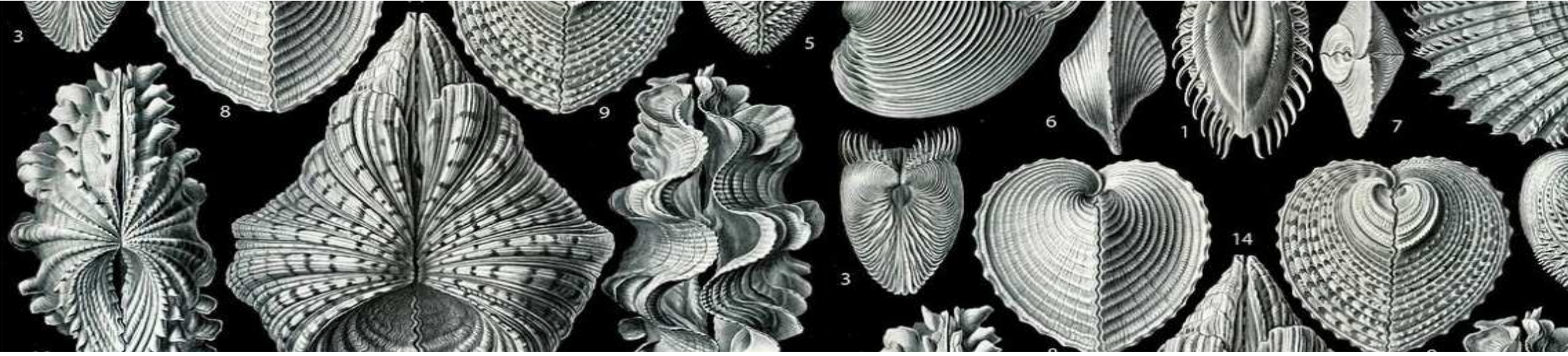
EXEMPLE DE CONSTRUCTION D'UN TABLEAU + KIVIAT

Espèce exemple : le Doryphore (coléoptère) et son enveloppe : système peau + ailes + ailes rigides appelées élytres.

Fonctions régulations	Principes	Facteurs	Descritption Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)	
Lumière *Se protéger, filtrer, transmettre*	Réfléchir Absorber Diffuser Transmettre	*Macro-géométrie* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Les elytres sont opaques et protègent légèrement le doryphore du soleil. Autrement, l'enveloppe du doryphore ne présente pas de propriétés notables permettant de protéger, filtrer ou transmettre le soleil. • Les ailes de l'élytre sont soit ouvertes, soit fermées. L'apport en lumière varie donc modéremment. • Le doryphore ouvre ou ferme ses élytres: il influence, de manière voulue ou non (suspicion) l'apport de lumière par son comportement	(aB, note qualitative= 1) (A, note qualitative = 2) (B, note qualitative = 1)
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Couche d'air entre l'élytre et le corp du doryphore lorsque les ailes sont refermées. • Autrement, comportemental: animal ectotherme mais sensible au froid pour son développement. Choisit les bon climat, hiverne sous la terre, se positionne au soleil.	(aB, note qualitative = 2) (A, note qualitative = 3) (B, note qualitative = 3)
Air *Filtrer, Mettre en mouvement, transmettre, stocker*	Diffusion Convection	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume*	• Système peau + élytre imperméable à l'air • Pas forcément étanche à l'air quand les élytres s'ouvrent ou se ferment	(A, note qualitative = 3) (aB = note qualitative = 1)
Eau Se protéger, transmettre, stocker	Condensation Diffusion Action Gravitaire Action Capillaire Écoulement Sorption / Absorption	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume* *Propriété du fluide*	• Système peau + élytre pas imperméable mais forcément étanche à l'eau.	(A, note qualitative = 3) (aB = note qualitative = 1)
Acoustique *Isoler Absorber*	Absorption Réflexion Transmission	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide*	• N/a (signifie que l'information n'a pas été trouvée dans la littérature, ou que cette fonction semble peu régulée par l'enveloppe)	(A, note qualitative = 0) (aB = note qualitative = 0) (B, note qualitative = 0)
Structure Stabilité Solidité	Absorber Transmettre	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide* *Propriété de l'onde mécanique*	• Structure composée d'empilements de lamelles de chitine renforcée par carbonate de calcium. Solide et léger.	(aB, note qualitative = 3)

Doryphore





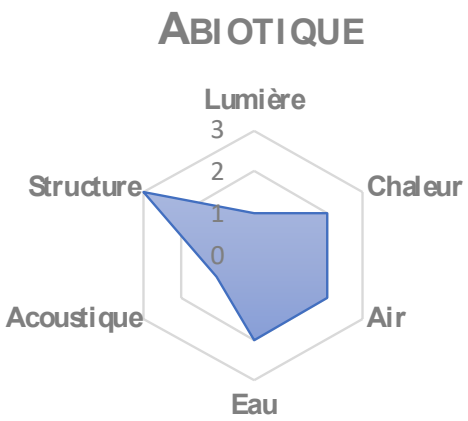
COQUILLE - *Exosquelette des mollusques*

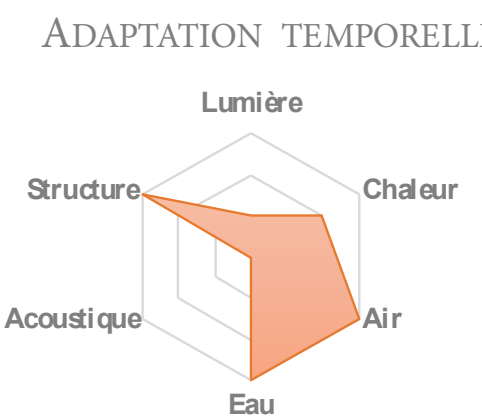
Adaptabilité temporelle
Facteur abiotique
Impact structure

Croissance par couches successives et forme selon l'uniformité du dépôt des couches. Matériau mécaniquement dur.

Adaptabilité temporelle
Facteur abiotique
Impacts Air, Eau, Chaleur

Obturation de la coquille possible par un voile muqueux (épiphragme) ce qui évite la déshydratation, isole thermiquement, et assure l'étanchéité à l'air et l'eau.





Description

La coquille est l'exo-squelette externe d'un mollusque. Cette formation calcaire est sécrétée par le «manteau» de l'animal.

Les mollusques munis de coquille éclosent avec leurs coquilles. Celles-ci croissent ensuite en même temps que l'animal par ajout de matière. Leurs formes sont très diverses : univalves (une partie), bivalves (deux parties) et multivalves (plusieurs parties)[1]. Chez les gastéropodes, la coquille est toujours hélicoïdale.

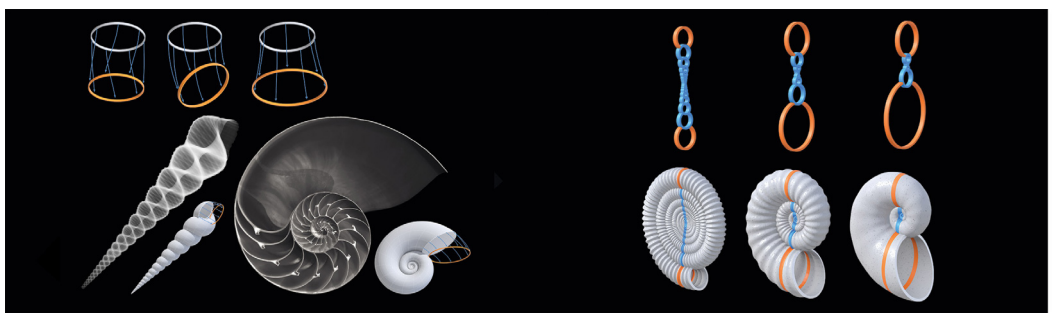
Fonctions principales : protection abiotique (vent, soleil, résistance chimique), protection biotique (mécanique, camouflage), imperméabilité.

Composition : La coquille est constituée de carbonate de calcium ($CaCO_3$) et de matière organique, sécrétés par le «manteau» de l'organisme parfois appelé « biocarbonate ». La coquille est constituée de 4 couches qui assurent la croissance tant en longueur qu'en épaisseur.

Manteau : Le manteau est l'enveloppe du mollusque qui abrite les organes, faite de téguments (peau) et de muscles. La peau est molle, contient de nombreuses glandes et sécrète divers mucus. La respiration est pneumostome (se fait par une cavité sur le pied). Selon l'état d'hydratation de l'animal, la fréquence de fermeture/ouverture et son diamètre varient[2].

Croissance : Elle se fait par strates. Souvent, elle n'est ni régulière, ni continue, mais sujette aux variations du climat. La disponibilité en nourriture, particulièrement en calcium, et la température influent directement sur la rapidité de synthèse des coquilles. La couche externe, periostracum, est couramment manquante sur les parties les plus vieilles de la coquille. C'est aussi la première à se dégrader à la mort de l'animal.

Des centaines de protéines, soluble ou insolubles, contrôlent la formation de la coquille. Ainsi, la coquille, bien qu'étant considérée comme un tissu « mort », est néanmoins capable de remaniements par modification de la capacité sécrétoire du manteau. Des phénomènes de réparations coquillières suite à des cassures, des perforations ou des infestations bactériennes ont en effet été observés chez les mollusques[3,4].

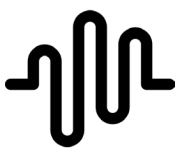
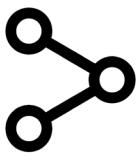


L'expansion du coquillage peut être uniformément croissante (couches succéssives et uniformes de matériau avec ouverture de plus en plus large), peut se faire par rotation (dépôt de plus de matériau d'un côté de l'ouverture), par torsion (les points de dépôt tournent le lont de l'ouverture). La vitesse d'expansion va aussi conduire à des coquilles plus ou moins denses ou lisses[7].

Références

1. C. E. Lazareth, "De quoi est fait une coquille ?," Futur. Planète, p. 9, 2017.
2. P. S. Dickinson, D. J. Prior, and C. Avery, "The pneumostome rhythm in slugs: a response to dehydration controlled by hemolymph osmolality and peptide hormones.," Comp. Biochem. Physiol. A. Comp. Physiol., vol. 89, no. 4, pp. 579–85, 1988.
3. C. Fleury et al., "Shell repair process in the green ormer Haliotis tuberculata: A histological and microstructural study," Tissue Cell, vol. 40, no. 3, pp. 207–218, Jun. 2008.
4. N. Trinkler et al., "Clam shell repair from the brown ring disease: a study of the organic matrix using Confocal Raman micro-spectrometry and WDS microprobe," Anal. Bioanal. Chem., vol. 396, no. 2, pp. 555–567, Jan. 2010.

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Fonctions régulations	**Principes**	**Facteurs**	**Description** Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)
Lumière *Se protéger, filtrer, transmettre*	Réfléchir Absorber Diffuser Transmettre	*Macro-géométrie* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Pour les quelques espèces qui vivent dans les grottes ou dans le noir, la coquille est transparente (L. Huot, "Un nouvel escargot, totalement transparent, découvert dans une grotte souterraine," Maxisciences, 2013). (aB) • Les pigments qui donnent la couleur aux coquilles sont généralement contenus dans le périostracum, à partir de sécrétions du manteau. (aB) (A)
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Certains mollusques terrestres (escargots) ne sont actifs que lorsque l'humidité est suffisamment élevée ; très sensibles aux variations hygrométriques. (aB) • Hibernation ou estivation (3 à 6 mois) où l'animal se rétracte à l'intérieur de sa coquille qu'il obture par un voile muqueux (courte inactivité) ou par un épiphragme, ce qui lui évite la déshydratation. Le mucus sécrété par leur peau semble aider à la thermorégulation. (aB) (A)
Air *Filtrer, Mettre en mouvement, transmettre, stocker*	Diffusion Convection	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume*	• La couche principale de la coquille est constituée d'aragonite ($CaCO_3$) qui est très sensible à la corrosion chimique et soluble dans l'eau (faiblement). La partie externe de la coquille est tout à fait insensible à la corrosion chimique et protège ainsi la couche de coquille en dessous. Bouchée par un voile muqueux ou par un épiphragme, la coquille forme un abri étanche pour l'animal. (aB) (A) *(système coquille + muqueuse)* • Etanche à l'air (aB)
Eau ***Se protéger, transmettre, stocker***	Condensation Diffusion Action Gravitaire Action Capillaire Écoulement Sorption / Absorption	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume* *Propriété du fluide*	• Absorption de l'eau par muqueuse : quand les gastéropodes sont déshydratés, ils se déplacent sur une surface humide, adoptent une posture caractéristique aplatie et restent au repos tandis que l'eau est absorbée par la surface du pied. Une fois qu'ils sont réhydratés, ils quittent la surface humide. Ainsi, il existe un seuil de déshydratation spécifique pour l'initiation du contact de réhydratation (Perte de 35% d'eau environ) et un point de réhydratation qui déclenche la fin de la réponse (D. J. PRIOR, "Water-Regulatory Behaviour In Terrestrial Gastropods," Biol. Rev., vol. 60, no. 3, pp. 403–424, Aug. 1985). (aB) (A) *(système coquille + muqueuse)*
Acoustique  *Isoler* *Absorber*	Absorption Réflexion Transmission	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide*	• Les mollusques n'ont pas de système auditif même s'ils peuvent percevoir certaines vibrations (peu d'info sur le rôle acoustique de la coquille dans la littérature) (aB)
Structure  ***Stabilité*** ***Solidité***	Absorber Transmettre	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide* *Propriété de l'onde mécanique*	• Croissance par ajout de couches successives. (aB) (A) • Au bord du manteau de l'escargot, dans la zone d'ouverture de la coquille, se trouve une couche de cellules transversales qui sécrète de la matière calcaire, qui se solidifiera en cristaux sous forme de prisme ou de plaque. Les prismes sont fermement serrés transversalement à la paroi de la coque, tandis que les plaques se tiennent dans le sens de la longueur et entrecroisées afin d'atteindre une fermeté maximale. (aB) • La couche principale de la coquille est constituée d'aragonite (CaCO3) qui est mécaniquement très dure. (aB) • Processus de bio-minéralisation (organisme vivant qui produit des minéraux). Pas en lien avec les facteurs définis ici.

Références

5. N. Trinkler et al., "Clam shell repair from the brown ring disease: a study of the organic matrix using Confocal Raman micro-spectrometry and WDS microprobe," Anal. Bioanal. Chem., vol. 396, no. 2, pp. 555–567, Jan. 2010.

6. https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/zoologie-coquille-mollusques-memoire-environnement-662/page/7/

7. https://www.pourlascience.fr/sd/biophysique/comment-les-coquillages-acquierent-leur-forme-14528.php P. S. Dickinson, D. J. Prior, and C. Avery, "The pneumostome rhythm in slugs: a response to dehydration controlled by hemolymph osmolality and peptide hormones.," Comp. Biochem. Physiol. A. Comp. Physiol., vol. 89, no. 4, pp. 579–85, 1988.

8. https://www.pourlascience.fr/sr/logique-calcul/lalgorithme-des-coquillages-12925.php

DORYPHORE - *Leptinotarsa decemlineata (coléoptère)*

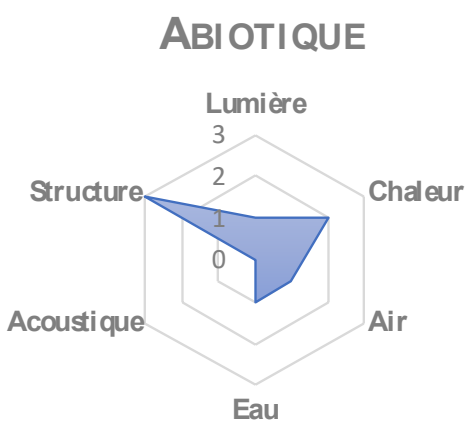
Impact structure

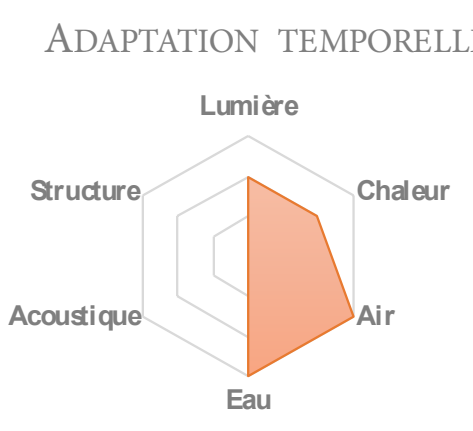
Structure de l'élytre légère et solide en raison de sa composition faite de multicouches anisotrope en chitine et de sa structuration en trabécules.

Légèreté potentiellement assurée par la présence d'un espace contenant l'hémolympe et donc structure moins dense.

Adaptabilité temporelle
Facteur abiotique
Impacts Air, Eau, Chaleur, Lumière

Ouverture/fermeture des élytres pouvant assurer le passage d'eau et d'air (et donc avoir un léger impact thermique).





Description

Le doryphore est une espèce d'insecte de l'ordre des Coléoptères. Ceux-ci possèdent un exosquelette très dur ainsi que des ailes antérieures très rigides appelées élytres. Ces élytres recouvrent la région dorsale et protègent les ailes postérieures lorsque l'insecte n'est pas en vol. Lors du vol, les élytres se soulèvent pour permettre le déploiement des ailes postérieures membraneuses.

Anatomie : Développement anamétabole, c'est à dire que les juvéniles sont différents de l'adulte et subissent une métamorphose.

Composition : Les élytres sont des cuticules (petites peaux) composées d'un matériau composite multifonctionnel léger résistant à la compression et à la traction, composée de chitine. Il existe deux types de cuticules : la cuticule Balken (plusieurs couches unidirectionnelles) et la cuticule pseudoorthogonal (couches unidirectionnelles dans différents plans).

Physiologie : Les cuticules d'espèces incapables de voler présentent généralement un espace contenant l'hémolymphe (sang de l'insecte) assez fin. Cet espace rempli est plus volumineux chez des espèces capables de voler comme le doryphore et contribue à la légèreté des Élytres sans altérer leur résistance. Le matériau peut être économisé en réduisant l'épaisseur totale, la cuticule ventrale, ou en élargissant l'espace de l'hémolymphe. Cette construction légère et efficace est primordiale pour assurer une bonne capacité de vol et une protection physique efficace.

Morphologie : La caractéristique anisotrope de ce matériau, constitué de fibres de chitine noyées dans une matrice protéique, permet des propriétés matérielles différenciées localement. La morphologie des élytres est basée sur une structure à double couche qui est reliée par des éléments de support en forme de colonne doublement incurvés, les trabécules. La disposition des fibres dans une trabécule fusionne les segments de coque supérieur et inférieur avec des fibres continues. La distribution et l'articulation géométrique des trabécules sont très différenciées dans toute la carapace. Les principes structurels sous-jacents pourraient être identifiés et traduits en règles de conception pour les morphologies structurales.

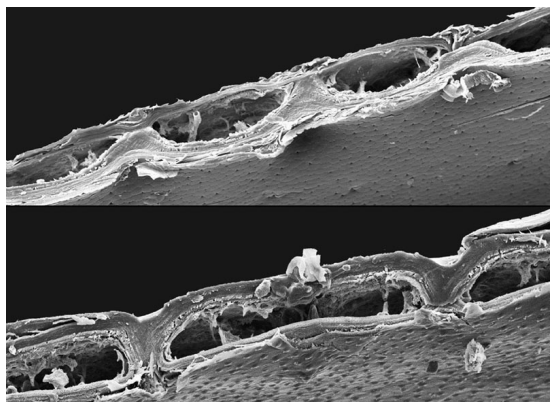
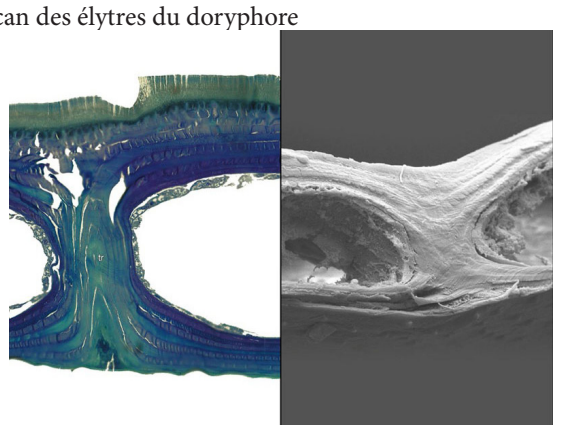
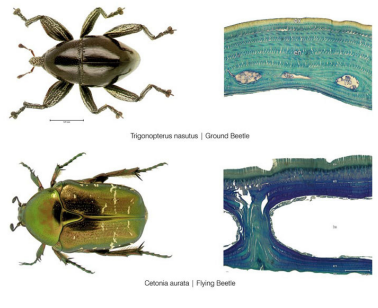
Cycle : Le doryphore hiverne, enfoui à 25 à 40 cm dans le sol. Lorsque la température du sol atteint 14 °C, et après des précipitations importantes, l'adulte sort pour se nourrir (notamment de jeunes feuilles de pomme de terre). En fin d'été, les adultes s'enfoncent dans la terre pour hiverner.

Climats : variés de l'hémisphère nord. L'insecte, sensible au froid, a besoin en été d'au moins 60 jours à une température supérieure à 15 °C.

Références

1. T. van de Kamp and H. Greven, "On the Architecture of Beetle Elytra," Entomol. heute, vol. 22, no. 22, pp. 191–204, 2010.
2. T. van de Kamp, M. Doerstelmann, T. dos Sanots Rolo, T. Baumbach, A. Menges, and J. Knippers, "Beetle Elytra as Role Models for Lightweight Building Construction," Entomol. heute, vol. 27, no. November, pp. 149–158, 2015.
3. https://www.terrevivante.org/1426-le-doryphore.htm
4. https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/190192/1/ChitineCuticule.pdf
5. http://www.achimmenges.net/?p=5713

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Fonctions régulations	Principes	Facteurs	Description Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Couche d'air entre l'élytre et le corp du doryphore lorsque les ailes sont refermées. (A) (aB) • Comportemental: animal ectotherme mais sensible au froid pour son développement. Hiverne sous la terre, se positionne au soleil. (B) • Chitine incolore (ou du moins blanche si épaisseur suffisante).
Air *Filtrer, Mettre en mouvement, transmettre, stocker*	Diffusion Convection	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume*	• Imperméabilité possible à l'air avec le système peau + élytre. (A) (aB)
Eau ***Se protéger, transmettre, stocker***	Condensation Diffusion Action Gravitaire Action Capillaire Écoulement Sorption / Absorption	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume* *Propriété du fluide*	• Imperméabilité possible à l'eau avec le système peau + élytre. (A) (aB)
Structure ***Stabilité Solidité***	Absorber Transmettre	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide* *Propriété de l'onde mécanique*	• Structure composée d'empilements de lamelles de chitine renforcée par carbonate de calcium. (aB) • Repliements. (aB) (A) • Espace baignant dans l'hémolymphe (aB), Légèreté de structure.  *Ref. [5]* Scan des élytres du doryphore  *Ref. [2,5]* Corrélation de la disposition des fibres et de la morphologie structurale des trabécules.  *Ref. [5]*

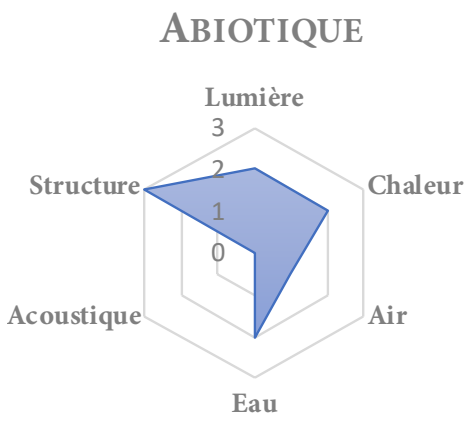
ECAILLES CORNÉES

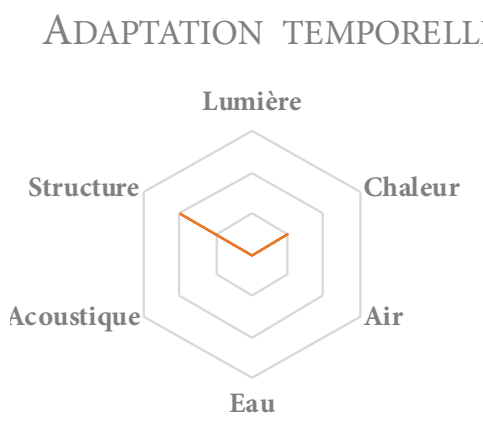
Adaptabilité temporelle
Facteur abiotique
Impact structure

Protection structurelle contre l'usure. Phénomène de mue (énergivore mais stratégique).

Adaptabilité temporelle
acteur abiotique
Impact structure

Propriétés sur la gestion de chaleur de lumière, et la rétention d'eau à explorer.





Description

Le terme « écaille » recouvre à lui seul une grande variété de structures : écailles des poissons, écailles des Chéloniens (le groupe des Tortues), écailles des Crocodiliens, des Lacertiliens (les Lézards) ou des Archosauriens (Dinosaures + Oiseaux), ou encore écailles de certains mammifères comme les tatous et les pangolins. Seules les écailles cornées (exclusion des écailles de poissons et papillons) sont abordées ici.

L'écaille cornée est une plaque rigide qui émerge du derme d'un animal pour renforcer sa protection.

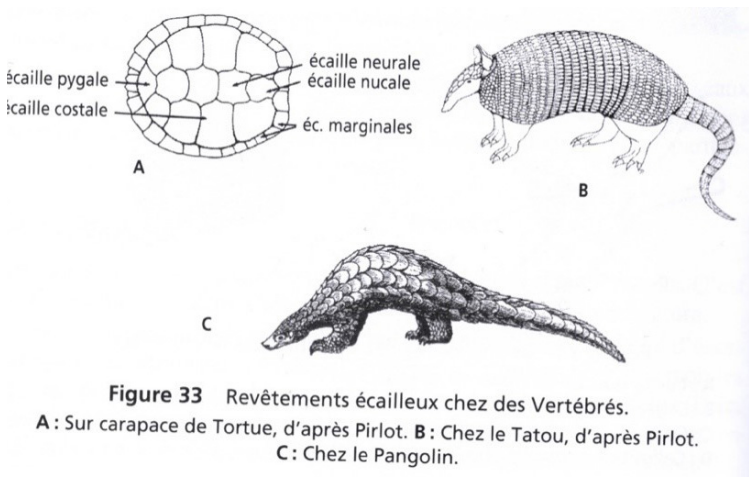
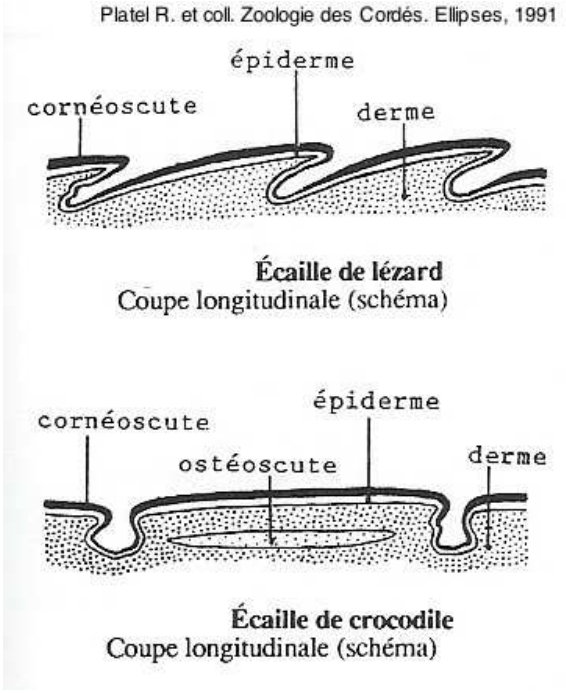


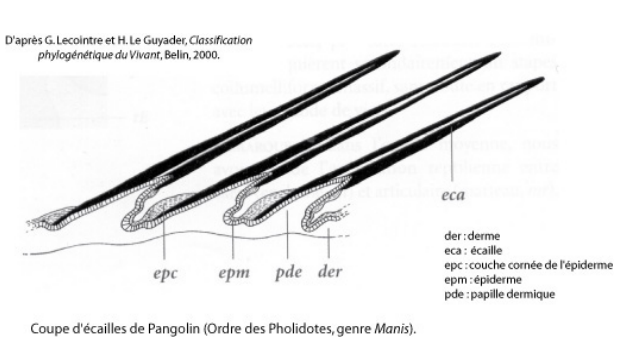
Figure 33 Revêtements écailleux chez des Vertébrés.
A : Sur carapace de Tortue, d'après Pirlot. **B** : Chez le Tatou, d'après Pirlot.
C : Chez le Pangolin.

Tortues et des Crocodiliens : La carapace (la région dorsale) et le plastron (la région ventrale) des Tortues sont constituées de plaques osseuses formées au sein du derme, attachées aux vertèbres et aux côtes. Ces plaques sont recouvertes d'un épiderme kératinisé, lui aussi divisé en plaques, mais ces dernières sont dépourvues de relation géométrique avec les plaques osseuses. Chez tous les reptiles, la kératine est présente sous deux formes : la kératine alpha, flexible, assure la souplesse de la peau et est seule présente entre les écailles, alors que la forme bêta est plus rigide et se concentre au niveau des écailles. Pour certains groupes de reptiles, les plus grosses écailles du dos et de la queue recouvrent une plaque osseuse dermique (ostéoscute). Chez les Chéloniens (les Tortues), ces mêmes ostéoscutes sont soudés entre eux et aux vertèbres et constituent la carapace et le plastron (Image 1).

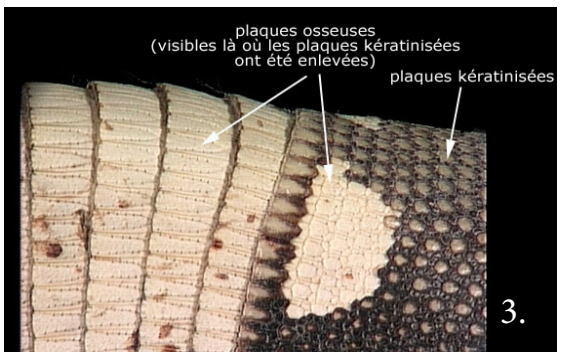
1.



2.



Coupe d'écailles de Pangolin (Ordre des Pholidotes, genre *Manis*).



Revêtement kératinisés de mammifères : Quelques genres de Mammifères présentent, en plus des poils ou des griffes, des revêtements durs particuliers. C'est le cas des représentants de l'ordre des Pholidotes, les Pangolins (Image 2), dont le corps est recouvert de larges écailles chevauchantes, kératinisées, et celui des Tatous (Image3).

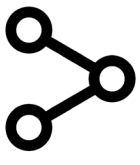
Stratégie: Protection contre l'usure de la peau (qui est rapide chez les rampants) et réduction des frictions, imperméabilité, communication (camouflage, visibilté), mobilité (comme monter aux arbres pour certaiens espèces).

Composition: Béta-Kératine (écailles) + Os/ostéoderme (scutelles).

Références

1. https://planet-vie.ens.fr/thematiques/animaux/les-productions-tegumentaires-dures-des-vertebres-ecailles-plumes-poils
2. Noël Vincent, Des reptiles? Quelle horreur!: Débarrassez-vous des préjugés sur les reptiles, Le monde des lézards. 2016.
3. H. B. Lillywhite, How snakes work : structure, function and behavior of the world's snakes.
4. A. F. Bennett and P. Licht, "EVAPORATIVE WATER LOSS IN SCALELESS SNAKES."

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Fonctions régulations	Principes	Facteurs	Description Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)
Lumière *Se protéger, filtrer, transmettre*	Réfléchir Absorber Diffuser Transmettre	*Macro-géométrie* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Couleurs pigmentaires et/ou structurales : pigments pour la plupart des couleurs, ou diffusion de Rayleigh via la structure. (aB)
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Métabolisme lent, poïkilotherme: consomme peu d'énergie pour se chauffer, la prend directement de son environnement. Donctrès dépendant de l'environnement. • Hibernation: si climat trop froid, mise en sommeil, ralentissement profond du métabolisme. • Les lézards utilisent leurs capacités à changer de couleur (assombri ou éclaircir) pour la thermorégulation (contraction des muscules). Capter + d'infra-rouge le matin pour se réchauffer. Ou bloquer plus de rayon pour éviter la surchauffe. (aB) (A) • Absorption/transmission de la chaleur par les écailles ? (aB) Apparemment, grande conductivité thermique.
Air *Filtrer, Mettre en mouvement, transmettre, stocker*	Diffusion Convection	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume*	• Evaporation pulmo-cutanée : échange gazeux par poumons et peau. (On ne sait pas quelles proportions ont les deux). (aB)
Eau ***Se protéger, transmettre, stocker***	Condensation Diffusion Action Gravitaire Action Capillaire Écoulement Sorption / Absorption	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume* *Propriété du fluide*	• La kératine est insoluble, et sa présence garantit une « peau » imperméable. (aB) • L'épiderme est continue chez les serpents, ce qui empêche les infiltrations. (aB) • On suppose que les écailles participent à la rétention de l'humidité . Mais c'est mal compris et peu étudié; La peau des reptiles est caractérisée par une faible perméabilité à l'eau : la perte d'eau cutanée dans ce groupe est faible par rapport à tous les autres vertébrés. Ce qui porte à croire que les écailles ont un rôle dans la rétention d'eau/humidité. (aB)
Structure  ***Stabilité*** ***Solidité***	Absorber Transmettre	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide* *Propriété de l'onde mécanique*	• Protection structurelle contre les frottements. (aB) • Mue (A) Serpents: phénomène régulier. Les jeunes serpents au moins une fois par mois. Les adultes entre 3 à 4 fois par an (à des instants précis: hibernation, saison, etc.). Tortues, scutelles de crocodiles, etc.: poussent tout au long de la vie de l'animal et ne connaissent pas de mue. n.b.: les écailles de tortues sont soudées entre elles pour former la carapace. Elles grandissent à l'endroit de la jonction.

CÔNE - *Pomme de pin, Pinus radiata*

Facteur abiotique
Impact Air
Adaptation temporelle

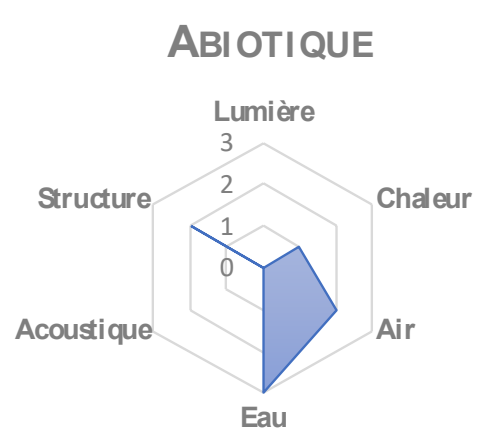
Ouverture des écailles quand l'air est sec. Dissémination des graines par le vent.

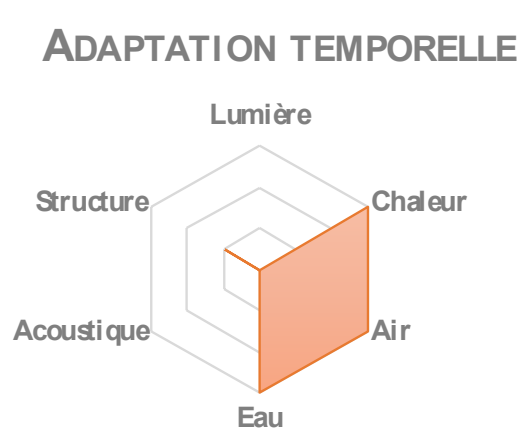
Adaptation temporelle
Impact Eau

Cone composé de deux couches ayant des hygroscopies différentes. Ouverture/fermeture passive des écailles

Impact structure

Phyllotaxie des écailles pour une croissance arrangée



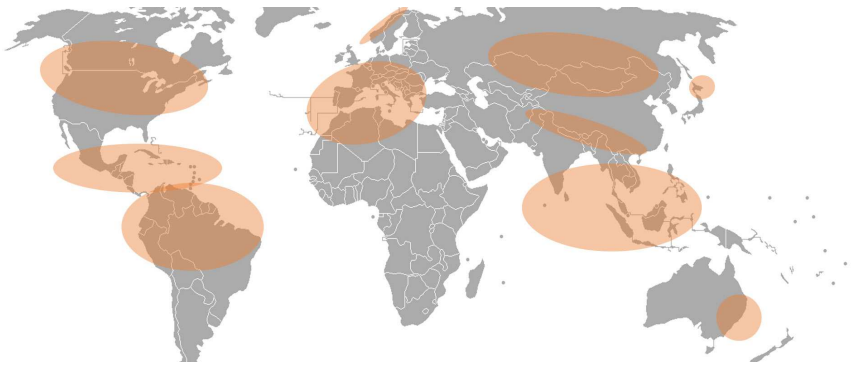


Description

Le cône est la structure de regroupement des organes reproducteurs chez les conifères. Il est composé d' écailles qui se recouvrent les unes les autres. Lorsque les cônes ne sont plus alimentés par l'arbre mère, les cônes sèchent et les écailles s'ouvrent : les graines (mâles ou femelles) sont libérées. Elles sont le plus souvent «ailées», avec une dissémination anémochore (par le vent). Quand l'air est humide, les écailles se referment. Les cellules dans les cônes matures sont mortes, le mécanisme d'ouverture/fermeture est donc passif : la structure des écailles et la paroi des cellules composant les écailles permettent la variation d'ouverture/fermeture face au changement d'humidité ambiante.

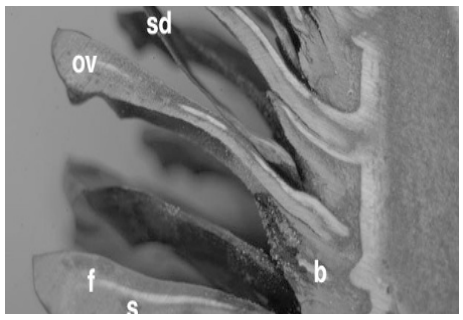
Composition : Une fois mortes, les écailles sont constituées de deux tissus: **fibres scléreuses** pour la surface interne (8–12 mm de diamètre, 150–200 mm de longueur), **fibres sclérites** pour la surface externe (20–30 mm de diamètre, 80–10 de longueur).

histogénèse (développement des tissus/organes) : Le collenchyme et le sclérenchyme sont deux tissus de soutiens chez les végétaux, qui assurent la souplesse et la rigidité de la plante. Le collenchyme se rencontre dans les organes jeunes, en croissance donc essentiellement dans les parties aériennes. Le tissu est vivant, épaissi par des dépôts de cellulose qui confèrent résistance à la flexion et traction, souplesse et élasticité. Le sclérenchyme est le tissu mort des organes ayant terminé leur croissance. Les parois des cellules sont très épaissies par un dépôt de **lignine**, lui conférant rigidité et dureté.



Climats : **Variés**.

Localisation : Hémisphère nord (Pinacées), dominant largement les régions boréales et les zones de haute altitude ; dans l'hémisphère sud (Podocarpacées) principalement en régions équatoriale ou tropicale ; dans les deux hémisphères (Cupressacées, Taxacées), Amérique du Sud et en Océanie (Araucariacées).

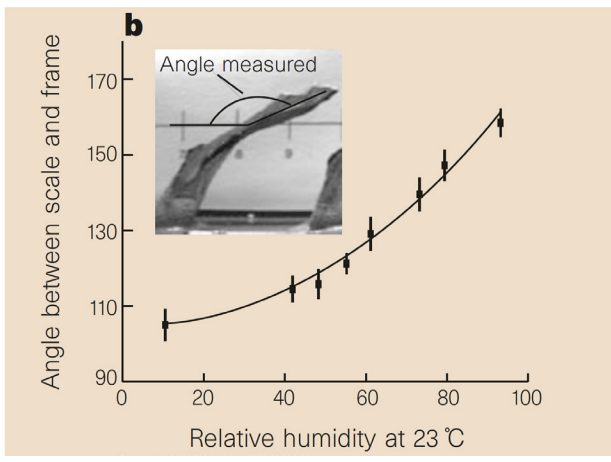
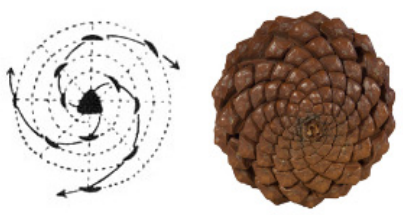


Morphologie d'un cône femelle en coupe longitudinale (b : bractée ; sd : graine ; ov : écailles ovulifère avec deux couches de tissus ; f : fibres scléreuses et s : sclérites).
Ref. [2]

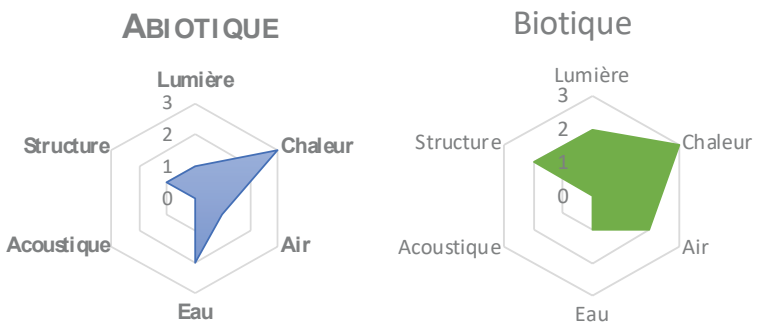
Références

1. http://www.achimmenges.net/?p=5612
2. Dawson, Colin, Julian F. V. Vincent, and Anne-Marie Rocca. 1997. "How Pine Cones Open." Nature 390 (6661): 668–668. https://doi.org/10.1038/37745.
3. Song, Kahye, Eunseop Yeom, Seung-Jun Seo, Kiwoong Kim, Hyejeong Kim, Jae-Hong Lim, and Sang Joon Lee. 2015. "Journey of Water in Pine Cones." Scientific Reports 5 (1): 9963. https://doi.org/10.1038/srep09963.
4. ("The Mechanics of Explosive Dispersal and Self-Burial in the Seeds of the Filaree, Erodium Cicutarium (Geraniaceae) | Journal of Experimental Biology" n.d.)*
5. https://www.jardinsdefrance.org/des-coniferes-champions-de-la-resistance-a-la-secheresse/
6. https://sites.google.com/site/conesetreglesmaths/croissance-et-phyllotaxie

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

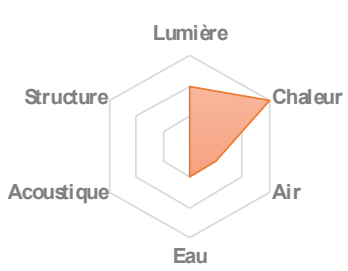
Fonctions régulations	**Principes**	**Facteurs**	**Description** Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Changements inétivables lors de l'ouverture des écailles (impacts possibles sur les graines) mais fin de la raison d'être de la pomme de pin lors de la dissémination des graines. (aB) (A)
Air *Filtrer, Mettre en mouvement, transmettre, stocker*	Diffusion Convection	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume*	• Ouverture/fermeture passive des écailles donc variation d'étanchéité à l'air. (aB) (A)
Eau ***Se protéger, transmettre, stocker***	Condensation Diffusion Action Gravitaire Action Capillaire Écoulement Sorption / Absorption	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume* *Propriété du fluide*	• Ouverture/fermeture passive des écailles par courbure pour taux d'HR variant : (aB) (A) Pour un changement d'humidité relative de 1% à 23 °C, le coefficient de dilatation hygroscopique des fibres (0,06 ± 0,02) est significativement inférieur à celui des sclérites (0,20 ± 0,04)  *Ref. [2]* La flexion va déprendre de la manière dont l'orientation des microfibrilles de cellulose contrôle le développement hygroscopique des cellules dans les deux couches. Dans les sclérides, les microfibrilles sont enroulées autour de la cellule (angle d'enroulement élevé) = permet de s'allonger lorsqu'elle est humide. Dans les cellules à fibres, les microfibrilles sont orientées le long de la cellule (angle d'enroulement faible) = permet de résister à l'allongement. • Dans beaucoup de conifères, résistance à la «cavitation» (rupture) des tissus conducteurs d'eau et limitation des pertes d'eau par fermeture des stomates via la synthèse d'une hormone, l'Acide Abscissique (ABA). Pomme de pin ? (aB)
Structure ***Stabilité Solidité***	Absorber Transmettre	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide* *Propriété de l'onde mécanique*	• Phyllotaxie des écailles. Possible maximisation du nombre d'écailles et donc de graines. La phyllotaxie est une étude botanique qui consiste étudier la disposition des feuilles sur les tiges des plantes et permet de caractériser les différentes espèces. Elle permet aussi d'étudier la disposition des éléments des fruits et des fleurs. Ici, phyllotaxie dite «spiralée». (aB) (A) 

MICROCÈBE - *Microcebus, lémurien*



Adaptabilité temporelle
Facteur abiotique
Impact chaleur

Adaptation de la fourrure et de l'épaisseur de graisse pendant les saisons froides. Graisses brunes qui chauffent en sortie de torpeur.



Adaptabilité temporelle
Facteur biotique
Impact chaleur

Réduction de la température corporelle par une mise en torpeur, selon quantité de nourriture disponible.

Description

Le microcèbe est une petite espèce de lémurien de Madagascar. Cette espèce est nocturne, arboricole et très active. Elle forme des groupes mixtes pour se coucher et se reposer dans des trous d'arbres pendant la journée.

Métabolisme : Les microcèbes présentent la particularité de pouvoir rentrer en torpeur, c'est à dire de réduire de manière contrôlée leur métabolisme et leur température corporelle.

Durant les mois d'hiver austral, les individus peuvent entrer dans des périodes d'inactivité allant de quelques heures (torpeur quotidienne) à des semaines. Cette stratégie physiologique a très probablement évolué en réponse aux fortes variations saisonnières de la température et de la disponibilité de nourriture dans le centre et le sud de Madagascar.

Comportement : Ils se regroupent en général à 3 minimum dans un tronc d'arbre isolant afin d'économiser l'énergie et maintiennent leur température corporelle à 35°C s'il n'y a pas de problèmes de disponibilité de nourriture ou de froid. En cas de torpeur, des températures corporelles aussi basses que 7°C ont été mesurées. Cette baisse de la température corporelle s'accompagne d'une réduction substantielle de la consommation d'oxygène et donc du taux métabolique.

Nids: Pendant la journée, les microcèbes restent à l'intérieur de trous pour arbres, de nids construits par eux-mêmes ou d'autres abris naturels qui les protègent des fluctuations de température quotidiennes et les protègent des prédateurs. Les trous dans les arbres appropriés, en particulier, sont donc des ressources structurelles importantes qui peuvent influencer l'utilisation de l'habitat par les lémuriens. En choisissant des arbres dotés de capacités isolantes particulières et en partageant des trous avec des congénères, le lémurien bénéficie d'avantages énergétiques considérables, qui augmentent encore les économies d'énergie réalisées au cours de périodes de torpeur journalières ou saisonnières.

Anatomie : Les Microcèbes sont des mammifères, ils possèdent une fourrure dense sous forme de duvet qui permet d'éviter les pertes en eau et en chaleur. Ils répondent à un grande saisonnalité. Lorsqu'ils ont trop chaud, ils ventilent par les pâtes et la bouche en haletant. Ces adaptations physiologiques à la saisonnalité entraînent des cycles prononcés de la masse corporelle et de la teneur en graisse, qui ont à leur tour une incidence sur les budgets d'activité et le comportement alimentaire de Microcebus. Au cours de plusieurs mois d'hibernation, les Microcèbes perdent environ 1/3 de leur masse corporelle préhibernante.

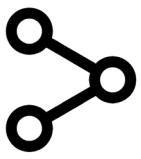
Localisation: Espèce endémique au Madagascar.

Climats: Tropical (Af, Am, As, Aw). Le climat au Nord de Madagascar est humide, les températures annuelles varient de 15 à 30°C. Le climat au Sud de Madagascar est sec, les températures annuelles varient de 0 à 40°C.

Références

1. Vuarin, Pauline, Melanie Dammhahn, Peter M. Kappeler, and Pierre-Yves Henry. 2015. "When to initiate torpor use? Food availability times the transition to winter phenotype in a tropical heterotherm." Oecologia 179 (1): 43–53. https://doi.org/10.1007/s00442-015-3328-0.
2. J. Schmid et J.U. Ganzhorn, « Optional strategies for reduced metabolism in gray mouse lemurs », Naturwissenschaften, vol. 96, no 6, 2009, p. 737–741 (PMID 19277596, DOI 10.1007/s00114-009-0523-z, Bibcode 2009NW.....96..737S)
3. M. Perret, « Energetic Advantage of Nest-Sharing in a Solitary Primate, the Lesser Mouse Lemur (Microcebus murinus) », Journal of Mammalogy, vol. 49, no 4, 1998, p. 1093–1102
4. https://actualite.housseniawriting.com/science/environnement-ecologie/lemuriens/2017/06/08/le-lemurien-microcebus-un-modele-animal-ideal-pour-les-maladies-humaines/22134/
5. file:///C:/Users/thubert/Downloads/CP_2015_07_06_MNHN_Henry_Torpeur.pdf

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Fonctions régulations	**Principes**	**Facteurs**	**Description** Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)
Lumière *Se protéger, filtrer, transmettre*	Réfléchir Absorber Diffuser Transmettre	*Macro-géométrie* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Animal nocturne (compétiteur diurne), adaptés à l'obscurité mais a priori pas de propriété particulière au niveau de son enveloppe corporelle. (B)
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume*	• Métabolisme exceptionnel: torpeur. (B) • Production interne de chaleur (composition chimique (mitochondrie) + propriétés de la matière (conductivité thermique, température de surface). (B) • Bon ratio surface-volume afin d'éviter les pertes (aB) • Graisse brune qui se met à chauffer lorsqu'il sort de torpeur sur certains points du corps. Graisse brune = tissu adipeux/corporel brun abondant chez les mammifères hibernants capable d'assurer de la thermogénèse/production de chaleur, à partir de gras et de sucre (quantité significative d'énergie déjà stockée dans ses cellules sous forme de gouttelettes). (aB)(A) • Comportemental: se tiennent chaud les uns les autres + nids. (B) • Variation du niveau de graisse selon la saison. (aB) (A) • Fourrure dense qui empêche la chaleur de s'échapper. (aB, A)
Eau ***Se protéger, transmettre, stocker***	Condensation Diffusion Action Gravitaire Action Capillaire Écoulement Sorption / Absorption	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume* *Propriété du fluide*	• Fourrure dense qui empêche l'eau de s' échapper au vu des fortes chaleurs (négatif dans ce cas). (aB), (A) • A priori, halètement et glandes sudoripaires via la truffe pour se refroidir (non en lien avec l'enveloppe).
Structure  ***Stabilité Solidité***	Absorber Transmettre	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide* *Propriété de l'onde mécanique*	• Posture d'arboricole, mais en lien avec ossature et non enveloppe. • Bonne régénération des cellules (B).

FOURMI D'ARGENT- *Fourmi du désert, Cataglyphis bombycina*

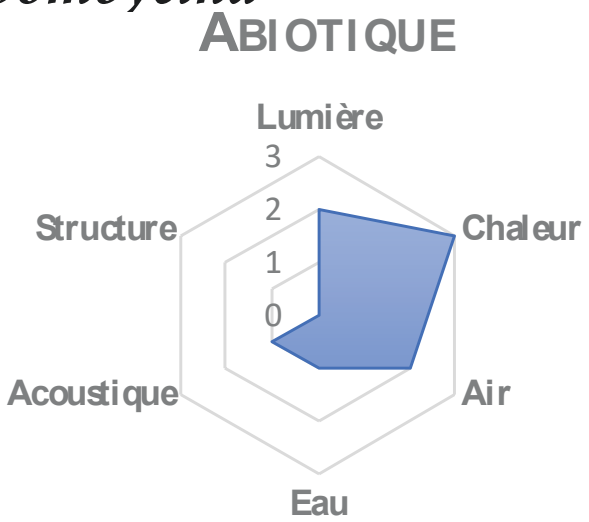
Impact Chaleur

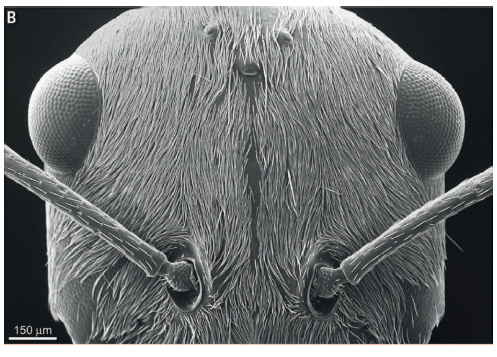
Capable de supporter les température très élevées du désert grâce à ses poils argentés au profil rectangulaire : ces poils améliorent la réflectivité de la surface corporelle de la fourmi dans la gamme visible et proche infrarouge du spectre, mais aussi l'émissivité de la fourmi dans l'infrarouge moyen.

Facteur Air, Eau

Respiration des fourmis via leurs enveloppes.

Pas d'absorption d'eau possible à travers l'enveloppe mais beaucoup de pertes par transpiration (flux d'eau dans un sens).





Description

La fourmi d'argent vit dans le désert du Sahara, un milieu extrêmement aride. Elle vit en communauté, dans un trou qu'elle creuse dans le sable. Son nid, creusé dans le sable et à une température de 25-30°C, lui permet d'éviter une température à la surface du sol de 85°C. Active le jour, elle referme complètement son lit la nuit.

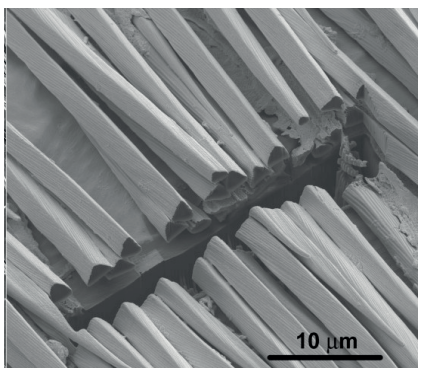
Anatomie : Elle a la tête rouge (les Touaregs l'appellent « Fourmi chrétienne », car sa tête semblant rougie par l'alcool). Pour résister à la chaleur (mort de la fourmi lorsque sa température corporelle dépasse les 54°C), le corps de la fourmi s'est spécialisé au fil du temps: elle présente ainsi des nombreux poils qui garnissent son corps par bandes alternées et servent de bouclier thermique contre le Soleil.

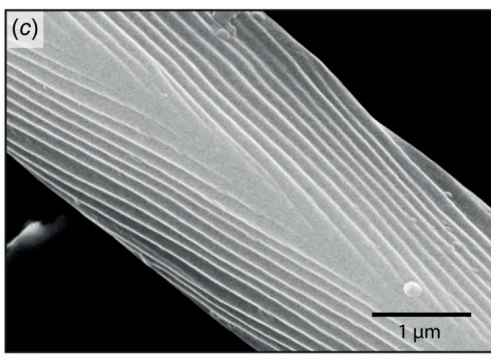
Stratégie : Pour éviter les confrontations avec ses prédateurs principaux (lézards), elle ne sort que quelques minutes de son terrier chaque jour, pour chercher la nourriture de la colonie, aux moments les plus chauds de la journée où les prédateurs sont le moins actifs.

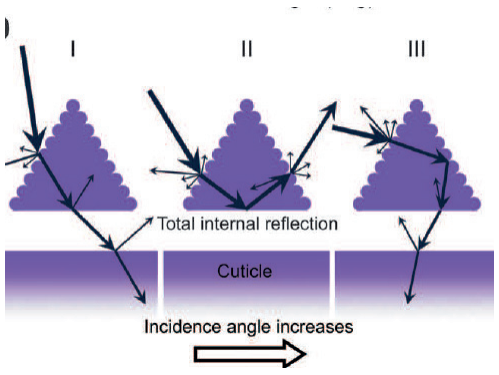
Physiologie : La fourmi d'argent sait préparer à l'avance son corps à une sortie en milieu à température élevée, en synthétisant des protéines spéciales protectrices. Si ces protéines se retrouvent chez la majorité des animaux, elles sont généralement actives en réponse à l'augmentation brutale de la chaleur. Or, La fourmi du désert est capable d'anticiper la production de ces protéines quelques dizaines de minutes avant même d'affronter la température élevée de la surface du désert. La résistance à la chaleur qui en résulte fait de cette fourmi l'un des animaux terrestres les plus thermo-résistants.

Rapidité: Cette fourmi est capable de parcourir 85,5 cm par seconde (soit 108 fois sa propre longueur par seconde), en 47 foulées, ne touchant le sol entre chaque foulée que pendant 7 millisecondes. Ramené à l'échelle humaine, cet animal qui mesure seulement quelques millimètres va ainsi 10 fois plus vite que le sprinter jamaïcain Usain Bolt.

Localisation: Désert du Sahara, climat désertique chaud (BWh); forte amplitude de température et sécheresse.







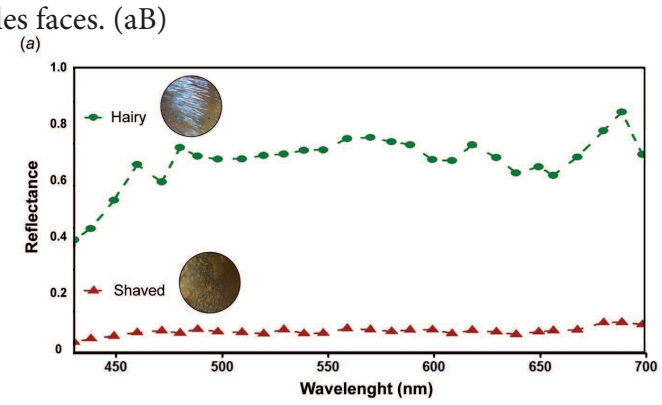
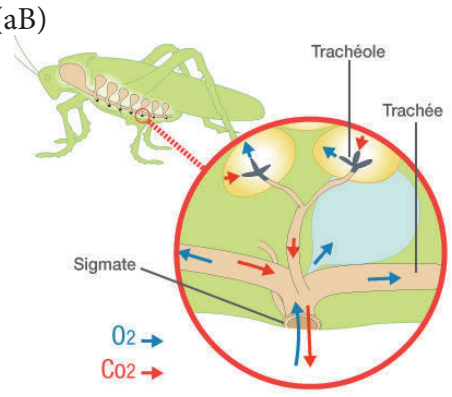
Microscopie électronique à balayage (MEB) des poils recouvrant la cuticule des fourmis. Les cheveux ont une forme triangulaire et se terminent par une pointe tranchante.

Gros plan sur les ondulations couvrant les deux côtés supérieurs de la forme triangulaire.

Références

1. https://sciencepost.fr/cette-fourmi-supporter-temperature-de-536-c-grace-a-poils/
2. https://www.geo.fr/environnement/la-fourmi-la-plus-rapide-du-monde-observee-dans-le-sahara-198130
3. Delye, Gérard. 1969. "Perméabilité du tégument et résistance aux températures élevées de quelques Arthropodes sahariens." Bulletin de la Société entomologique de France, 6.
4. Shi, Norman Nan, Cheng-Chia Tsai, Fernando Camino, Gary D Bernard, Nanfang Yu, and Rüdiger Wehner. n.d. "Keeping Cool: Enhanced Optical Reflection and Radiative Heat Dissipation in Saharan Silver Ants," 5.
5. Willot, Quentin, Priscilla Simonis, Jean-Pol Vigneron, and Serge Aron. 2016. "Total Internal Reflection Accounts for the Bright Color of the Saharan Silver Ant." Edited by Matthew Shawkey. PLOS ONE 11 (4): e0152325. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152325.

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Fonctions régulations	Principes	Facteurs	Descritption Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)
Lumière *Se protéger, filtrer, transmettre*	Réfléchir Absorber Diffuser Transmettre	*Macro-géométrie* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Reflection de la lumière par ses poils argentés. (aB)
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Gain de plusieurs degrés (au moins 2) par la présence des poils argentés, en section triangulaire, et ondulation sur les faces. (aB)  • Protection contre chaleur très comportementale (nid, stratégie de sortie, course sur le sol) et métabolique. (aB) (A)
Air *Filtrer, Mettre en mouvement, transmettre, stocker*	Diffusion Convection	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume*	• Les fourmis respirent l'oxygène à travers des spiracles/stigmates qui sont une série de trous situés sur les côtés de leur corps.(aB) 
Eau ***Se protéger, transmettre, stocker***	Condensation Diffusion Action Gravitaire Action Capillaire Écoulement Sorption / Absorption Evaporation	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume* *Propriété du fluide*	• Pas d'absorption d'eau à travers l'enveloppe, mais forte perte d'eau par transpiration (succombent à la perte de la moitié de leur eau). Perte de 10% d'eau par heure à 60°C en air sec. (aB)
Acoustique *Isoler* *Absorber*	Absorption Réflexion Transmission	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide*	• Les fourmis n'ont pas d'oreilles. Utilisent les vibrations pour entendre, pour rechercher de la nourriture ou pour sentir un danger. Leurs pattes leur servent de récepteurs. (aB)

PAPILLON MORPHO - *Morphidae*

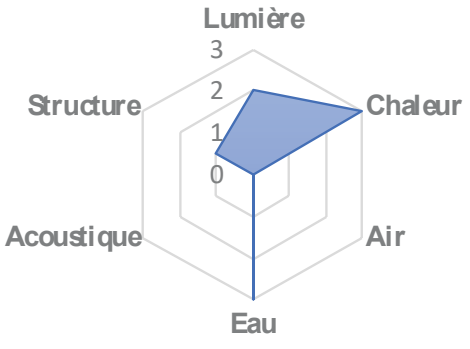
Facteur abiotique
Impacts Eau

Superhydrophobie par la nanostructuraction des ailes.

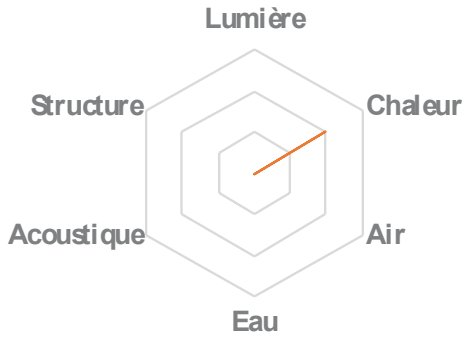
Adaptabilité temporelle
Impacts Chaleur

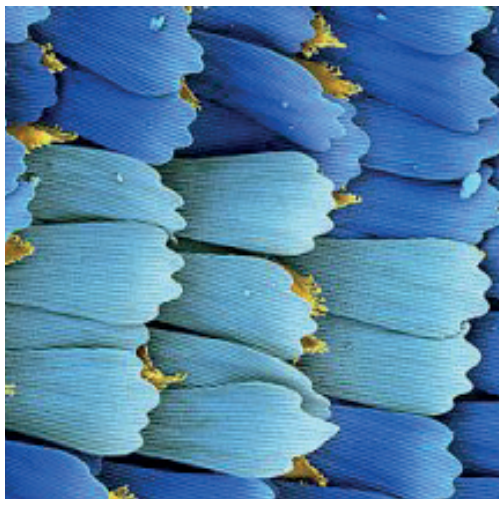
Au dessus de 40°C, rayonnement de la chitine pour dissiper la chaleur.

Abiotique



Adaptation temporelle





Description

Le Morpho est un papillon de grande taille (12 à 20 cm d'envergure), connu pour le bleu de ses ailes ; ce bleu n'est pas dû à des pigments mais à une couleur structurale.

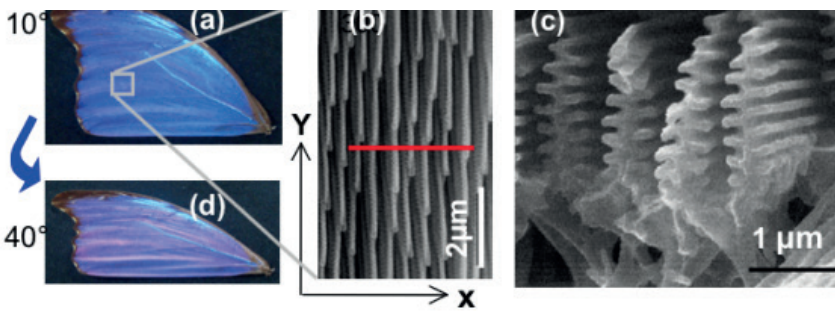
Comme tout insecte, ses ailes sont constituées de deux membranes accolées, sous-tendues par un réseau de nervures permettant la circulation de l'hémolymphe (sang des insectes) et la gestion thermique du corps. La rigidité des nervures est variable selon les phases de vol.

Ecailles : Les ailes des papillons sont composées d'écailles microscopiques, qui sont des productions tégumentaires (enveloppe externe) spécialisées. Les écailles sont de petites tailles et constituées de chitine. Il y a entre 200 et 600 écailles par mm^2, qui se chevauchent et sont placées par couches.

Couleur : Il existe deux grand processus distincts pour qu'un objet paraisse coloré à la vue d'un observateur :

1. L'objet peut absorber certaines radiations et renvoyer les autres vers un observateur éventuel. C'est le phénomène le plus courant. L'absorption est due à des composés chimiques : les pigments. Les couleurs sont dites chimiques ou pigmentaires. Les pigments génèrent plus des couleurs chaudes (vert, jaune, orange, rouge) tandis que les structures génèrent des couleurs dites froides (violet, bleu, vert).

2. L'objet peut aussi disperser spatialement les longueurs d'ondes par différents processus optiques (interférence, diffraction, diffusion). Des radiations peuvent être réfléchies dans une direction donnée tandis que les autres vont être transmises. Les couleurs sont dites physiques ou structurales. La couleur varie selon l'angle d'éclairage ou d'observation, ce phénomène est appelé goniochromie ou irisation.



Chez le Morpho, seul le mâle est bleu sur sa face dorsale. Les écailles de fond sont à l'origine de la couleur bleue, les écailles de recouvrement sont alors transparentes ou atrophiées.

Composition : Les éléments et les structures sont fines et bâties à l'aide de la chitine. La chitine est un polymère de la famille des glucides. C'est une molécule qui confère au matériau une résistance et une souplesse, voire une dureté si elle est associée à du carbonate de calcium.

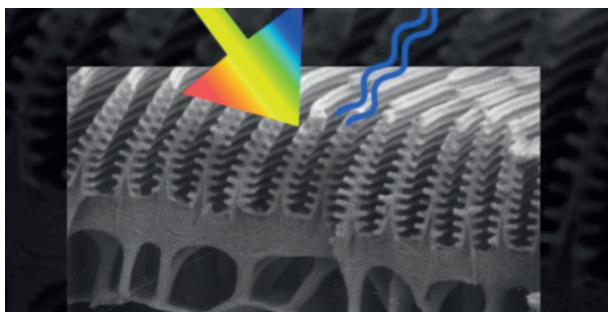
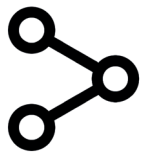
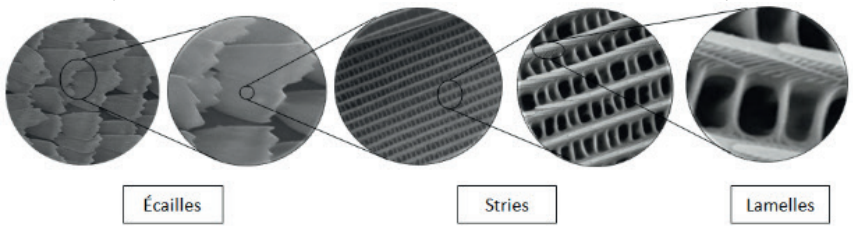
Strategie: Signal visuel pour les femelles.

Localisation: Amérique centrale et d'Amérique du Sud : Brésil, Costa Rica, Équateur, Guyanes (Suriname, Guyana et Guyane française) et Venezuela. Climat tropical à tempéré (sec).

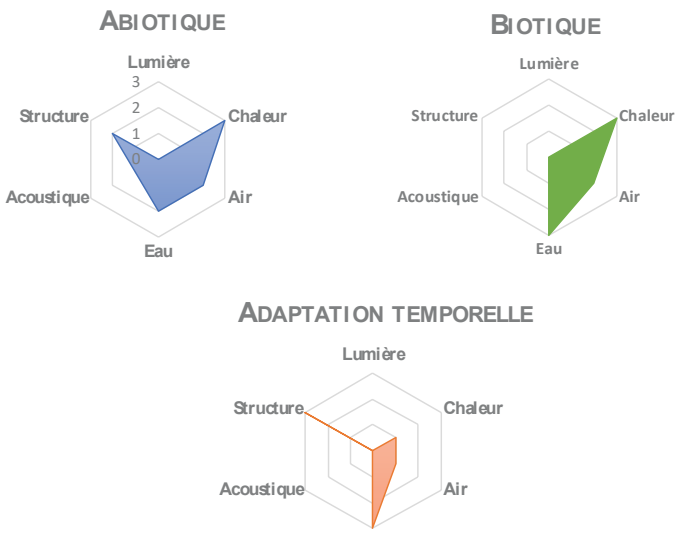
Références

1. T. van de Kamp and H. Greven, "On the Architecture of Beetle Elytra," Entomol. heute, vol. 22, no. 22, pp. 191–204, 2010.
2. Saito A. et al. (2009) : Reproduction, mass-production, and control of the Morpho-butterfly's blue. SPIE vol. 7205 (
3. Chung K. et al. (2012) : Flexible, angle-independent, structural color reflectors inspired by Morpho Butterfly wings. Adv. Mater. 24:2375-2379 T
4. he Insects : Structure & Function (5ème édition, 2013) – Edition : S.J. Simpson & A.E. Douglas – Cambridge University Press
5. The Insects: Structure and Function (R.F. Chapman & Stephen J. Simpson – Edition : Cambridge University Press – 959 pages – 5ème édition : 12 novembre 2012)

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Fonctions régulations	**Principes**	**Facteurs**	**Description** Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)
Lumière *Se protéger, filtrer, transmettre*	Réfléchir Absorber Diffuser Transmettre	*Macro-géométrie* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Les écailles iridescentes des ailes des papillons Morphos peuvent être utilisés pour la régulation lumineuse. Cette diffraction est due à la nanostructure complexe périodique des écailles et au phénomène de réflectivité (transmission et absorption du rayonnement lumineux à différentes échelles). • Le réseau de stries disperse les radiations de différentes longueurs d'onde, mais n'en sélectionne aucune. L'origine du bleu provient des lamelles. Elles prennent naissance depuis la membrane alaire, à intervalle régulier et se superposent. Les lamelles sont inclinées de 10° environ. La longueur des lamelles est régulière. En tout point de la strie, le nombre de lamelles empilées est le même. • La couleur interférentielle est produite par une multicouche striée air/chitine qui forme un réseau de diffraction qui va disperser cette couleur. La superposition des écailles transparentes et iridescentes amplifie le phénomène de diffraction. Deux effets optiques : interférence et diffraction. La distance entre les stries est d'1µm (x2 longueur d'onde bleu) et la distance entre les lamelles est de 100 à 120 nm (¼longueur d'onde bleu). La lumière et la structure sont du même ordre de grandeur, d'où une forte interaction.  • Structure auto-nettoyante qui permet une optimisation des rayons lumineux.
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Les papillons du genre Morpho sont des poïkilothermes, ils ont une activité métabolique basse et passent principalement par des processus exogènes pour réguler leur température. (B) • Circulation hémolymphe pour dissiper la chaleur vers l'abdomen. • Captation de l'énergie solaire pour la transformer en énergie thermique via des phénomènes d'absorption, d'émission et de réflectivité. Les Morpho maintiennent alors leur température à 35-40°C grâce aux phénomènes d'absorption et d'émission. Au-delà de 40°C, la chitine des ailes se met à rayonner (rayonnement par la chitine permet de dissiper la chaleur et de ne pas en absorber davantage) (aB) (A)
Eau ***Se protéger, transmettre, stocker***	Condensation Diffusion Action Gravitaire Action Capillaire Écoulement Sorption / Absorption	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume* *Propriété du fluide*	• Les ailes du Morpho sont superhydrophobes grâce à la structuration de la chitine qui compose leur revêtement. La chitine est une molécule hydrophobe: c'est la structure et la taille des stries qui confèrent aux ailes leur superhydrophobie. Cette surface rugueuse multi-échelle est telle que les gouttelettes les plus fines ne peuvent pas passer au travers. En effet l'espace inter-strie (1µm) est plus petit que la plus petite gouttelette (100µm). (aB) • Cette superhydrophobie confère une structure auto-nettoyante.
Structure  ***Stabilité Solidité***	Absorber Transmettre	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide* *Propriété de l'onde mécanique*	• Superhydrophobie qui confère une structure auto nettoyante. (aB) 

NIDS DE VESPA - *Vespidae, Frelons*



Impact Chaleur, Impact eau

Regulation thermique des nids fortement lié à l'humidité : refroidissement par évaporation.

Couche isolante tout autour du nid (mutli-couche).

Impact structurel

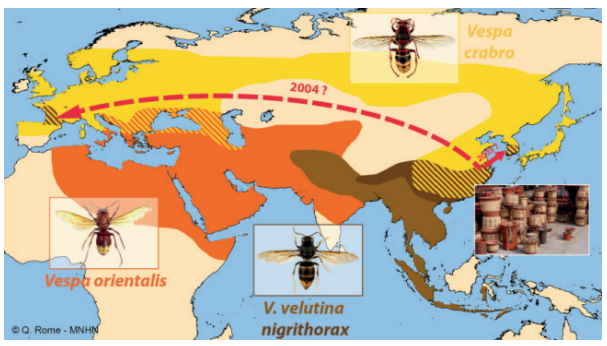
Agrandissement et adaptation de la forme du nid selon la taille de la colonie. Utilisation de fibres végétales machées et durée de vie de plusieurs mois.

Description

Vespa est un genre d'insectes sociaux, de la famille des Vespidae, sous-famille des Vespinae, communément appelés frelons, et regroupe 22 espèces. La majorité est originaire d'Asie, mais beaucoup d'espèces sont maintenant répendues dans sur plusieurs continents. Ces insectes sont dit eusociaux, c'est à dire qu'ils vivent selon un mode d'organisation sociale hiérarchisé.

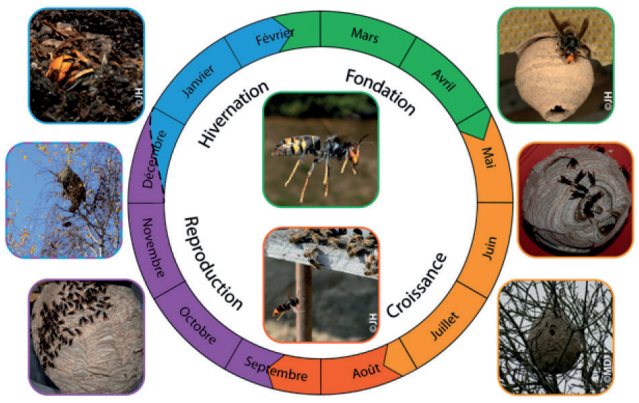
Les Vespa et l'Homme : La piqure de ces insectes est douloureuse mais non mortelle. En France, le vespa le plus connu est le frelon asiatique (vespa velutina), considéré comme nuisible car il est un prédateur des abeilles qui ne savent pas s'en défendre (savent se défendre face aux abeilles asiatiques).

Les nids : Les vespidae construisent généralement leurs nids dans les forêts denses ou proches de courants d'eau. On les trouve fréquemment pendus (arbres à 10m de hauteur, falaises, façades...) loin du passage des hommes. Les nids sont faits de boue, de bois pourri mastiqué, d'écorces, de feuilles, ou d'une combinaison de ces derniers attachés à des brindilles ou des écorces d'arbres. Bien souvent également, les nids sont construits à l'intérieur d'une cavité naturelle. La diversité de nids existant est très grande, aussi, nous ne regardons ici que les nids des espèces suivantes : Vespa crabro (frelon européen), vespa orientalis (frelon oriental) et vespa velutina (frelon asiatique).



Construction : Le nid a une durée de vie d'environ 10 mois. Il est construit en février/mars par une reine frelon. Celle-ci y pond ses premiers oeufs qui après maturité, s'occuperont des futures larves, pupes (stade intérmédiaire larve-adulte), et défenderont/agrandiront le nid. Le cycle prend fin à la mort de tous les frelons, excepté la reine qui quitte le nid pour hiberner.

Climats: Les climats auquels les vespa font face sont divers. Les frelons européens seront plutôt confronté à des climats froids/tempérés et humides, tandis que les frelons orientaux et asiatiques auront des climats secs et chauds à tempérés.

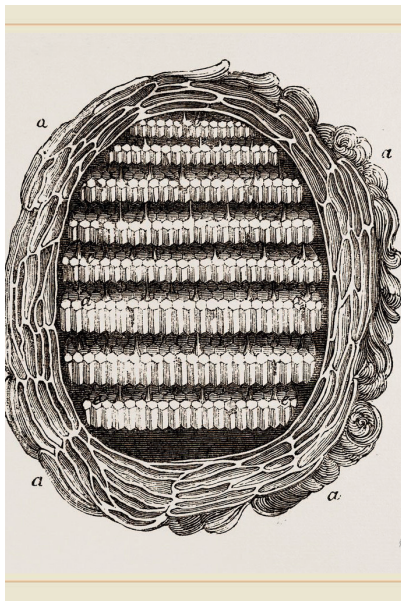


La fondatrice construit le nid: d'abord quelques cellules (où elle pond quelques oeufs) et un début d'enveloppe externe. Elle construit ensuite plusieurs enveloppes en attendant l'évolution de ses oeufs.

Références

1. Feás Sánchez, Xesús, and Rebecca Jane Charles. 2019. "Notes on the Nest Architecture and Colony Composition in Winter of the Yellow-Legged Asian Hornet, Vespa Velutina Lepeletier 1836 (Hym.: Vespidae), in Its Introduced Habitat in Galicia (NW Spain)." Insects 10 (8): 237. https://doi.org/10.3390/insects10080237.
2. Hermann, Henry R., ed. 1982. Social Insects. Vol. 4: ... New York, NY: Academic Press.
3. Jones, Julia C., and Benjamin P. Oldroyd. 2006. "Nest Thermoregulation in Social Insects." In Advances in Insect Physiology, 33:153–91. Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0065-2806(06)33003-2.
4. Klingner, R., K. Richter, E. Schmolz, and B. Keller. 2005. "The Role of Moisture in the Nest Thermoregulation of Social Wasps." Naturwissenschaften 92 (9): 427–30. https://doi.org/10.1007/s00114-005-0012-y.
5. Villemant, Claire, Franck Muller, Sandy Haubois, Adrien Perrard, and E Darrouzet. n.d. "BILAN DES TRAVAUX (MNHN ET IRBI) SUR L'INVASION EN FRANCE DE VESPA VELUTINA, LE FRELON ASIATIQUE PRÉDATEUR D'ABEILLES," 11.

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Fonctions régulations	Principes	Facteurs	Descritption Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* 	• Les nids sont entourés d'une épaisse jaquette en papier qui pour de nombreuses espèces est construite à l'intérieur d'une cavité naturelle. La chaleur générée à l'intérieur du nid peut être stockée et la température du nid régulée.(aB) • La couche isolante est également inertielle. (aB) • <u>Pour le réchauffement du nid:</u> 1. Les frelons soufflent de l'air sur les ouvertures, vers les pupes dans leur cocons. (B) 2. Les travailleurs incubent de nouvelles alvéoles à côté d'alvéoles occupées par des pupes. Ils positionnent leur abdomen contre le cocon et pompent pour générer de la chaleur. (B) 3. Maintien de la biomasse de la colonie pour une production de chaleur supérieure aux pertes. (B) • <u>Pour le refroidissement du nid ou homeostase:</u> 1. L'humidité et la chaleur latente influencent considérablement les performances thermiques de la construction du nid; conséquence, le gradient de pression de vapeur entre le nid et la température ambiante entraîne un flux de vapeur constant à travers l'enveloppe. La force motrice du flux de vapeur est la chaleur, qui est consommée par évaporation à l'intérieur du nid. La colonie compense cette perte avec la production de chaleur métabolique afin pour maintenir une température de nid stable. [Kningner] (aB) 2. Ventilation par les ailes, ou «fanning» (les travailleurs déploient leurs ailes tout en se tenant en position stationnaire, pour éloigner l'air chaud du nid). (B) 3. Les travailleurs distribuent de l'eau dans tout le nid, en le plaçant dans les petits creux qui se forment au bord des cellules de couvées. (aB) (B)
Air *Filtrer, Mettre en mouvement, transmettre, stocker*	Diffusion Convection	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume*	• Ventilation (ou «fanning») en ouverture du nid. Flux d'air dans tout le nid. (aB) (B)
Eau ***Se protéger, transmettre, stocker***	Condensation Diffusion Action Gravitaire Action Capillaire Écoulement Sorption / Absorption	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume* *Propriété du fluide*	• Le nid de frelons non détruit ne sera pas réinvesti l'année suivante. Il y a peu de probabilité qu'un nid se reconstruise à proximité immédiate de l'ancien nid l'année d'après. Le nid se dégradera naturellement avec la pluie et les oiseaux. (A) • Taux d'humidité régulé pour homeostase du nid. (aB)
Structure ***Stabilité Solidité***	Absorber Transmettre	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide* *Propriété de l'onde mécanique*	• Utilisation de ressources locales : structure solide (pour les frelons) et qui tient à son attache (pendant la durée d'occupation, peut tomber au bout d'un an). (aB) • Séchage rapide. (aB) • Extention du nid selon les besoins. (A) (B) • Forme ronde d'abord, puis forme en poire. (aB)

NID FOURNIER ROUX - *Rufous hornero*

Adaptation temporelle
Facteur biotique
Impact Lumière

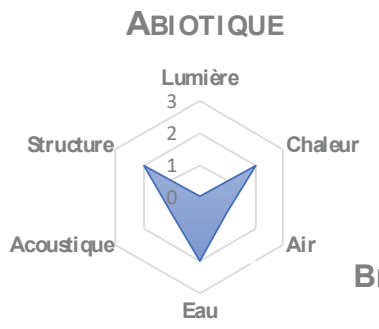
Destruction de l'ouverture principale quand les oiseaux sont en age de voler. Modificiation structurelle avec impact sur apport de lumière.

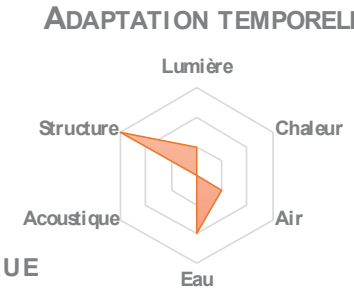
Faceurs abiotique & biotique
Impact Chaleur

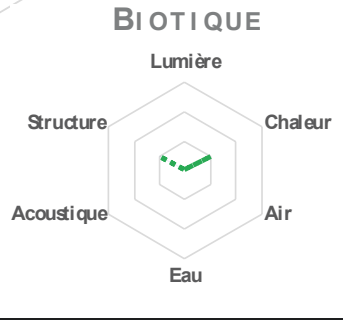
Bonne inertie thermique du matériau, et espace confiné et réchauffé par présence du fournier lors de l'incubation.

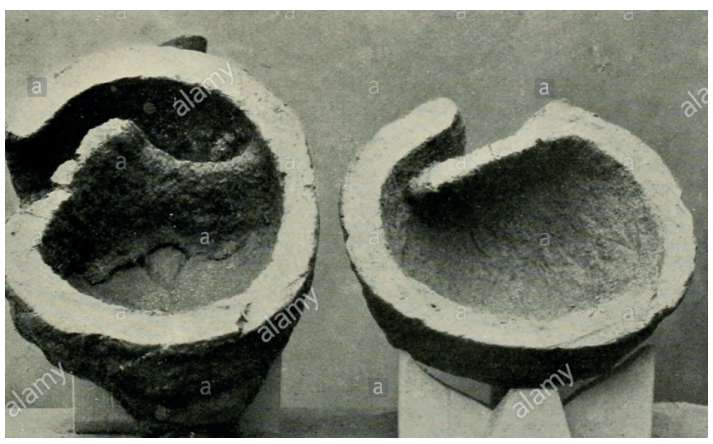
Impact structure

Structure intéressante (compartimentée), maintenance et réutilisation possible. Utilisation des ressources locales et bonne tenue du nid dans durée.









Description

Le fournier roux confectionne son nid en forme de four à partir de boue qui sèche pendant plusieurs semaines jusqu'à devenir très dure. Son nid est séparé en deux parties : une cavité qui contient ses oeufs puis les oisillons, et un couloir étroit permettant d'y accéder.

Climats : Cfa etCwa (subtropical humide), Aw (savane), BSk (semi-aride).

Fonction : Protection biotique, abiotique, reproduction, adapation-changement d'état-croissance, stockage.

Composition : Argile, eau, fibres végétales.

Temporalité : Utilisation prolongée (jusqu'à 1 an), puis recherche d'un nouvel endroit.

Le couple n'utilise pas le même nid pendant deux saisons consécutives, effectuant une rotation entre deux à trois nids. Lorsque les juvéniles sont prêts à voler, les oiseaux détruisent le mur d'entrée.

Caractéristiques : A priori, pas de construction différenciée selon les climats. Constructions en hauteur (branches, poteaux, habitations humaines)

Processus : Assemblage par les oiseaux

1. Après le passage de pluie, de l'argile rouge humide est récolée par le couple d'oiseau puis mélangée avec la végétations (herbes) à l'aide de leur bec.
2. Ajouts successifs du mélange et attention particulière portée aux dimensions de l'ouverture (afin de laisser passer au max un adulte fournier roux) et de la cavité pour accueillir quelques oeufs seulement. Protection du nid par d'autres oiseaux pendant la construction.
3. Grand dôme construit avec une large ouverture frontale (2 semaines à 1 mois).
4. Construction interne de la paroi (1 mois).
5. Reproduction, oeufs pondus, couvage, naissance.
6. Ouverture de l'entrée et constructions similaires à côté.

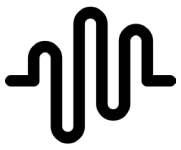
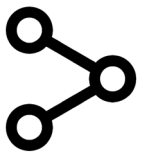
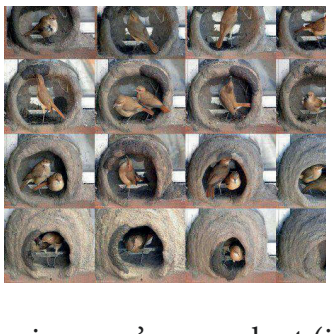
Certains nids ont deux entrées tandis (majorité avec une seule entrée au sommet du nid).

Durabilité : En dépit du travail et de l'énergie investis, le fournier roux ne le réutilise pas pour d'autres couvées, et préfère en construire un autre, souvent juste au-dessus du précédent. On peut alors voir deux ou trois nid les uns au-dessus des autres, placés bien en vue sur une branche réutilisation des fondations du nid par d'autres fourniers roux / du nid par d'autres oiseaux.

Références

1. Phylogenetic Analysis of the Nest Architecture of Neotropical Ovenbirds (Furnariidae) Krzysztof Zyskowski, Richard O. Prum, The Auk, Volume 116, Issue 4, 1 October 1999, Pages 891–911, https://doi.org/10.2307/4089670
2. Ovenbird nest site selection within a large contiguous forest in eastern pennsylvania: Microhabitat characteristics and nesting denstity, Nathan R. SENNER, Laurie J. GOODRICH, David R. BARBER and Mark MILLER, Journal of the Pennsylvania Academy of Science, Vol. 83, No. 1 (April 2009), pp. 3-9
3. https://itsnature.org/ground/birds-land/red-ovenbird/
4. https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2275188/Ovenbirds-perseverance-pays-seen-setting-new-nest-series-pictures.html
5. https://www.pbslearningmedia.org/resource/nat15.sci.lisci.ovenbird/animal-structures-a-nest-made-out-of-mud/
6. https://www.allaboutbirds.org/guide/Ovenbird/lifehistory

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Fonctions régulations	Principes	Facteurs	Description Abiotique (aB) Biotique (B) Adaptabilité temporelle (A)
Lumière *Se protéger, filtrer, transmettre*	Réfléchir Absorber Diffuser Transmettre	*Variation temporelle* *Macro-géométrie* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Destruction de l'entrée quand les petits sont en âge de voler. (B) (A) • Lumière non passante, opacité quasi-totale du nid (aB)
Chaleur *Se protéger, filtrer, transmettre, stocker*	Stockage latent / sensible Conduction Convection Radiation / rayonnement Changement de phase (évaporation)	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement*	• Inertie thermique terre (aB) • Facteur biotique interne au système avec présence du fournier (relations intraspécifiques) (B)
Air *Filtrer, Mettre en mouvement, transmettre, stocker*	Diffusion Convection	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume*	• Convection assurée par forme -> renouvellement d'air ? (aB) • Etanche à l'air (aB)
Eau ***Se protéger, transmettre, stocker***	Condensation Diffusion Action Gravitaire Action Capillaire Écoulement Sorption / Absorption	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Ratio surface-volume* *Propriété du fluide*	• Vulnérabilité à l'eau si pluies intenses ? (A) • Bonne gestion du taux d'humidité (aB)
Acoustique  *Isoler* *Absorber*	Absorption Réflexion Transmission	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide*	• Loi de la masse (aB)
Structure  ***Stabilité*** ***Solidité***	Absorber Transmettre	*Macro-géométrie* *Variation temporelle* *États de surfaces* *Composition de la matière* *Agencement de la matière* *Mouvement* *Propriété du fluide* *Propriété de l'onde mécanique*	• Fragilité sismique (effet de tremblements) (aB) • Rigidité et forme intéressante. (aB) • Quand les petits apprennent à voler, cassent entrée pour pouvoir entrer/sortir. (A) (B) • Maintenance du nid. (A) (B)  • Les oiseaux s'accumulent (jusqu'à 11) à côté des anciens. (B)

D'après la littérature, nous pouvons lors du processus d'idéation observer plusieurs niveaux de bio-inspiration. Selon (Benyus 2012), le premier niveau est l'imitation de la forme naturelle, comme s'inspirer de la nano-structuration des feuilles de lotus pour obtenir une surface hydrophobe. Le second est l'inspiration des processus naturels, telle que s'inspirer de la formation du verre autour des algues diatomées à température et pression ambiante pour faire de la chimie douce. Enfin, le dernier niveau est l'inspiration des écosystèmes. (Badarnah 2017) classe quant à elle les inspirations biomimétiques selon les aspects physiologiques, morphologiques et comportementaux du vivant (d'après (Louw et Longman 1982)) qu'elle sous-classe ensuite selon une inspiration de forme, de structure, ou de processus. Enfin, (Pedersen Zari 2007) propose 3 niveaux d'imitation qui semblent être un bon compromis entre les deux précédentes approches; l'inspiration de l'organisme (une partie ou le tout d'un être vivant), de son comportement, et d'un écosystème. Ces trois niveaux ont 5 niveaux de dimensions additionnelles : la forme (*stricto sensu*), le matériau (exosquelette, matière), la construction (croissance, organisation), le processus (fonctionnement), et la fonction (rôle).

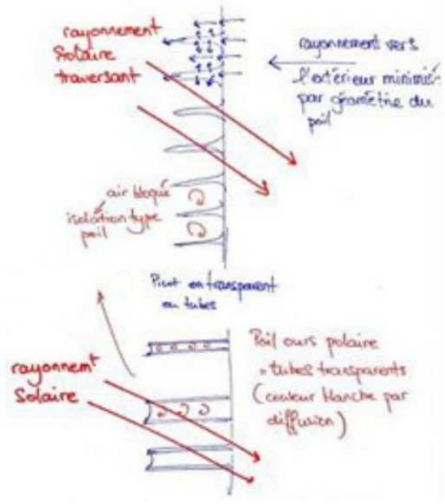
Les idées proposées lors de l'atelier n°1 sont recensées dans le Tableau B.2.

Tableau B.2 - Principes bio-inspirés proposés à l'issu de l'atelier n° 1.

Inspiration	**Concept proposé**	**Fonction**	**Inspiration (Pedersen Zari 2007)**
Cône de pin : Régulation des écailles en fonction du taux d'humidité (1)	Mur végétal intelligent contenant des poches s'ouvrant et se fermant à la manière du cône de pin (Figure B.1.3).	Chaleur Eau	Comportement (Processus)
	Système de très petites ouvertures dans l'enveloppe fermées par actionneurs bilames thermosensibles (Figure B.1.4).	Chaleur	
	Mur végétalisé respirant (Figure B.1.2).	Eau Chaleur	Ecosystème (Processus)
Microcèbe : Sortie de torpeur du microcèbe grâce aux graisses brunes qui produisent de la chaleur (2)	Stockage de chaleur et relargage dans les parois quand nécessaire	Chaleur	Organisme (Processus)
Ours polaire : Concentration des rayons dans les poils (fibre optique) et limitation des rayonnements vers l'extérieur.	Stockage de chaleur et relargage dans les parois quand nécessaire (Figure B.1.1). Apport lumineux assuré par les fibres**.**	Chaleur Lumière	Organisme (Matériau)
Fourmi argentée : Réflexion des rayons pour de la thermorégulation via ses poils (structure particulière).	Paroi/toiture qui réfléchit d'un côté ou de l'autre selon la course du soleil (hiver/été) permettant un apport chaleur et lumière dans l'habitat ou vers l'extérieur.	Chaleur Lumière	Organisme (Matériau, Fonction)
	Volets rotatifs multifaces avec propriétés émissives différentes	Chaleur Lumière	Organisme (Forme & matériau)

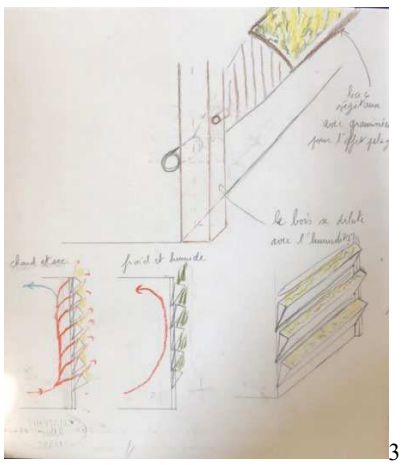
Doryphore : Forme arrondie du doryphore pour aérodynamisme.	Inspiration structurale pour une tente d'urgence résistants aux rafales de vents (Figure B.1.5).	Structure	Organisme (Forme)
Morpho : Chitine sur ses écailles apportant sa souplesse, résistance, hydrophobie, et propriétés repoussant les rayons IR au-delà d'une certaine température.	Maillage en chitine en seconde peau sur une enveloppe adaptable aux besoins usagers : ouverture/fermeture du maillage par tension/déformation de la membrane (par des points d'accroche).	Chaleur Air Eau Lumière	Organisme (Matériau, Fonction)
Nid de frelon : Stratégie de refroidissement par évaporation en distribuant partout dans la structure de l'eau par les frelons.	Cavités dans la paroi côté intérieur alimentées en eau pour refroidissement par évaporation. Trous dans l'épaisseur de la paroi permettant la respiration et un gradient de pression de vapeur.	Chaleur Air Eau	Comportement & Ecosystème (Processus)
Ecaille cornée : Stratégie de refroidissement du lézard par changement de couleur en modifiant l'organisation des nanocristaux dans ses couches tégumentaires et superposition de ses écailles les unes sur les autres (pangolin).	Protection solaire en bardage. Possibilité d'orienter les éléments selon la course solaire, de stocker de l'eau pour refroidissement par évaporation, et de réfléchir le proche IR par superposition de couches (Figure B.1.6).	Chaleur Air Eau	Organisme (Construction & Processus)

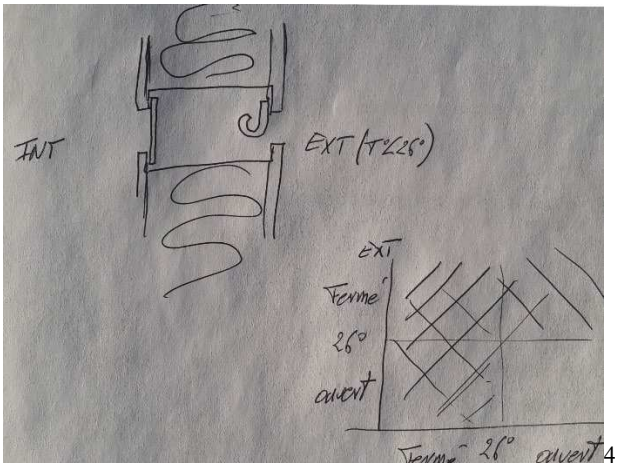
La Figure B.1 présente quelques croquis proposés pour décrire les concepts.



1

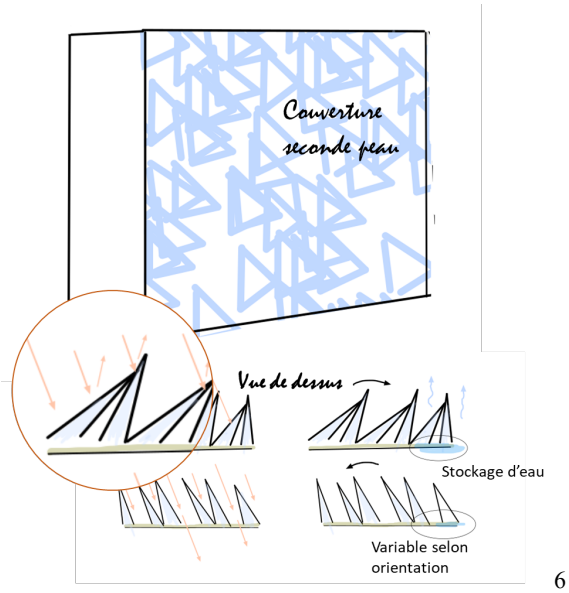
2


3



4

5



6

Figure B.1 - Quelques croquis des participants de l'atelier n°1.

B.2. Atelier n°2

Les outils proposés aux participants lors de cet atelier sont les fiches de référencement déjà proposées en atelier n°1, le tableur contenant près de 100 stratégies et fonctions de 50 constructions animales, et une fiche de référencement alternative. Celle-ci, dont le format diffère un peu des fiches de référencement déjà créées, décrit les chiens de prairie et leur terrier. Elle a été proposée aux concepteurs pour permettre une comparaison avec le format du tableur (décrivant également le terrier du chien de prairie), et le format initial des fiches, jugé trop dense par les participants lors de l'atelier n°1.

Cette fiche est fournie dans les suivantes.

BURROWS OF PRAIRIE DOGS

SPECIES INFORMATION: Prairie dog - *Cynomys*

CLASSIFICATION
Animal class: mammal
Animal order: rodent
ORGANISM endotherm

HEAT — CHAMBERS

Spatial variation in the thermoregulatory benefits (altitude)
Prairie dog adapt their altitude (move down and up) for optimum temperature (low altitude for juveniles for heat)
Decay of matter for heat increase
Prairie dogs put vegetal fibers in dormitories for decay
Insulation with collected materials
Prairie dogs put matter in dormitories for heat insulation
Snuggle for lower heat exchange
(Number users / space volume) ratio
Choice of number of individuals in one room

AIR — OPENINGS AND TUNNELS

Ventilation created by pressure difference between openings
Ventilation of the borrows through the tunnels [Bernouilli Law]

STRUCTURE — ENVELOPE

Use of pre-existing cavities from previous construction
Tunnels sometimes burrowed along rotten roots for ease and solidity
Fractal pattern of burrow for structural properties ?
Soil not too sandy (will collapse) nor clayey (to humid)

WATER — OPENINGS AND TUNNELS

Protection from flooding with draining tunnels at bottom of construction
Protection from flooding with dome
The dome redirects the rain, only little water enters the burrow

FOOD/CULTURE — ENVELOPE

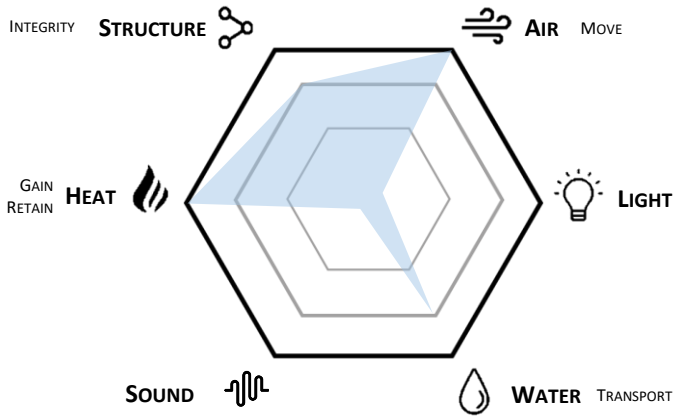
Waste of the burrow used for soil quality (good nutrients)
Prairie dogs store fecal matter for decay
Choice for food growth
Prairie dogs settle where seeds and vegetation are available

INTRUDERS — OPENINGS AND CIRCULATION AREAS

Concealed emergency exit
Prairie dog keep plugged emergency exit, which can easily be opened from the inside of the burrow
Filter users by size of circulation (biotic protection)
Prairie dogs reduce diameters with decreasing altitude or build dead ends

COMMUNICATION — OPENINGS

Visual marker at entrance for signage
Prairie dogs build domes as entrance signage



BURROWS OF PRAIRIE DOGS

SPECIES INFORMATION: Prairie dog - *Cynomys*

CLASSIFICATION
Animal class: mammal
Animal order: rodent
ORGANISM endotherm

REGULATION FACTORS

HEAT

CHAMBERS

GAIN

convection
Spatial variation in the thermoregulatory benefits (altitude)

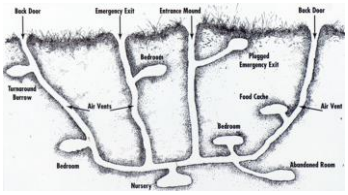
conduction
Prairie dog adapt their altitude (move down and up) for optimum temperature (low altitude for juveniles for heat)

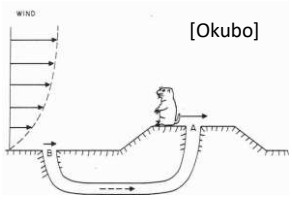
metabolic rate
Decay of matter for heat increase
Prairie dogs put vegetal fibers in dormitories for decay

RETAIN

conduction
Insulation with collected materials
Prairie dogs put matter in dormitories for heat insulation

convection
Snuggle for lower heat exchange
(Number users / space volume) ratio
Choice of number of individuals in one room





[Okubo]

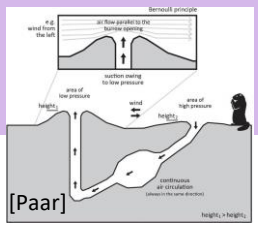
AIR

OPENINGS AND TUNNELS

MOVE

Pressure difference

Ventilation created by pressure difference between openings
Ventilation of the borrows through the tunnels [Bernouilli Law]



[Paar]

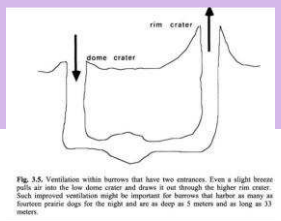


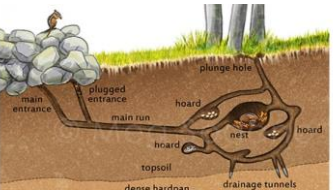
Fig. 3.5. Ventilation within burrows that have two entrances. Even a slight breeze pulls air into the low dome crater and draws it out through the higher rim crater. Such improved ventilation might be important for burrows that harbor as many as fourteen prairie dogs for the night and are as deep as 5 meters and as long as 33 meters.

STRUCTURE

PHYSICAL INTEGRITY

ENVELOPE

Use of pre-existing cavities from previous construction
Tunnels sometimes burrowed along rotten roots for ease and solidity
Fractal pattern of burrow for structural properties ?
Soil not too sandy (will collapse) nor clayey (to humid)



WATER

OPENINGS AND TUNNELS

TRANSPORT

Gravity action

Protection from flooding with draining tunnels at bottom of construction
Protection from flooding with dome
The dome redirects the rain, only little water enters the burrow

BURROWS OF PRAIRIE DOGS

SPECIES INFORMATION: Prairie dog - *Cynomys*

CLASSIFICATION
Animal class: mammal
Animal order: rodent
ORGANISM endotherm

REGULATION FACTORS

INTRUDERS

OPENINGS AND CIRCULATION AREAS

Concealed emergency exit
Prairie dog keep plugged emergency exit, which can easily be opened from the inside of the burrow
Filter users by size of circulation (biotic protection)
Prairie dogs reduce diameters with decreasing altitude or build dead ends

ENVELOPE

Waste of the burrow used for soil quality (good nutrients)
Prairie dogs store fecal matter for decay
Choice for food growth
Prairie dogs settle where seeds and vegetation are available

FOOD/ CULTURE

COMMUNICATION

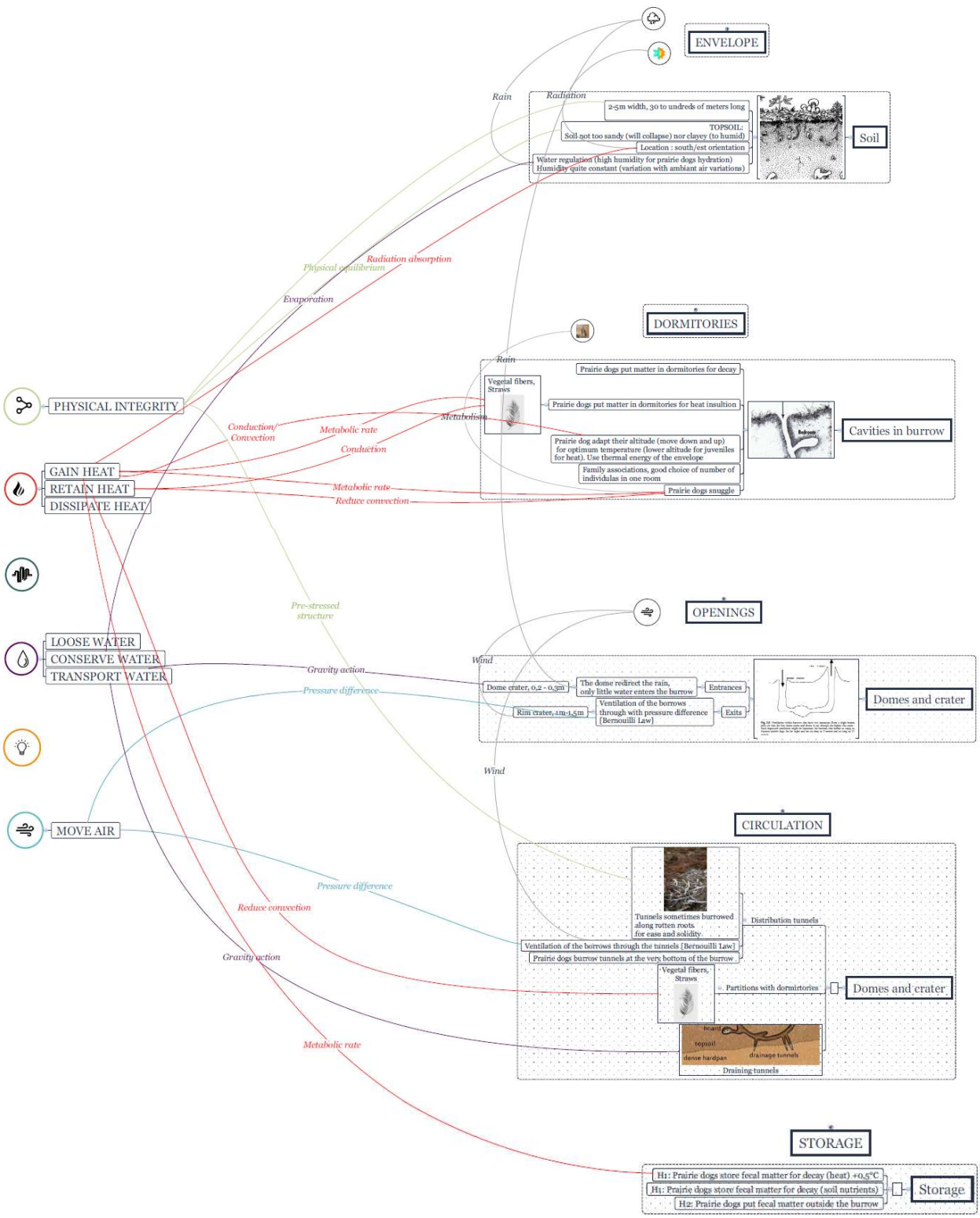
OPENINGS

Visual marker at entrance for signage
Prairie dogs build domes as entrance signage

BURROWS OF PRAIRIE DOGS

SPECIES INFORMATION: Prairie dog - *Cynomys*

CLASSIFICATION
Animal class: mammal
Animal order: rodent
ORGANISM endotherm



Les participants ont eu deux cas d'étude sur lesquels travailler :

- L'extension du bâtiment de NOBATEK/INEF4 à Anglet, qui nécessite des questions de qualité de l'air, une faible emprise sur la parcelle, et une gestion du ruissellement de l'eau ;
- Un bâtiment résilient à l'eau, qui peut gérer les rues, stocker l'eau ruisselante, et la filtrer. Le concours pour le Pôle du Biomimétisme Marin, qui s'est déroulé en 2019 et a été gagné par l'agence Patrick Arotcharen architecte, a servi d'appui pour le cahier des charges.

Pour répondre aux cahiers des charges proposés, il leur a été demandé d'explorer la base de données des constructions animales construite, et telle que présentée en Figure B.3 (page suivante). Un grand nombre des cellules excel s'accompagne d'informations additionnelles, telles que des images, schéma, ou sources bibliographiques, par simple déplacement du curseur. Un tri des données proposée, ou une recherche par mot clés, est également possible en cliquant sur l'une des catégories en titre de colonne : « Matter », « Physical processes », etc. La Figure B.4 est un extrait d'une arborescence créée en amont de l'atelier et distribuée aux participants. Les mots de couleur bleue sont des termes présents dans la BDD de Excel. Ainsi, pour répondre à une problématique liée à l'eau, il est possible de présélectionner grâce à l'arborescence les termes les plus pertinents sur le sujet, et de les spécifier sur la BDD pour un premier tri de modèles biologiques en lien avec le cahier des charges.

L'atelier étant plus court que les autres, les participants ont eu des difficultés à proposer des principes pour répondre aux cas d'étude. Un groupe de travail sur le bâtiment résilient à l'eau, au sein duquel une participante avait assisté et contribué à l'atelier n°1, a proposé un concept basé sur les frelons *Vespa Velutina* et leurs constructions, pour profiter de la teneur en eau du sol. Un matériau à haute capillarité pourrait récupérer une partie de l'eau, et profiter d'un phénomène de refroidissement évaporatif l'été (Figure B.2).

Figure B.2 - Principe proposé à l'issu de l'atelier (nid de V*espa* thermorégulé par chaleur latente en plaçant de l'eau devant les cellules de couvées, et absorption de cette eau par les larves par capillarité).

Le Tableau B2 propose une comparaison des ateliers n°1 et n°2.

Tableau B.2 – Comparaison entre les deux premiers ateliers.

	Atelier n°1	Atelier n°2
Expérience d'utilisation des outils proposés	▪ BDD longue à s'approprier, malgré un nombre de fiches limité ▪ Fiches trop denses	▪ Assistance nécessaire pour l'utilisation du tableur ▪ Richesse de l'information appréciée dans le tableur ▪ Fiche alternative appréciée (plus que les fiches de référencement de l'atelier n°1). Vue comme
Cahier des charges	▪ Outils visuels jugés utiles pour la sélection de modèles (diagrammes)	▪ Multitude de points d'entrées appréciée
Génération de concepts	▪ Génération de multiples concepts	▪ 1 concept émis

La démarche à suivre suggérée par les concepteurs comme étant la plus adaptée et intuitive pour répondre à un cahier des charges donné est la suivante :

- Utilisation de l'arborescence pour la reformulation du problème et la mise en avant de mots-clés à chercher dans le tableur
- Recherche dans le tableur à l'aide de ces mots-clés de stratégies et fonctions pertinentes
- Présélection de quelques espèces et consultation de fiches (format alternatif, voir la fiche du Chien de prairie) pour un balayage des grandes fonctions et stratégies.

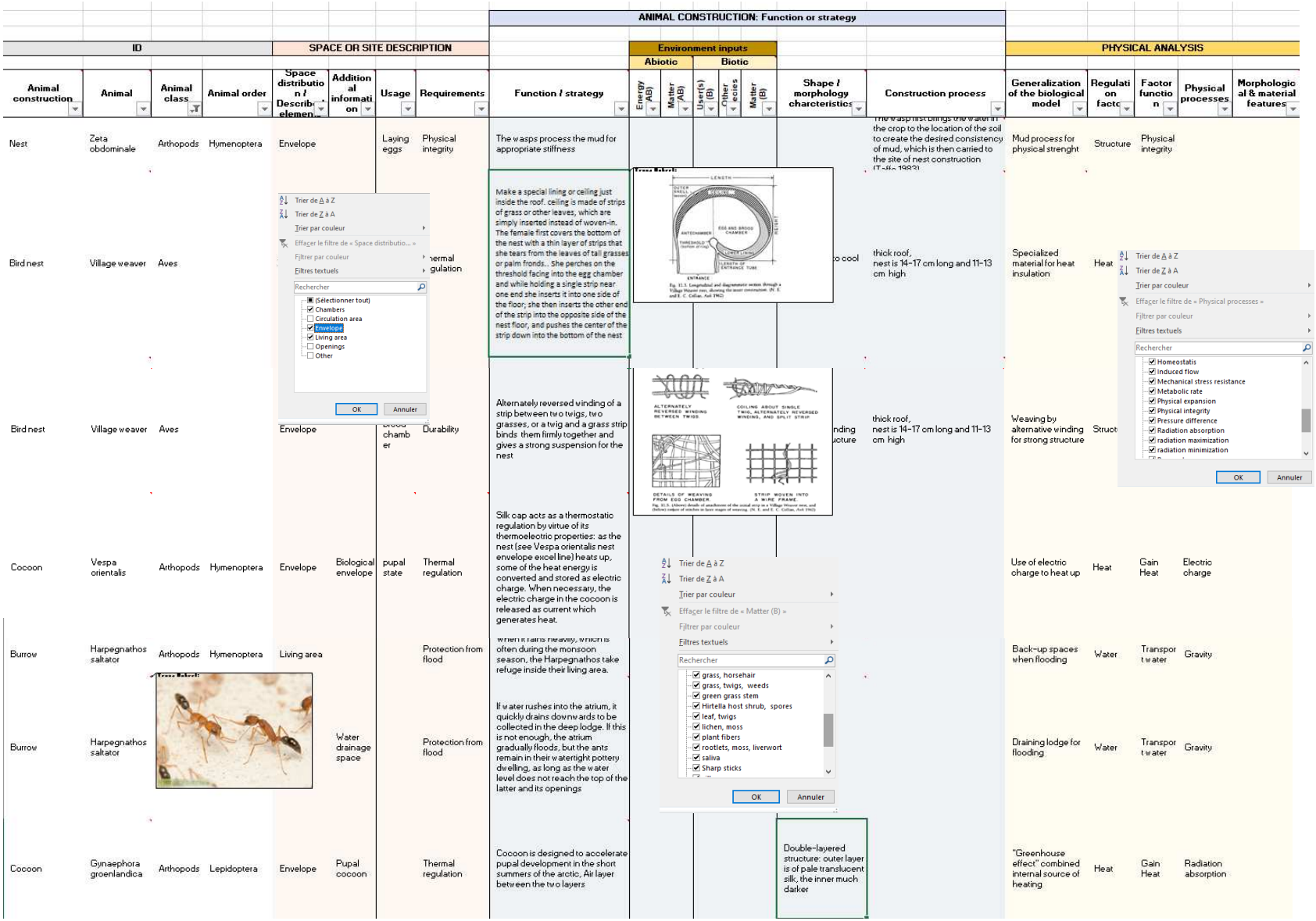


Figure B.3 – Base de données proposée aux participants sur les constructions animales.

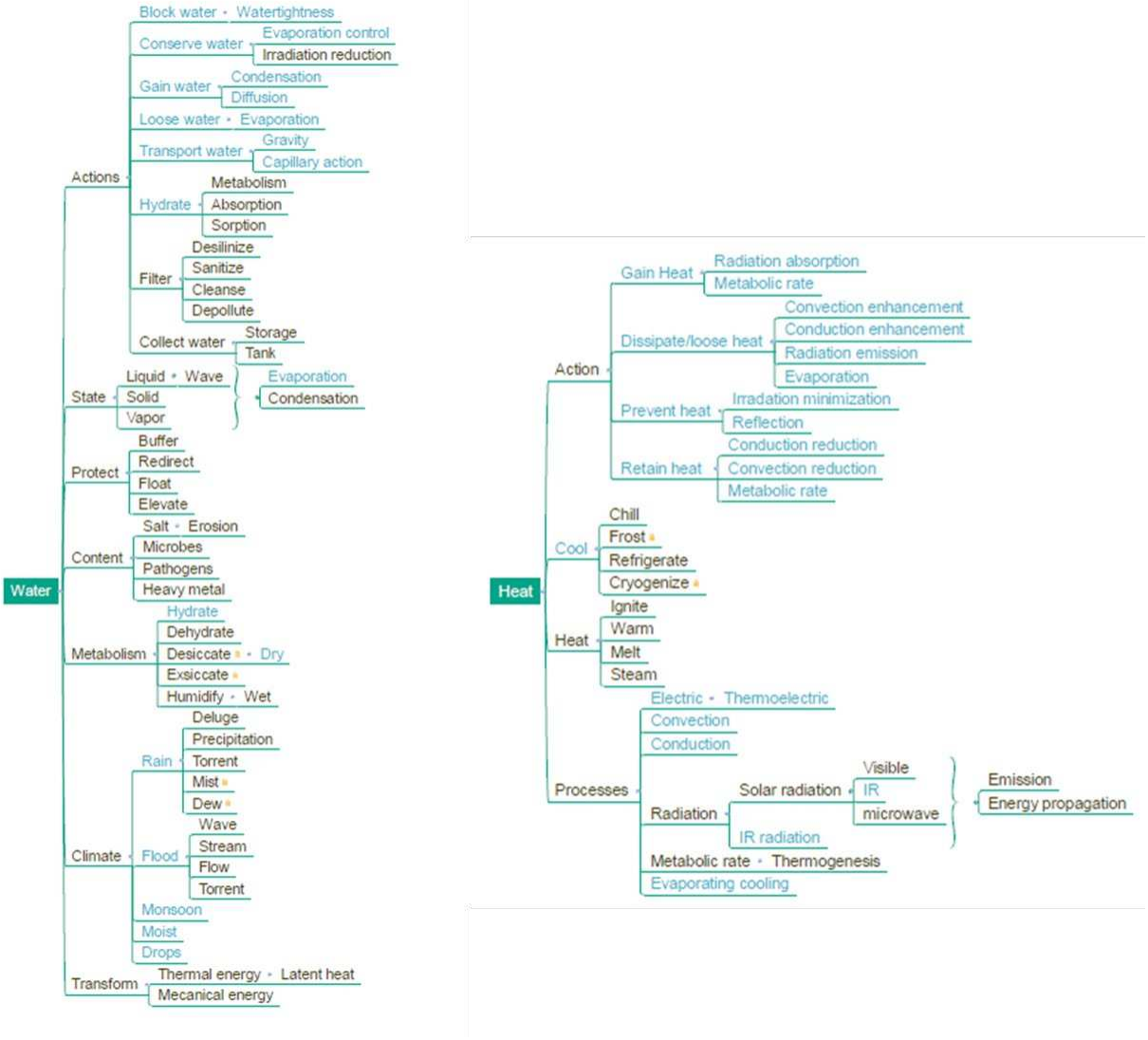


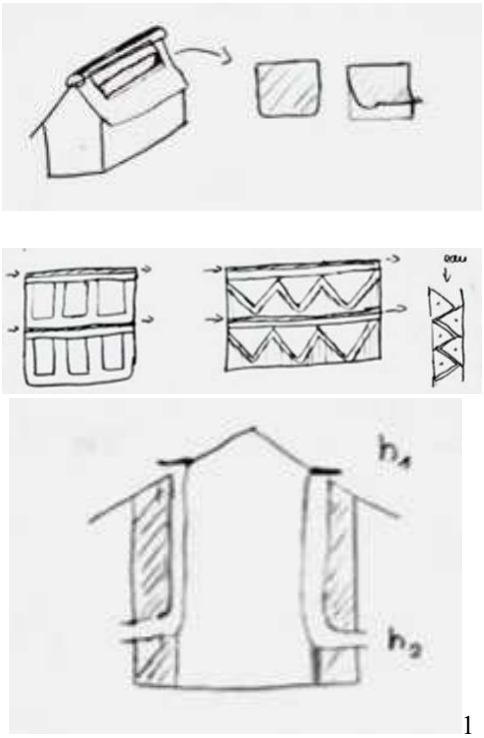
Figure B.4 – Arborescence extraite de la base de données proposée aux participants sur les constructions animales.

B.3. Atelier n°3

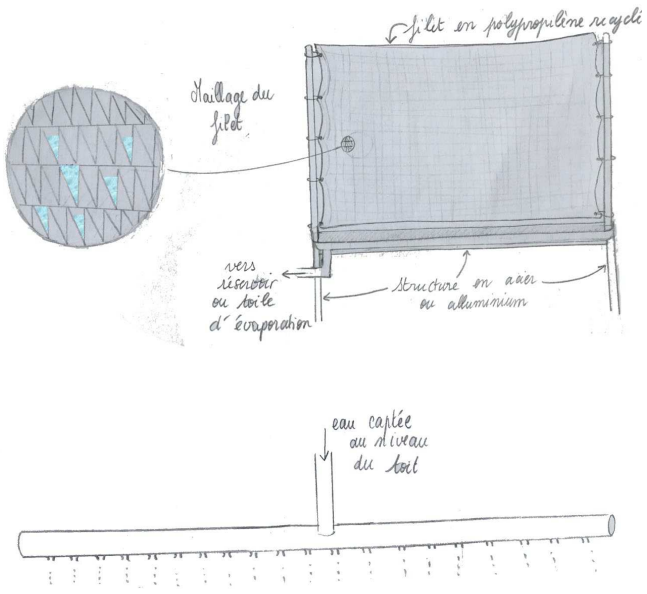
Quelques idées proposées lors de l'atelier n°2 sont recensées dans le Tableau B.3.

Tableau B.3 - Principes bio-inspirés proposés à l'issu de l'atelier n° 3.

Inspiration	Principe bio-inspiré	Applications/contraintes
Terrier des chiens de prairie : ventilation naturelle par effet venturi	Système de conduit verticaux pour distribution d'air à plusieurs étages + tube de venturi pour favoriser l'aspiration.	Matériaux tuyères. Dimensionnement Venturi. Nombres de conduits. Distribution des robinets.
Scarabée de Namibie : Condensation de brouillard sur carapace hydrophile et hydrophobe. **Araignée :** Captation du brouillard ambiant et optimisation de la surface de captage	Toile verticale condensatrice d'eau avec récupérateur vers un réservoir. Système de tirage thermique horizontal placé derrière toile pour rafraichissement (Figure .3.2).	Liste de l'existant (filets verticaux, carapaces sur les toits de maison) Matériaux polypropylène recyclé. Réflexion d'implantation et gestion d'eau par algorithme de gestion d'ouverture des vannes.
Cône de pin	Ouvertures météo-sensibles sur toiture pour refroidissement par tirage thermique d'une maison (Figure .3.1).	Matériaux (bio-composites à base de lin, vérin thermostatique). Intégration à la toiture (réflexion sur forme et écoulement de l'eau).



1



2

Figure B.5 - Quelques croquis des participants de l'atelier n°3.

C. Fabrication d'un prototype déformable

*Annexe de la partie **3.2.2.1 Premières versions.***

Les caoutchoucs testés ont des épaisseurs variées (3 à 5 mm). Le caoutchouc de naturel para-blond retenu pour les premières versions de prototype déformables a une épaisseur de 3 mm. Pour éviter son pincement lors de l'installation des bases, quatre entretoises aluminium de 4 mm sont placées entre les plaques d'aluminium. Le tout est serré à l'aide de vis traversant les plaques d'aluminium et les entretoises.

Figure C.1 - Les différents caoutchoucs testés.

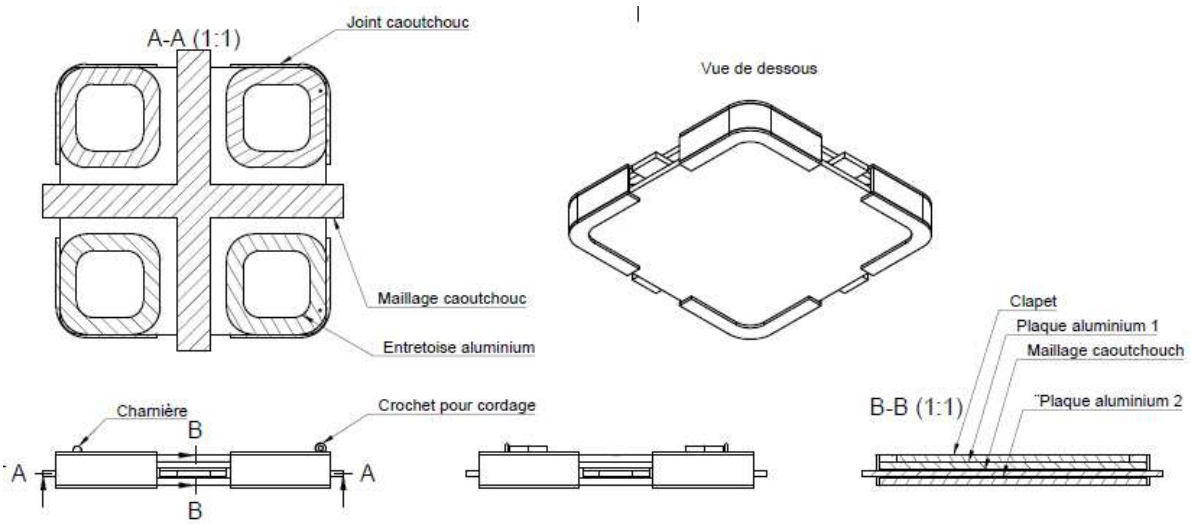
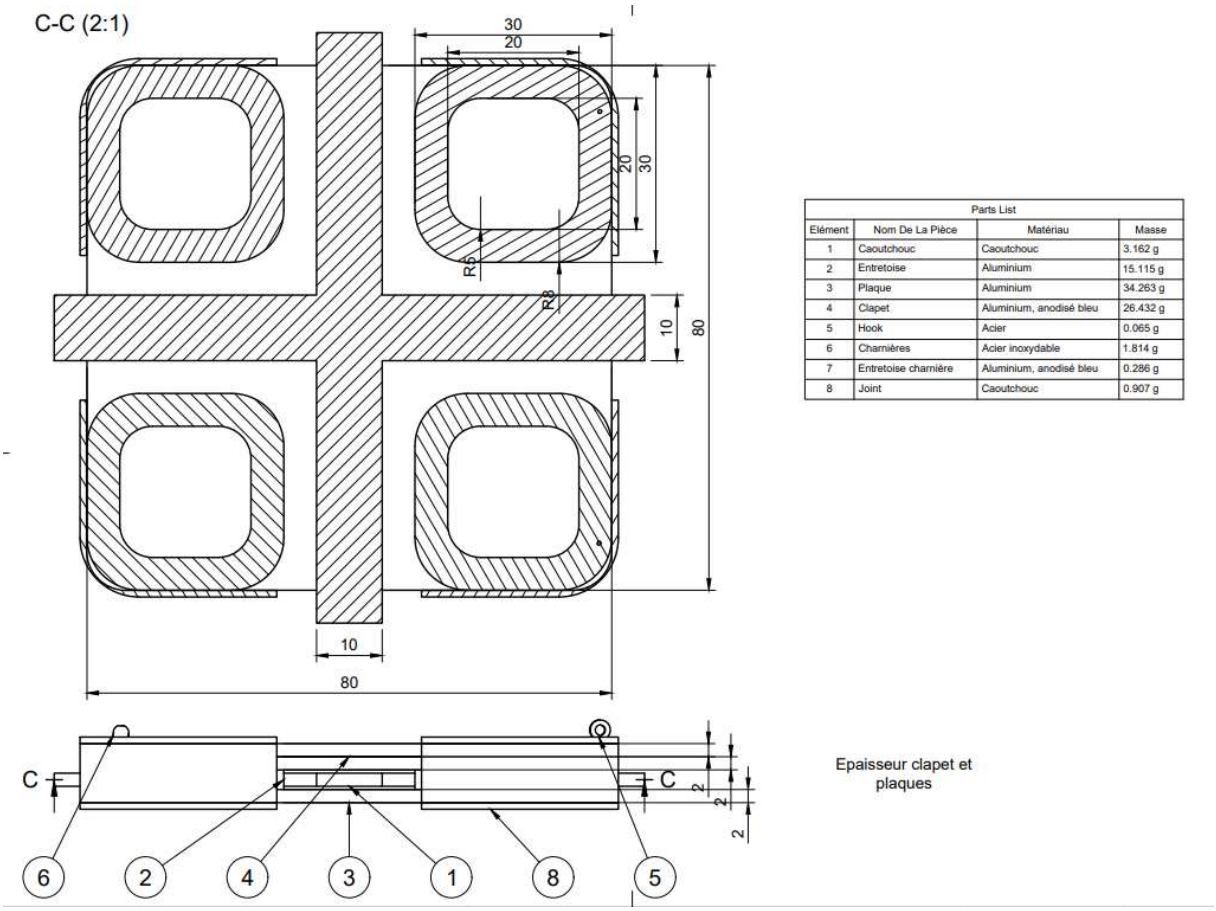


Figure C.2 - Plans d'un élément carré sandwich (réalisé sous Fusion 360).



Parts List			
Elément	Nom De La Pièce	Matériau	Masse
1	Caoutchouc	Caoutchouc	3.162 g
2	Entretoise	Aluminium	15.115 g
3	Plaque	Aluminium	34.263 g
4	Clapet	Aluminium, anodisé bleu	26.432 g
5	Hook	Acier	0.065 g
6	Charnières	Acier inoxydable	1.814 g
7	Entretoise charnière	Aluminium, anodisé bleu	0.286 g
8	Joint	Caoutchouc	0.907 g

Figure C.3 - Dimensions des éléments carrés et des entretoises.

Figure C.4 - Fabrication et montage du prototype.

Figure C.5 - Montage des éléments de base et des clapets avec du fil transparent.

D. Présentation du banc d'absorption solaire

*Annexe de la partie **3.3.2 Tests en laboratoire**.*

Le banc solaire utilisé est présenté sur la Figure D.1.

Figure D.1 - Caisse isolée avec ventilateur tangentiel. Echantillons de 100 mm x 100 mm.

La détermination du coefficient d'absorption solaire se fait en régime stationnaire à partir d'un bilan énergétique sur l'échantillon, en prenant en compte les échanges convectifs avec l'air et les échanges radiatifs avec le vitrage. Notons que l'échantillon est positionné sur un isolant, les échanges conductifs sont donc négligeables.

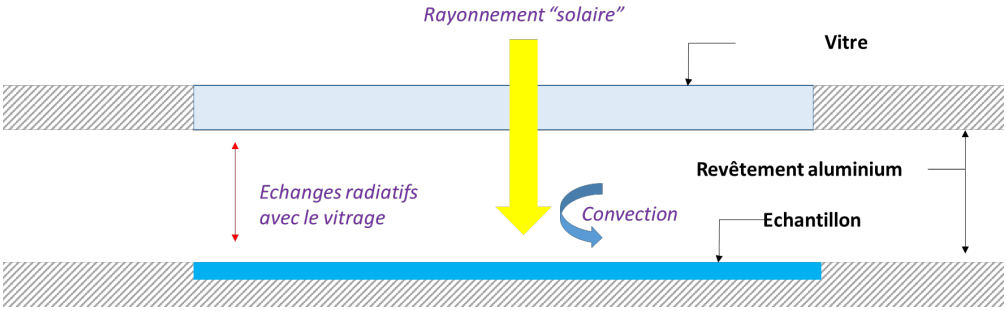


Figure D.2 - Représentation des phénomènes physiques dans le banc d'essai.

Connaissant les températures de l'échantillon T_e, de l'air autour de celui-ci T_a et du vitrage T_v ainsi que la vitesse de l'air V_a et de l'émissivité infrarouge de l'échantillon (mesuré à l'aide d'un émissomètre), le flux rayonné par la lampe solaire I_s, le coefficient d'absorption est calculé comme suit :

$$\alpha = \frac{1}{I_s}[h_e(T_e - T_a) + \varepsilon_e \sigma(T_e^4 - T_v^4)]$$

h_e étant le coefficient d'échange convectif, calculé avec de la conductivité de l'air λ_a, de la longueur caractéristique (qui est la longueur de l'échantillon L=100 mm), le nombre de Prandtl Pr et le nombre de Reynolds Re_L.

$$h_e = \frac{\lambda_a}{L} 0.664\, Pr^{1/3}\, Re_L^{1/2}$$

$$Re_L = \frac{V\,L}{v}, \quad \mathrm{Pr} = \frac{\mu_a\, C_{p,a}}{\lambda_a}$$

Notons que cette approche ne prend pas en compte les échanges radiatifs de la boîte. Pour un modèle plus juste, il faudrait intégrer le rayonnement IR émis par l'échantillon, le vitrage et le revêtement aluminium, en prenant en compte les facteurs de vue. On devrait avoir pour flux net radiatif $\varphi_{e,IR,net}$ de l'échantillon avec les surfaces i :

$$\varphi_{e,IR,net} = A_e \sigma [\varepsilon_e T_e^4 - \sum_{i=0}^{n} \varepsilon_i F_{ei} T_i^4]$$

avec A_e la surface de l'échantillon et F_{ei} les facteurs de vue respectifs de l'échantillon vers les surfaces avec lesquelles il y a échange radiatif. Cependant, ce modèle nécessite les températures de surface du revêtement aluminium, qui n'ont pas été mesurées lors de notre expérimentation.

E. Fluxmètres à gradient tangentiel

*Annexe de la partie **3.3.3.2.6 Fluxmètres thermiques.***

Les fluxmètres thermiques traditionnels sont conçus pour la mesure des échanges par conduction thermique dans les milieux solides. La mesure d'un flux thermique est habituellement ramenée à la mesure d'une différence de température entre les faces d'une paroi auxiliaire. Cet écart de température, mesuré par une thermopile uniformément distribuée sur la surface du capteur, est représentatif de la densité locale de flux thermique (moyennée sur la surface du capteur). La sensibilité déterminée par étalonnage est la tension de sortie obtenue pour une densité de flux unitaire. Elle s'exprime en ($\mu V.W^{-1}.m^{-2}$). La sensibilité caractérise la performance d'un fluxmètre thermique. Une autre caractéristique importante est l'épaisseur du capteur puisque la perturbation introduite sur la densité de flux à mesurer dépend essentiellement de la résistance thermique en régime permanent, de la capacité thermique en régime transitoire et que ces quantités sont toutes deux directement proportionnelles à l'épaisseur du capteur.

Le fluxmètre thermique à gradient tangentiel a été conçu pour avoir à la fois une sensibilité élevée et une épaisseur réduite à quelques dixièmes de millimètre. Un autre avantage est dû essentiellement au mode de fabrication qui permet la réalisation industrielle de capteurs souples de grandes surfaces (plusieurs dm^2) tout en maintenant la qualité obtenue avec de petites dimensions (quelques cm^2).

F. Graphes additionnels des mesures réalisées sur boîte test

*Annexe de la partie **3.3.4.7.1 Entre les couleurs.***

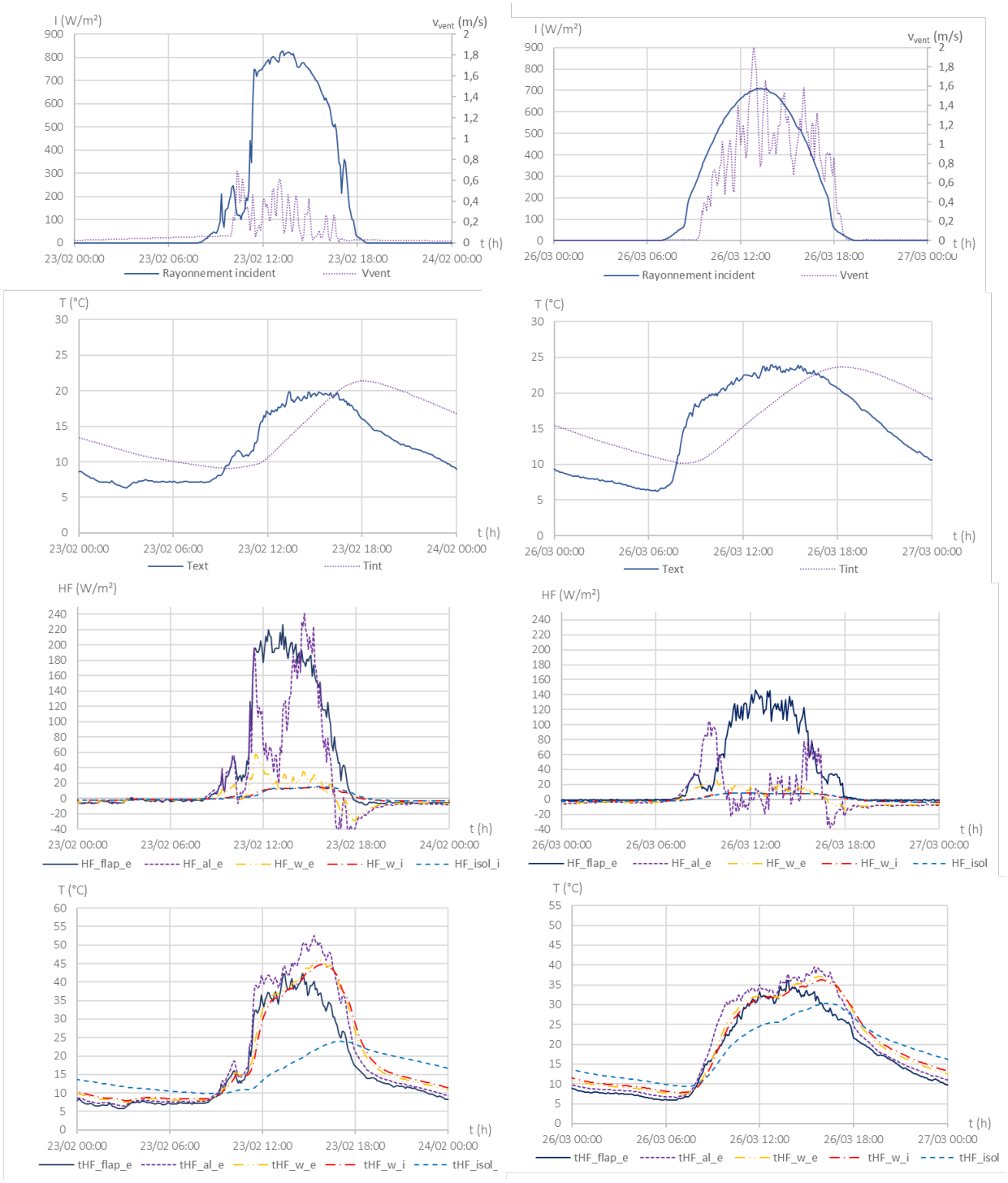


Figure E - De haut en bas : rayonnement solaire incident et vitesse du vent, températures intérieures et extérieures, densité de flux et températures le long de la paroi pour deux journées des séquences n°2 et n°6.