L'ARCHITECTURE HYBRIDE ET LÉGÈRE EN BAMBOU

LEGRAND Charles
Master Science of Architecture, EPFL
© 2017/2018

Sous la direction de Jeffrey Huang et Peter Ortner

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Remerciements à Jeffrey Huang et Peter Ortner pour leur suivi actif, leur implication et leurs conseils dans l'élaboration de cet énoncé théorique.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction p.6

2. La « *légèreté* » comme clé. p.9

2.1. La légèreté en littérature et philosophie, l'exemple d'Italo Calvino comme inspiration pour l'architecture. p.9

2.1.1. Le poids de la réalité
2.1.2. Le mythe de Persée
2.1.3. L'attitude du poète Guido Cavalcanti
2.1.4. La Science comme approche de légèreté

2.2. La légèreté dans l'Histoire de l'architecture « savante ». p.15

2.2.1. De la finesse du Gothique à la transparence des Modernes.
2.2.2. La légèreté comme mobilité, adaptabilité et éphémérité.
2.2.3. La légèreté visuelle et la technologie à l'ère contemporaine.
2.2.4. Un retour actuel à une légèreté « vraie » et écologique.

2.3. La légèreté économique, une réponse efficace à la crise environnementale actuelle. p.29

2.3.1. Le principe de libération du sol.
2.3.2. Les principes de l'économie des moyens et d'énergie maximale mis en œuvre.
2.3.3. Le principe de l'appropriation architecturale.
2.3.4. Le principe de «l'ordinaire-extra».

Liste des figures p.36

2.4. Conclusion sur la légèreté comme «clé». p.37

3. L'approche paramétrique, un cheminement «*Hightech*» vers une architecture légère. p.39

3.1. Une approche théorique comme nouvelle manière de penser l'architecture. p.39

3.1.1. Les fondements du « Generative Design ».
3.1.2. La définition du « design space ».
3.1.3. L'optimisation.
3.1.4. La définition de mesures.

3.2. La légèreté structurelle: introduction à Grasshopper et Karamba. p.55

3.2.1. L'univers de Grasshopper
3.2.2. L'approche technique et structurelle avec Karamba
3.2.3. Une analogie avec la pensée d'Italo Calvino.

Liste des figures p.60

3.3. Conclusion sur l'approche paramétrique «high tech». p.61

4. L'approche vernaculaire, un cheminement *«Low tech»* vers une architecture légère. p.63

4.1. Les structures légères vernaculaires : reflet d'un mode de vie et d'un savoir faire. p.63

4.1.1. La définition du terme « vernaculaire »
4.1.2. L'approche et l'architecture ***«*** vernaculaire ***».***
4.1.3. Des exemples de structures vernaculaires légères.

4.2. Le bambou, un matériau léger et ancestral tourné vers l'avenir. p.75

4.2.1. Nature et contexte.
4.2.2. Propriétés mécaniques, environnementales et traitements.
4.2.3. Types de combinaisons et systèmes constructifs.

4.3. Des protagonistes en marche vers un nouveau langage architectural ? p.95

4.3.1. L'approche vernaculaire au service d'une pluralité de formes structurelles.
4.3.2. L'approche de Simón Vélez.

4.3.3. L'approche de Vo Trong Nghia.

4.4. Conclusion sur l'approche vernaculaire «low tech». p.107

Liste des figures p.108

5. L'approche paramétrique combinée à l'approche vernaculaire : une architecture hybride et légère en bambou. p.111

5.1. Hybridation dans la pratique. p.111

5.1.1. De la génétique à l'architecture.
5.1.2. Deux approches différentes de même nature.

5.2. Les diverses possibilités d'hybridité. p.113

5.2.1. Les critères d'évaluation pour l'hybridité.
5.2.2. Hybridité à dominance « Low Tech ».
5.2.3. Hybridité à dominance **«** High Tech ***».***
5.2.4. Hybridité à équivalence.
5.2.5. La limite de l'hybridité.

5.3. L'approche hybride choisie pour le projet architectural. p.133

5.3.1. Le respect du principe de la libération du sol
5.3.2. Le respect du principe de l'économie des moyens et d'énergie maximale mis en œuvre.
5.3.3. Le respect du principe de l'appropriation architecturale.
5.3.4. Le respect du principe de la contingence du lieu et de la notion «d'ordinaire extra».

Liste des figures p.142

6. Conclusion p.144

7. Annexe p.146

8. Bibliographie p.148

1. Introduction

Au cours des dernières décennies, la question de la crise environnementale et climatique a été plus que jamais au coeur des débats. La responsabilité humaine dans ces déréglements et ses impacts sur l'environnement est irréfutable. Aujourd'hui l'énergie utilisée pour la construction de nos bâtiments dans le monde représente plus d'un tiers de la consommation globale d'énergie mondiale selon le rapport annuel 2016 de l'UNEP. Cela contribue également à près d'un quart de l'émission mondiale des gaz à effets de serre. La population mondiale étant amenée à augmenter dans les prochaines décennies, cette consommation des bâtiments devrait augmenter de 50%, tout comme la surface globale de bâti au sol attendue à doubler d'ici 2050, dans la plupart des pays en voie de développement comme l'Asie, l'Afrique et l'Amérique du Sud. Dans ce contexte, les dirigeants politiques ont initié de nombreux programmes de lutte contre ce phénomène, comme par exemple le protocole de Kyoto, le Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992 ou encore, plus récemment, les Accords de Paris de la COP21 en 2015. Tous avaient pour but de réduire l'emprunte carbone de nos bâtiments et leur implantation sur le territoire. Outre ces actions d'ampleur internationale, il est du devoir de la nouvelle génération d'architectes et d'ingénieurs d'adopter une nouvelle perception sur l'architecture, en agissant de façon plus locale et écologique dans ces pays en effervescence. Des questions sur la légèreté architecturale, le temporaire, le recyclable ou encore l'usage de matériaux locaux sont des questions à encourager grandement là-bas, notamment dans le cadre de programmes publics. Le bambou, très présent dans ces zones du globe, constitue aujourd'hui un matériau d'avenir avec de nombreuses qualités capables d'apporter des solutions aux problématiques actuelles. Les constructions vernaculaires légères de ces pays ont été développées depuis des millénaires et peuvent également nous apporter des éléments de réponses. La dimension sociale et identitaire de ces constructions en bambou est à revaloriser dans l'architecture de demain. En effet, nous pouvons constater qu'aujourd'hui, dans ces pays en plein boom économique, l'architecture contemporaine occidentale a pris le dessus, notamment dans les grandes villes, en véhiculant une architecture normalisée, décontextualisée et lisse. Au contraire, l'architecture de demain dans ces pays doit pouvoir retrouver une identité et des valeurs qui témoignent de leur passé sans pour autant exclure les progrès technologiques. Effectivement, depuis ces dernières décennies, paradoxalement à ce contexte de crise, les progrès technologiques n'ont jamais été aussi importants et véhiculés dans le monde. Les nouvelles technologies de pointe ont su toucher tous les secteurs d'activités, notamment l'architecture contemporaine et sa mise en oeuvre. Les logiciels de conception assistée et d'outils paramétriques font de plus en plus leur apparition dans les agences d'architecture du monde entier et

permettent de pousser la conception architecturale de façon toujours plus élaborée et précise. La question que nous pouvons donc poser est la suivante:

Comment la combinaison d'une approche paramétrique et vernaculaire peut-elle conduire à une nouvelle architecture hybride en bambou, légère et ouverte sur le futur?

Afin de répondre à cette question, nous développerons tout d'abord la notion centrale de «*légèreté*». Nous tenterons de comprendre comment elle est devenue une notion clé dans de nombreux domaines de pensée, dont l'architecture, et quels enseignements sociaux et environnementaux elle peut nous apporter pour le futur. Nous parlerons ensuite des deux approches possibles pour développer une architecture légère. La première est l'approche paramétrique comme un cheminement «*high tech*» vers la légèreté, la seconde est l'approche vernaculaire comme un cheminement cette fois-ci «*low tech*» vers la légèreté. Enfin, nous analyserons la notion d'hybridité, empruntée à la génétique, afin de comprendre les croisements possibles entre ces deux approches pour tirer partie des meilleures qualités de chacune et donner lieu à une nouvelle architecture hybride, légère, capable d'affronter les enjeux de demain.

2. La « *légèreté* » comme clé.

La légèreté est une notion présente dans de nombreux domaines et peut relever aussi bien du monde de la pensée, autrement dit de la philosophie, de l'idéologie et du spirituel, que du monde physique et visuel comme l'architecture (Fig.1). Elle est une notion qui peut alors s'exprimer à travers diverses formes architecturales. Par l'exploration de divers champs d'actions, elle nous permet d'avoir une certaine prise de recul sur notre rapport au monde et sur notre manière de vivre ou d'agir avec celui-ci pour le présent et le futur.

2.1. La légèreté en littérature et philosophie, l'exemple d'Italo Calvino comme inspiration pour l'architecture.

2.1.1. Le poids de la réalité

Si la lourdeur exprime un certain ancrage dans notre monde, une stabilité ou pérennité, la légèreté n'est pas pour autant son pur contraire. En se référant à la pensée de certains philosophes tel que Nietzsche, la légèreté devient le moyen de supporter avec plus de force et d'aisance la lourdeur qui nous pèse. En cela, elle ne constitue pas une fuite au poids de notre réalité, mais une aptitude à motiver nos actions. Italo Calvino apporte de nombreuses réponses sur la question de la légèreté dans la littérature et la philosophie, pouvant servir d'inspirations profondes pour l'architecture. Dans son livre « *Six Memos for the Next Millennium* » ce célèbre écrivain italien du 20ème siècle, dédie un chapitre complet à sa quête de légèreté notamment dans le domaine de la littérature. Comme il l'énonce « *I have tried to remove weight, sometimes from people, sometimes from heavenly bodies, sometimes from cities ; above all I have tried to remove weight from the structure of stories and from language.* »[1]

En tant qu'écrivain, il explique alors la coutume littéraire de prendre sa propre expérience du monde pour en révéler la nature dans ses textes. Cependant, de son point de vue, il existe un réel décalage entre la réalité de la vie et la volonté d'un auteur à développer une légèreté littéraire. Il prend alors conscience du poids de la vie qui pèse sur chaque individu comme il l'énonce « *I felt that the entire world was turning into stone : a slow petrification, more or less advanced depending on people and places.* »[2], à moins que l'un d'eux trouve une façon d'y échapper.

---

[1] Italo Calvino, «*Six Memos for the Next Millennium*», Harvard University Press, Massachusetts, 1988 p.1

[2] Ibidem p.2

◀ Fig.1.

Fig.2. Toshiyuki Enoki Art, «*The Quest of Medusa's Head*»

« *Perseus supports himself on the very lightest of things, the winds and the clouds [...]* »[3]

[3] Ibidem p.4

Cette vision du monde se retrouve chez Milan Kundera et son roman « *The Unbearable Lightness of Being* » à propos du poids de la Vie, non comme une vision désespérée mais comme une condition commune à nous tous. Ce poids de la Vie proviendrait alors principalement d'un ensemble de restrictions, à la fois publiques et privées, qui nous enferment de plus en plus. Tout ce que nous choisissons ou tout ce dont à quoi nous attachons de l'importance dans la vie pour sa légèreté révèlerait en vérité ce poids insupportable qui nous pèse.

« [...] *everything we choose and value in life for its lightness soon reveals its true, unbearable weight.* »[4]

2.1.2. Le mythe de Persée

Afin de mettre en évidence ce poids de la vie, il entame une comparaison entre ce dernier et le regard inévitable vers la Méduse qui transforme en pierre quiconque la regarde. La légende antique raconte que le seul ayant trouvé une façon d'échapper au sort fut Persée (Fig.2), grâce à ses sandales ailées et le reflet du regard de la Méduse sur son bouclier de bronze. Une fois la Méduse décapitée, Persée pu alors se servir de la tête comme arme efficace contre ses ennemis. La force de ce héros, selon l'auteur, a été de ne pas regarder les choses directement, non pas par refus de voir la réalité telle qu'elle est, mais au contraire en la transportant avec lui. Ce mythe devient pour l'auteur une allégorie représentant le rapport du poète au monde. Le poète ne cherche pas non plus à se défier de la réalité dans ses écrits, mais il cherche plutôt par la légèreté littéraire, un moyen de composer avec. La relation complexe entre Persée et la Méduse, dont le sang fait naître un cheval ailé, Pégase, exprime cette idée paradoxale que de la lourdeur de la pierre naît la légèreté.

Pour Italo Calvino l'attitude à adopter face à ce poids inévitable qui pèse sur l'Humanité serait celle de Persée, à savoir «*voler*». Par le terme «*voler*», il entend changer de regard et de perception sur le monde, ne pas s'emporter dans l'imaginaire et l'irrationnel mais au contraire penser avec une logique et des méthodes nouvelles de perception. Comme il l'énonce « *I think that I should fly like Perseus [...] I mean that I have to change my approach, look at the world from a different perspective, with a different logic and with fresh methods of cognition and verification.*»[5]

---

[4] Ibidem p.7

[5] Ibidem p.7

« Were I to choose an auspicious image for the new millemmium, I would choose that one : the sudden agile leap of the poet-philosopher who raises himself above the weight of the world, showing that with all his gravity he has the secret of lightness [...]»[6]

« I look to science to nourish my visions in which all heaviness disappears. »[7]

---

[6] Ibidem p.12

[7] Ibidem p.8

2.1.3. L'attitude du poète Guido Cavalcanti

Italo Calvino illustre également la notion de légèreté pour le «*nouveau millénaire*» avec une autre figure: le poète Guido Cavalcanti sautant par-dessus un muret. La notion de légèreté doit être vu comme cet élan dynamique illustrant ce lâcher-prise du langage et de la pensée qui accepte parfois de se diriger vers l'inconnu et l'inattendu. Pour l'auteur, la notion de légèreté s'accompagne dès lors d'une notion de précision et de détermination dans la manière de structurer notre pensée et de faire face à cet inattendu. Ainsi la légèreté, dans la littérature et la philosophie peut se voir de trois manières. La première s'apparente à un langage étudié qui ne paraît pas lourd. La seconde tient de l'ordre de la pensée et de la psychologie, beaucoup plus subtile et imperceptible. La troisième donne une image plus visuelle de la légèreté par l'action et le mouvement d'un individu. Le rôle essentiel de la littérature et de la philosophie serait alors cette recherche de la légèreté et du savoir comme réaction face au poids de vivre.

2.1.4. La Science comme approche de légèreté

L'auteur poursuit son essai sur la légèreté en présentant la Science comme moyen d'aborder le monde sans « *poids* ». Pour lui, le domaine scientifique tient sa légèreté de l'éphémère et de la temporalité. Cette considération est particulièrement interessante dans la mesure où l'architecture actuelle, avec le développement majeur des nouvelles technologies, tend de plus en plus vers un aspect scientifique et évolutif. L'architecture paramétrique et les méthodes de recherche empruntées aux lois naturelles en sont l'exemple frappant. Le progrès technologique incroyable de ces derniers siècles, a permis de transformer les machines massives et mécaniques en machines légères et électroniques. Néanmoins, la science informatique à la base de l'architecture que nous connaissons aujourd'hui ne peut exercer son pouvoir de légèreté avec les logiciels qu'à travers le « *poids* » des ordinateurs. Les logiciels informatiques sont les donneurs d'actions sur un travail à réaliser dans notre monde, et l'ordinateur, en tant que machine, l'opérateur de ces actions. Celles-ci peuvent évoluer et s'améliorer pour être capable de réaliser les ordres de logiciels plus complexes, c'est l'innovation.

«It is true that software can not exercise its powers of lightness except through the weight of hardware.»[8]

« [...] knowledge of the world means dissolving the solidity of the world »[9]

[8] Ibidem p.8

[9] Ibidem p.9

En conclusion, à travers ces divers exemples, Italo Calvino nous montre brièvement que la légèreté devient une manière interéssante d'appréhender le monde sur la base de la philosophie, de la littérature et de la science. De cet essai, nous retiendrons la recherche du savoir, l'instauration de nouvelles méthodes de perceptions, et une ouverture sur ce que l'on ne connait pas encore. De cette façon, Italo Calvino offre clairement des pistes inspirantes pour le raisonnement architectural et la création de projets. Nous allons désormais voir que cette notion de «*légèreté*» a été largement mise en avant au cours de l'Histoire de l'architecture selon des principes similaires à ceux évoqués par Italo Calvino.

2.2. La légèreté dans l'Histoire de l'architecture « savante ».

En architecture, les choix conceptuels et esthétiques prennent en compte beaucoup de facteurs divers et ne peuvent ainsi se limiter uniquement à la question de la légèreté, qui fut d'ailleurs appréhendée de différentes manières selon les architectes et les époques. En dépit de cela, cette notion a su transparaître tout au long de l'Histoire de l'architecture « *savante* ». Par le terme « *savant* », est désigné l'architecture réalisée par des architectes et non par de simples habitants comme nous le verrons plus tard avec l'architecture « *vernaculaire* ». La légèreté, sous ces différents aspects, semble avoir été une profonde motivation chez les architectes lors du développement d'un projet architectural. Dans cette partie, des périodes clés dans l'Histoire de l'Architecture liée à cette notion seront présentées. Nous aboutirons à l'époque contemporaine afin comprendre la définition actuelle de la légèreté et l'utiliser à bon escient pour le futur.

Fig.3. «*La Cabane primitive*», Laugier, *Essai sur l'architecture*, 1753

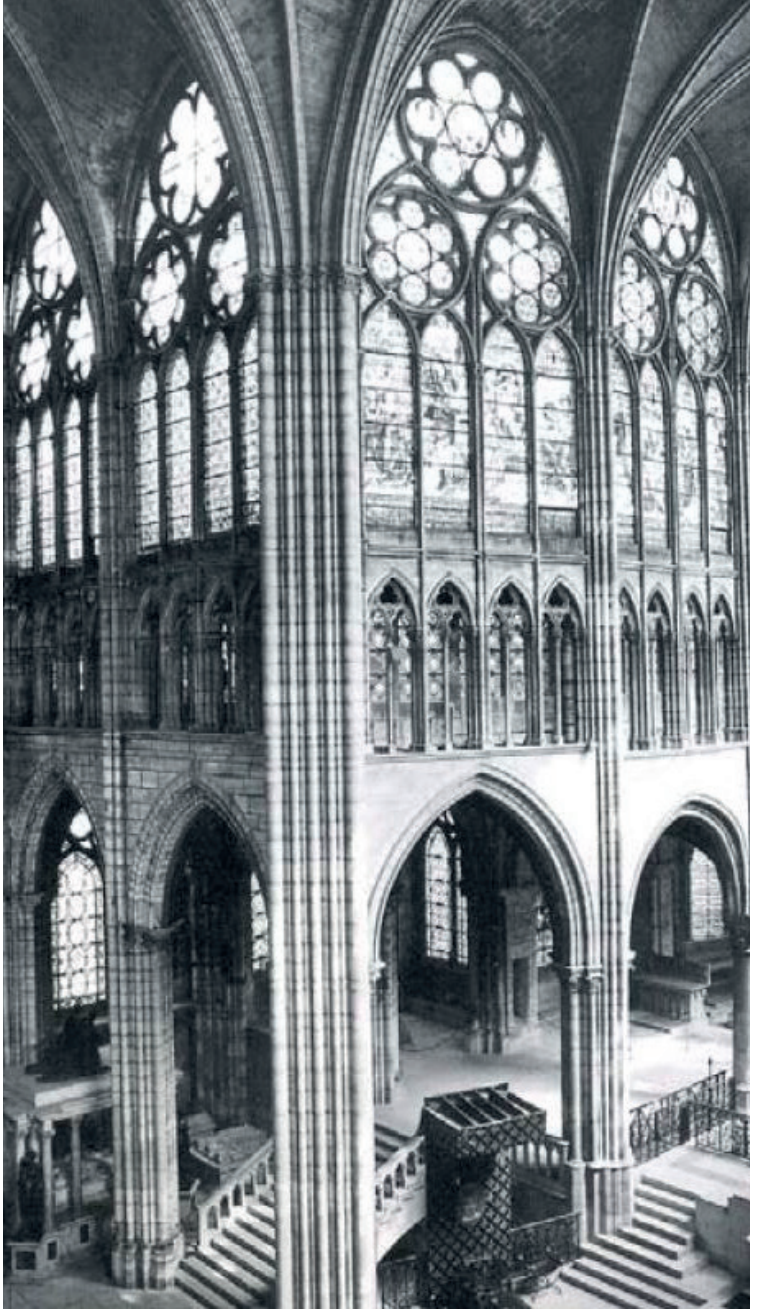


Fig.4. Eglise abbatiale de Saint Denis

« Tout édifice, à la fin du XIIe siècle, se compose d'une ossature rendue solide par la combinaison de résistances obliques ou de pensanteurs verticales opposées aux poussées, et d'une enveloppe, d'une chemise qui revêt cette ossature. Tout édifice possède son squelette et ses membranes: il n'est plus qu'une charpente de pierre indépendante du vêtement qui la couvre.»[10]

---

[10] E. Viollet-le-Duc, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 4, 1869, p.127

2.2.1. De la finesse du Gothique à la transparence des Modernes.

L'époque gothique, sous l'impulsion de Eugène Viollet-le-Duc et des écrits de Auguste Choisy, a marqué un tournant dans la manière de voir et surtout de concevoir l'architecture. L'abandon de la monumentalité massive de l'architecture romane pour s'élever vers une architecture plus élancée, plus technique, présentait déjà ce désir de légèreté. Le terme « *désir* » est important puisqu'il traduit une « *illusion* » de légèreté plutôt qu'une véritable légèreté de poids. La construction reste tout de même en pierre. La cabane primitive de Laugier (Fig.3) et la hutte primitive de Gottfried Semper ont été de véritables sources d'inspiration de légèreté pour bon nombre d'architectes. Dans son «*Dictionnaire raisonné de l'architecture française*» Viollet-le-Duc dévoile la naissance de l'arc boutant, les voûtes à nervures, les arcs doubleaux et brisés qui permettent la disparition du mur et des contreventements massifs au profit de piliers ponctuels. Ce langage architectural révolutionnaire a constitué l'innovation avec une nouvelle complexité : l'oblique. La structure est pensée en terme d'ossature comme un squelette léger dont chaque élément à une fonction identifiable. Dans cette conception anatomique, on assiste à une sorte de raréfaction de la matière (Fig.4). L'élancement des structures gothiques et leur dynamisme statique peuvent être comparés d'une certaine manière à cet élan «*léger*» de Cavalcanti pour sauter le muret décrit par Italo Calvino précédemment.

Par la suite, la légèreté a souvent entretenu un lien avec l'art inspirant l'architecture. L'évolution de l'art qui trouve un nouveau langage et se dépouille peu à peu de la lourdeur des détails, de la représentation figurative pour aboutir à une abstraction en est un bel exemple. La recherche vers une forme supérieure de création, en ne conservant que l'essence même des choses se retrouve aussi dans l'Histoire de l'Architecture. La question de la légèreté a notamment été liée à la notion de transparence à l'époque moderne. Ainsi la transparence littérale et phénoménale de Colin Rowe et Robert Slutzky dans leur essai « *Transparency : Literal and Phenomenal* » trouve un écho dans l'architecture de Le Corbusier ou encore Walter Gropius par exemple, mais aussi dans les *Papiers Collés* de Picasso ou Braque[11]. A cette époque moderne, un nouvel esthétique se développe en rompant avec le langage et codes classiques qui dominent à l'époque. Les fonctionnalistes rejettent alors toute inutilité à la fonction du bâtiment tel que l'ornementation et le camouflage pour s'intéresser au contraire à la réalité constructive et le développement de formes géométriques pures inspirées du mouvement de Stilj.
Les révolutions industrielles, les nouveaux matériaux, et par conséquent les nouvelles méthodes de production ont largement contribué à ce mouvement et

[11] Jacques Lucan, *Composition, non-composition: architecture et théories, XIXe-XXe siècles,* 2010*,* p.532

▲ Fig.5. *Crystal Palace*, Joseph Paxton, 1851

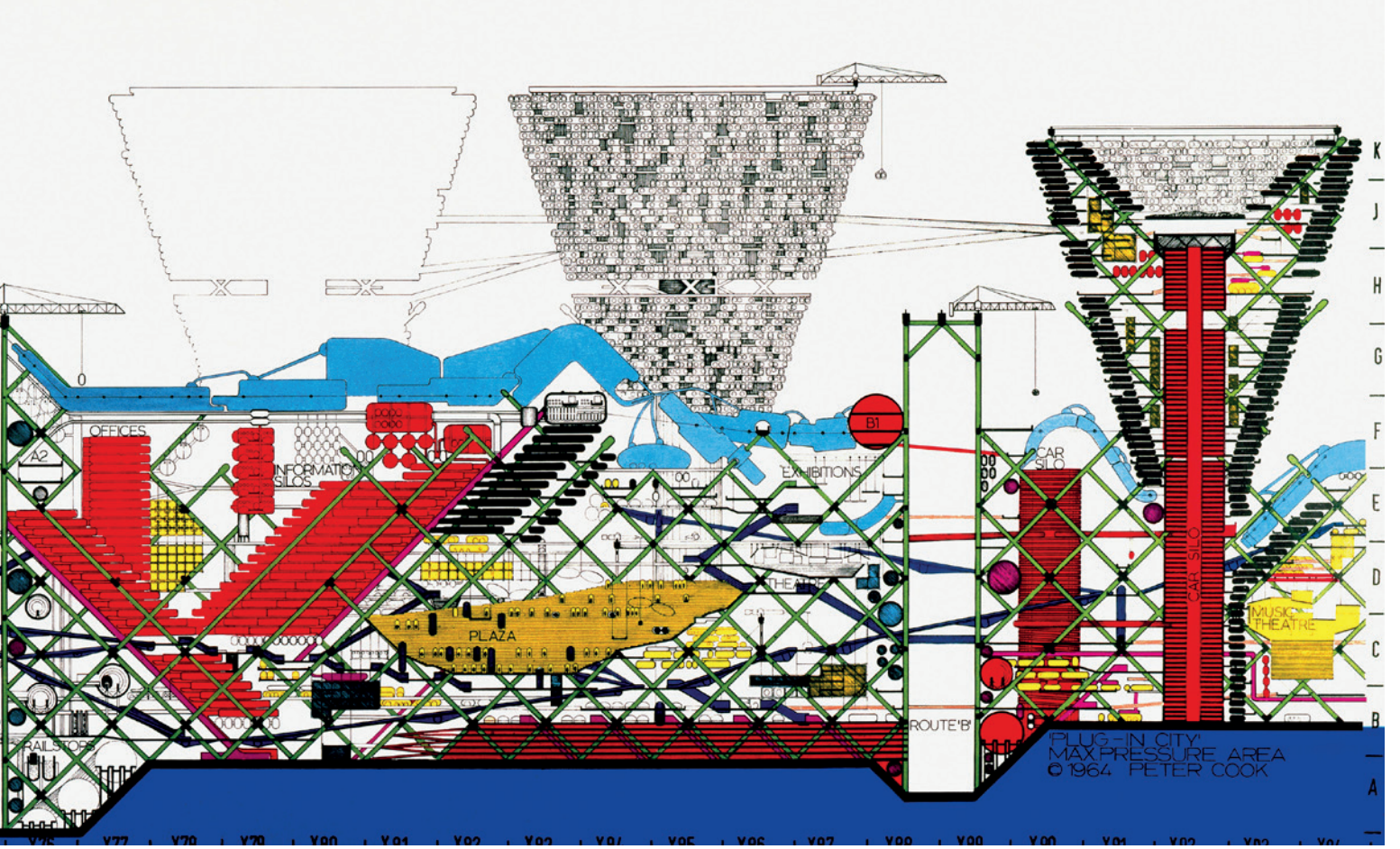
▼ Fig.6. *Choukhov Tower*, Vladimir Choukhov, Moscou, 1920

surtout au développement de la « *légèreté* » dans l'architecture. Le Crystal Palace de Joseph Paxton (Fig.5), figurait déjà comme un bel exemple de cette nouvelle manière d'aborder l'architecture et de la vivre. La suprématie de la structure, l'affront à la matérialité, l'interpénétration intérieur-extérieur font de cet espace rempli de lumière un espace d'un nouvel ordre esthétique et social. Les procédés de standardisation et de préfabrication ont par ailleurs su apporter à la légèreté une nouvelle dimension : celle de la rapidité de construction.

Cette légèreté constructive s'est également développée avec le constructivisme russe, courant de l'avant- garde, ayant inspiré les architectes modernes du Bahaus ou Le Corbusier par exemple. La tour d'émission radio-télévisée de l'ingénieur Choukhov à Moscou (Fig.6), apparaît comme un projet manifeste de cette pensée de légèreté. Cette même pensée provoque alors chez les Modernes une dématérialisation de l'architecture par l'emploi de structures fines et du verre, mais aussi par la typologie structurelle du plan libre. Les lignes pures et le minimalisme de la Farnsworth house ou la Galerie d'Art de Berlin de Mies Van der Rohe par exemple créent des spatialités mouvantes et continues, très poétiques, comme si le bâtiment était finalement une boite de verre légère avec une transparence totale.

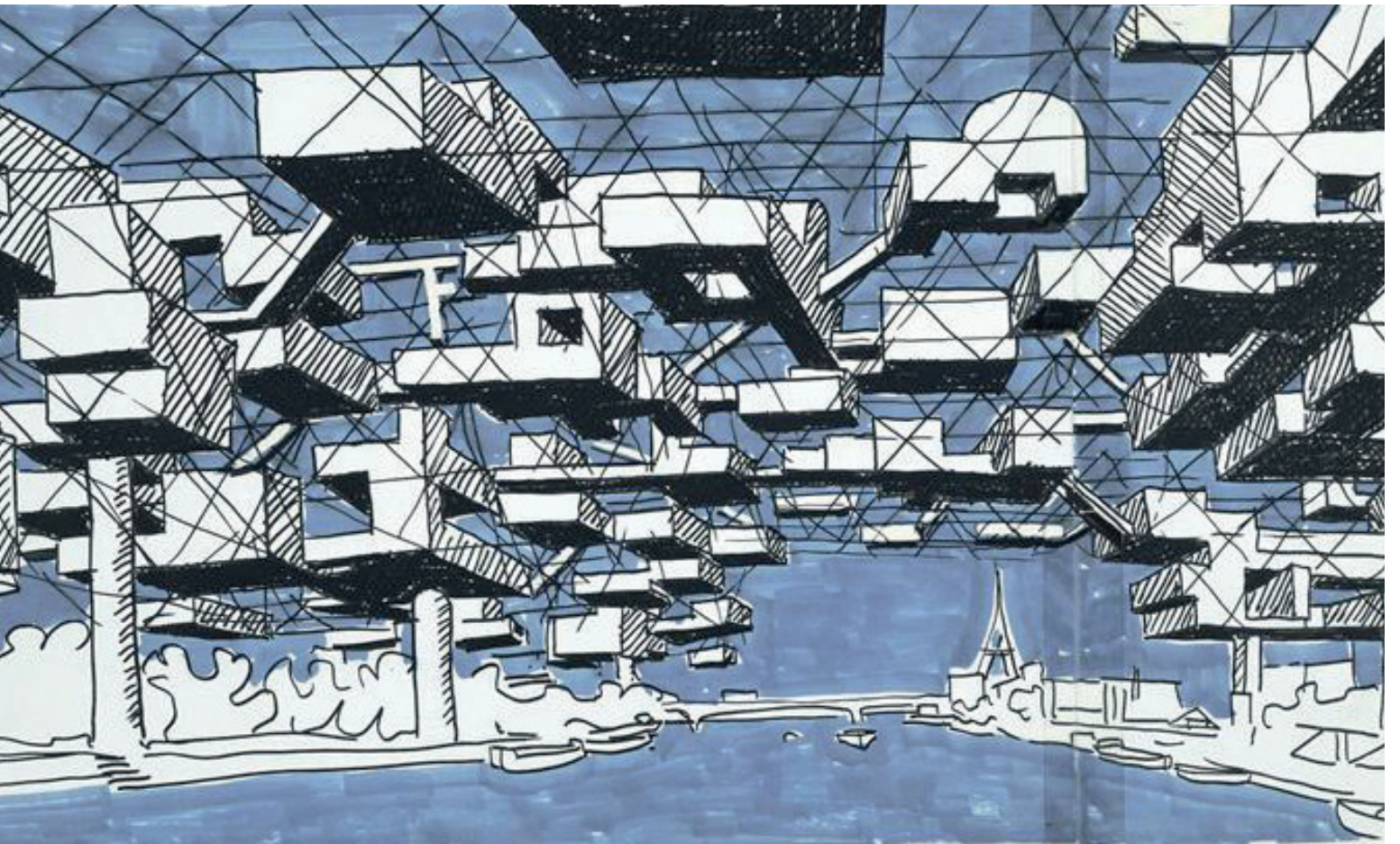
« *Nous avons perdu le sens du monumental, du massif et du statique et enrichi notre sensibilité du goût du léger et du pratique, de l'éphémère et du rapide […]. Je proclame que l'architecture futuriste est l'architecture du calcul, de l'audace et de la simplicité, celle du béton armé, du fer,du verre,du carton,des fibres textiles,bref,de tout matériau susceptible de remplacer le bois,la pierre et la brique, qui rendent possibles élasticité et légèreté.* »[12]

[12] Extrait de San't Elia & Marinetti, *Manifeste de l'architecture futuriste*,1914



▲ Fig.7. *Plugin City*, Archigram (Peter Cook), 1964

▼ Fig.8. *Paris Spatial*, Yona Friedman, 1960



2.2.2. La légèreté comme mobilité, adaptabilité et éphémérité.

En outre, au cours de l'Histoire de l'Architecture, la légèreté a permis également de voir l'architecture sous l'angle de la mobilité, de l'adaptabilité et de l'éphémère. De 1950 aux années 2000, l'architecture aussi bien que le design d'objets vont expérimenter de façon toujours plus inattendues les limites de l'espace habité et de son confort. Les mobiliers légers, qui s'adaptent et se transforment vont être déclinés dans un style coloré selon les codes du Pop Art. La légèreté physique s'accompagne dès lors d'une légèreté de l'esprit, devenant à la fois expressive et divertissante et qui touchera également l'architecture. Le célèbre studio Archigram avec Peter Cook, a poussé cette notion de légèreté vers l'utopie et l'imaginaire en présentant des images d'architecture futuristes, mobiles et rythmées par les événements et le mouvement de la ville tel que le projet *Plugin City* (Fig.7). Nous sommes alors bien loin de la lourdeur de l'architecture aux codes sociaux et esthétiques ancrés par le passé.

De la même manière, Yona Friedman, architecte et sociologue hongrois, a largement défendu cette volonté de remettre en cause l'architecture figée pour la rendre capable de s'adapter aux évolutions de la société de demain. Le caractère mobile et évolutif conféré par l'allègement de la structure, donne une certaine forme de vie à l'architecture et à la ville qui peut croître et se transformer. Comme il l'énonce : *«People can improvise the city; people can improvise architecture. That means the city shouldn't resist [its] inhabitants, but obey [its] inhabitants [...] We need to get back to elasticity.»*[13]

Dans la représentation *Paris spatial* (Fig.8) en 1960, Friedman montre un modèle d'architecture où les logements, de part leur caractère évolutif et léger, s'adaptent aux besoins des habitants qui deviennent les acteurs de leur espace de vie. La trame de support de cette ville changeante est montrée tellement légère qu'elle se détache du sol en limitant son impact d'implantation. Ces pistes sont certes utopiques mais non négligeables aux vues des problématiques contemporaines qui nous touchent notamment sur la question de la mobilité, de l'empreinte au sol et de l'environnement.

---

[13] Yona Friedman, «*Yona Friedman on Empowering People with Adaptable Architecture»,* Archidaily.com

▲ Fig.9. *Climatron*, Buckminster Fuller, 1960

▼ Fig.10. *Montreal Biosphere*, Buckminster Fuller, 1967

En restant dans cet esprit utopique général des années 1950-70, Buckminster Fuller est également un grand protagoniste de la légèreté. Inventeur de la maison Dymaxion inspirée de la « *synergétique* », il est surtout le créateur des dômes géodésiques. Marqué par la conquête spatiale de l'époque, ainsi que les premiers grands travaux avec l'ordinateur, Buckminster Fuller rêve de dômes géants et légers. A la différence du groupe Archigram, il est conforté par un certain optimisme technologique. Ces dômes, capables de couvrir des villes entières selon lui, utilisent des structures géodésiques gargantuesques pourtant donnant l'impression de flotter dans les airs. Pour Antoine Picon, il faut être clair sur la signification du terme « utopique ». En effet selon lui « *si le qualificatif d'utopique revêt généralement une connotation d'irréalité […] tel n'est bien sûr pas le cas chez Fuller qui insiste au contraire sur le caractère réalisable de ses propositions même les plus ambitieuses*»[14]. Cette approche se confirme clairement lorsqu'on découvre la concrétisation de projets tels que le *Climatron* (Fig.9) ou la *Montreal Biosphere* (Fig.10). Son attrait pour la «*synergétique*», la machine et la mécanisation, lui fait concevoir la construction de structures dans les moindres détails, rejoignant ainsi le registre du design ; c'est une « *revolution in design* »[15]. Le principe du « *doing more with less* » est bien présent chez Fuller, et ce mouvement de rationalisation, ou plutôt « *d'ephemeralization* », comme l'énonce A.Picon, s'assimile alors à « *un processus d'abstraction qui voit l'esprit contrôler de mieux en mieux la matière* »[16]. Ce processus a conduit en quelque sorte à l'efficacité croissante des machines ainsi que l'allégement des structures sous l'époque moderne. Néanmoins, bien que Fuller ait évolué avec l'ordinateur, il est resté en décalage avec celui ci. Pour A. Picon, ses projets sont toujours restés dans une certaine démarche de « *bricolage* » plutôt que d'élaboration de programmes de calculs complexes que nous connaissons aujourd'hui avec les logiciels paramétriques.

Finalement, cette approche de la légèreté chez Fuller aura un impact conséquent chez ses contemporains, notamment chez Norman Foster avec cette fameuse question que Fuller lui posa lui même : *« How much does your building weigh, Mr.Foster ? »*[17]. Déjà passionné par l'aviation et cette capacité à élever des structures légères, Foster a poursuivi ces questions[18], tout comme Renzo Piano dans le Centre Georges Pompidou par exemple.

---

[14] Antoine Picon, Article «*Une utopie américaine, Le monde de Buckminster Fuller*», Les Cahiers de la Recherche Architecturale, 1997, p.101-112

[15] *Ibid. p.101-112*

[16] *Ibid. p.101-112*

[17] Buckminster Fuller, « *The Buckminster Fuller Reader* », James Meller, 1970, p.169-171

[18] C.Carcas, N. López Amado, film biographique «*How Much Does Your Building Weigh, Mr Foster?*», 2010

▲ Fig.11. Musée Gugenheim, Franck Lloyd Wright, New York, 1939

▼ Fig.12. Bibliothèque de Viipuri, Alvar Aalto, Vyborg, 1935

2.2.3. La légèreté visuelle et la technologie à l'ère contemporaine.

Un autre aspect de la légèreté, autre que du point de vue structurel et artistique, est celui de la sensualité visuelle. A ce sujet prenons tout d'abord l'exemple de Franck Lloyd Wright avec le Musée Gugenheim à New York (Fig.11). Dans ce projet, l'idée de « *Form follows function* » prend toute sa signification en créant une rampe continue qui devient alors un espace de circulation et d'exposition. Cette déambulation qui n'est pas forcement légère du point de vue structurel renvoie pourtant à une certaine sensualité et légèreté par sa plastique et son dynamisme ; un mouvement, qui peut s'apparenter à celui de la vie ou du poète enjoué. De la même manière, Alvar Aalto joue aussi avec la légèreté dans ses projets, celle de la vie, du mouvement et de l'émotion pour reprendre les concepts de Italo Calvino, qui rompt avec la logique de la « *machine à habiter* »[19]. En replaçant l'architecture entre la technique et la Nature, il rend ces espaces plus humain et « *met l'espace et le monde matériel en harmonie avec la vie humaine* »[20]. Cette attitude est inspirante pour la nouvelle architecture écologique à développer. Dans la Bibliothèque de Viipuri (Fig.12), le plafond en bois naturel qui ondule tel un drap souple et léger fait vivre l'architecture et la ressentir. Une véritable sensualité visuelle est proposée avec une ambiance qui crée des émotions.

Cette légèreté par la sensualité visuelle est une notion reprise notamment dans l'architecture contemporaine paramétrique. En effet, malgré le développement des outils de conception technologiques actuels qui revendiquent une complexité de formes débridées, la notion de légèreté n'en est pas moins absente. Dans son livre « *Light Construction* », écrit à l'occasion de l'exposition « *Light Construction* » qui s'est déroulée au Moma à New York entre Septembre 1995 et Janvier 1996, Terence Riley nous explique comment la légèreté est devenue un concept clé pour de nombreux architectes contemporains, mais aussi pour les artistes dans leurs installations. Glenn D.Lowry, directeur du Moma à cette époque, parle même d'une « *sensibilité émergente* » liée à ce développement de la légèreté lors des dernières décennies. Cette temporalité peut être discutée puisqu'il apparaît clair que la légèreté était une notion déjà clairement évoquée avant l'époque contemporaine, comme nous avons pu le voir précédemment.

Si nous nous referons à la pensée de Riley, cette « *nouvelle émergence* » chez les artistes et architectes comme il l'appelle, a été influencée par divers aspects de notre culture et son évolution notamment avec l'ordinateur ou toute forme de médias électroniques. Cette influence les a ainsi poussé à repenser les relations

---

[19] Le Corbusier, «Vers une architecture»,1923

[20] Bruno Marchand, «*Alvar Aalto et l'humanisme de l'architecture*», Cours Théorie de l'Architecture V, EPFL

▲ Fig.13. Tour des Vents, Toyo Ito, Nishi-ku, 1986

▼ Fig.14. Centre Heydar Aliyev, Zaha Hadid, Baku, 2013

entre architecture, structure et perception visuelle[21]. L'audace dans la conception de ce genre d'architecture débridée et technologique fait disparaître la structure même, si fièrement mise en avant par le passé. La légèreté et la fluidité s'expriment non plus seulement dans la forme, mais aussi et surtout au niveau de l'enveloppe du bâtiment.

Terence Riley reprend d'ailleurs Italo Calvino en nous rappelant que la notion de transparence a changé entre l'époque des modernes rationalistes et les contemporains. L'utilisation de l'ordinateur pour de la modélisation sophistiquée est un des signes de l'impact de la technologie sur l'architecture et la structure. La projection de motifs sur des surfaces opaques ou encore le jeu mobile de façade grâce au développement des médias électroniques tendent à donner une légèreté par la variabilité de l'apparence de la surface. *La Tour des Vents* de Toyo Ito (Fig.13) figure comme un exemple clair. Par ailleurs, lorsque Italo Calvino décrit Cavalcanti comme un poète de la légèreté, en le définissant par les termes « *it is to the highest degree light* » « *it is in motion* » « *it is a vector of information* »[22], ces termes à la base dans un contexte littéraire conviennent parfaitement pour décrire ce projet de Toyo Ito. La notion de transparence totale chez les Modernes a ainsi su évoluer chez les Contemporains avec l'utilisation de façades filtres ou de verre opaque. Des projets tel que la *Fondation Cartier* par Jean Nouvel donne l'impression de légèreté par la transparence et non plus simplement dû à l'ajout du verre mais à une idée de transparence présente plus profondément dans la structure agissant comme un filtre.

Ces conceptions contemporaines de la légèreté, avec la technologie, sont d'autant plus présentes avec l'architecture paramétrique. Désormais, elles donnent l'apparence d'une architecture légère par la forme fluide plutôt qu'un calcul réel du poids du bâti. Des architectes tels que Zaha Hadid suscitent aujourd'hui un certain débat quant à la valeur d'une telle architecture. Nous pouvons citer le *Centre Heydar Aliyev* (Fig.14) en Azerbaijan dont la forme fluide donne l'impression d'un drap léger alors que la structure est composée massivement de béton et de métal recouverte de panneaux de fibres de verre .

Est-ce une architecture trop marketing qui vise à séduire le visiteur par le divertissement et l'attraction sans prendre en compte l'environnement ? La question peut se poser afin de comprendre l'enjeu des nouvelles technologies à répondre aux besoins contemporains sans se perdre dans une quête de la démesure et du non sens.

---

[21] Terence Riley, «*Light Construction*», Abrams, New York, 1995, p.9

[22] Italo Calvino, «*Six Memos for the Next Millennium*», Harvard University Press, Massachusetts, 1988

▲ Fig.15. Forest Pavilion, nArchitects, Taiwan, 2011

▼ Fig.16. Paper Log Houses, Shigeru Ban, Japan, 1995

2.2.4. Un retour actuel à une légèreté « vraie » et écologique.

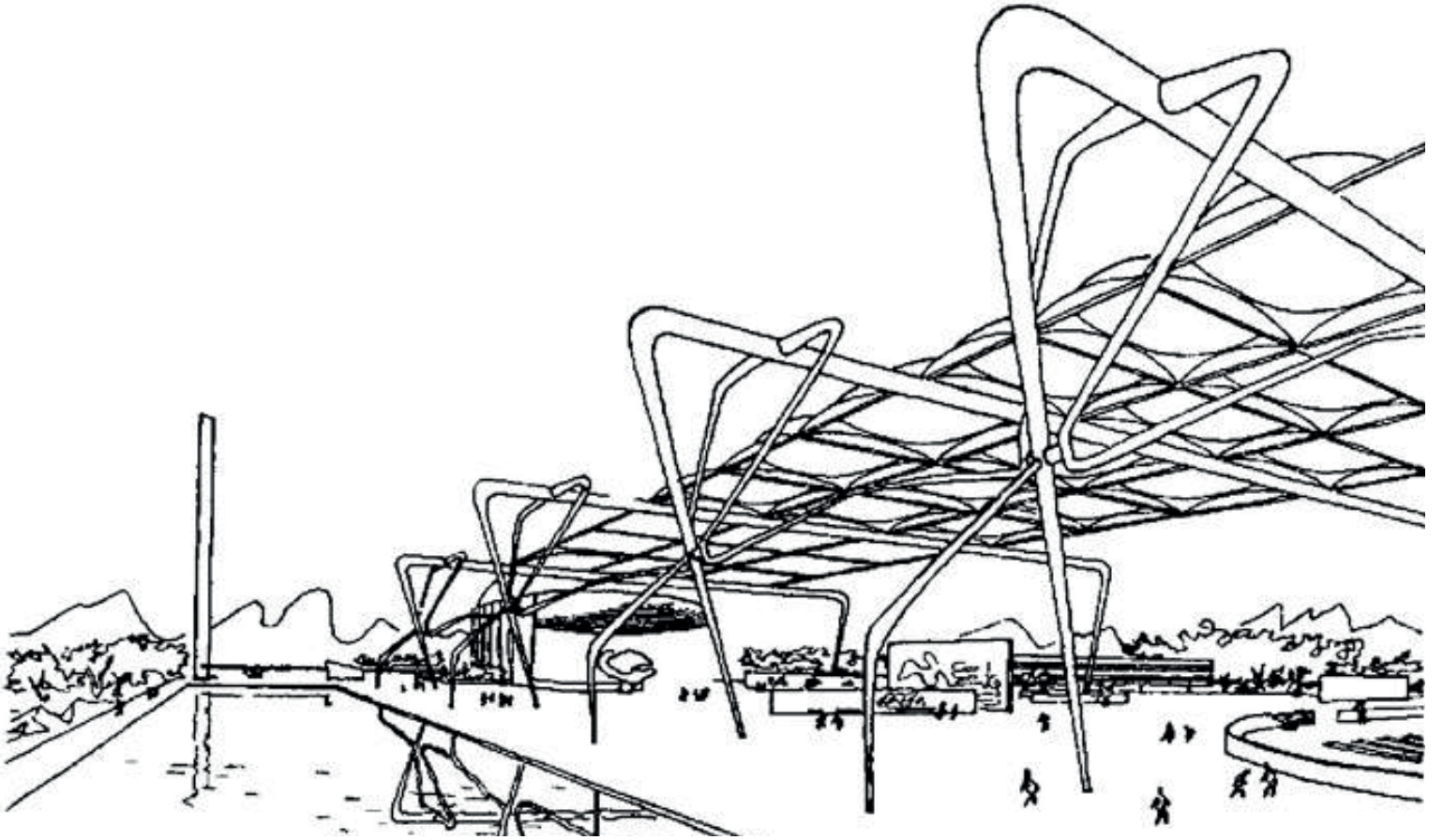
La question de la légèreté a suscité récemment l'émergence d'une architecture qui se veut vraiment légère et écologique, à la différence des projets précèdemment vus. L'aspect le plus important de cette architecture récente est qu'elle s'engage à trouver des solutions à des problématiques environnementales, mais aussi sociales. La légèreté physique, et non plus simplement visuelle, aurait alors pour but de répondre à des besoins capitaux en se tournant vers l'essentiel et le « *low tech* », au détriment d'une profusion de l'inutile et du sensationnel. C'est précisément cet aspect actuel de la légèreté qui nous intéresse et que nous développerons dans cet écrit.

Dans cette manière d'aborder l'architecture, le choix du matériau est un point majeur de réflexion, que ce soit au niveau de la structure, des coûts et du respect de l'environnement. Nous pouvons citer le *Forest Pavilion* de nARCHITECTS à Taiwan (Fig.15) où l'architecture devient responsable et s'engage à défendre des causes en sensibilisant son visiteur. L'utilisation de matériaux respectueux de la nature et à portée de main deviennent de véritables motivations pour l'architecte. Dans ce projet, le bambou constitue la structure légère du pavillon éphèmère accueillant divers rassemblements. Cette structure agit comme un filtre délimitant l'espace. De la même manière, l'utilisation de tubes de carton recyclables par Shigeru Ban au Japon, constitue la structure de maisons ultra légères en situation de post cataclysme à Kobe suite au tremblement de terre de 1995 (Fig.16). Cette approche de Shigeru Ban souhaitait «utiliser le moins pour en faire le plus», autrement dit, il s'agit d'optimiser la construction et la quantité de matériaux pour répondre au mieux au programme sans s'attarder au départ sur des questions visuelles et décoratives. Nous aborderons plus en détail ce sujet de la légèreté axée sur l'éco-efficacité et la durabilité dans la suite de cet écrit.

2.3. La légèreté économique, une réponse efficace à la crise environnementale actuelle.

Après avoir vu à quel point la légèreté physique ou visuelle a été une notion présente dans l'Histoire de l'architecture savante, nous nous attarderons sur sa définition actuelle et les valeurs qu'elle tend à véhiculer pour le futur. Cette définition actuelle peut se résumer par le terme de « *légèreté économique* ». Plusieurs agences d'architectures ont d'ailleurs décidé d'en faire leur maître mot pour la conception architecturale, comme c'est le cas notamment avec l'agence ANMA[23]. Cette notion renvoie alors à 5 grands principes identifiables selon eux.

[23] http://www.anma.fr/fr/themes/legerete-economique/



▲ Fig.17. Croquis Essai «*Monumentality*», Louis I. Kahn, 1944

▼ Fig.18. Paper Church, Shigeru Ban, Kobe, 1995

2.3.1. Le principe de libération du sol.

Le premier principe est celui de la libération du sol et de la nécessité d'avoir l'impact le plus faible possible sur le terrain accueillant le projet architectural. Dans un contexte où l'environnement connaît la plus grande crise de son histoire, sa préservation est un enjeu de taille pour tous les architectes et ingénieurs en devenir. La diminution de l'empreinte au sol grâce à la légèreté d'un projet architectural est due à deux raisons. La première et plus évidente, correspond à un détachement du sol maximisé de la structure. Le développement de structures squelettes concentrant les forces structurelles en certains appuis au sol comme le système de poteaux poutres a su conduire à l'époque moderne à une véritable libération du sol. Les croquis de Louis Kahn en 1944 sur la question de la monumentalité montrent clairement cette idée.(Fig.17)

La seconde raison de cette diminution de l'empreinte au sol peut s'expliquer par la capacité de mobilité des structures légères. L'architecture mobile a constitué une fascination majeure pour bons nombres d'architectes jusqu'à nos jours. La mobilité s'accompagne dès lors d'un aspect éphémère de l'architecture qui n'est plus seulement réservée aux pavillons d'expositions temporaires, mais qui a su s'étendre à bon nombre de programmes publics. Des architectes tels que Shigeru Ban mettent la légèreté et la mobilité de l'architecture au service d'une manière de vivre et d'intervenir notamment en situation de crise. Le projet *Paper Church* à Kobe (Fig.18) par exemple, est une église éphèmère. Cette église est faite de 58 tubes de carton construite en seulement 5 semaines par 160 volontaires suite au tremblement de terre de 1995 à Kobe. L'église a été démontée plus tard en 2005 pour être envoyée en pièces détachées dans une ville à Taiwan.[24] De la même manière, son projet du *Paper Concert Hall* à L'aquila en Italie, suite au tremblement de terre survenu dans la région 2 ans plus tôt, est une salle de concert temporaire faite de carton, facile à assembler et durable.

Cette mobilité des structures légères et temporaires, faites de squelettes structuraux en carton induit des projets qui sont plûtot posés au sol que ancrés dans celui-ci. Lors du déplacement de ces structures, le sol peut retrouver son aspect quasi originel sans dégats importants.

---

[24] AD Editorial Team, *The Humanitarian Works of Shigeru Ban*, http://archidaily.com, 2014

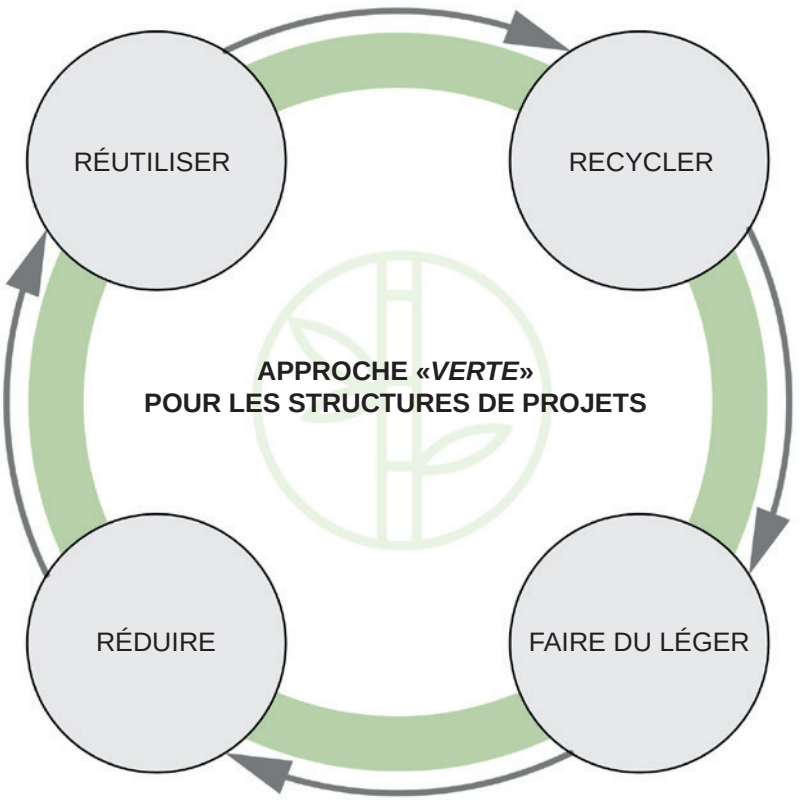


Fig.19. Diagramme de l’approche «*verte*»

2.3.2. Les principes de l'économie des moyens et d'énergie maximale mis en œuvre.

Une économie des moyens mis en œuvre pour réaliser un projet, que cela soit en termes de matériaux ou de structures, relève également du nécessaire. Cette approche répond clairement au principe du « *More with less* ». Les structures en préfabrication et les assemblages permettant une réalisation architecturale rapide sur le chantier doivent être privilégiés. Les matériaux devraient être choisis pour l'homogénéité de leurs caractéristiques, c'est à dire être à la fois légers, faibles de coût et surtout faibles en consommation d'énergie pour le produire. Le bambou est l'un matériau qui répond le mieux à ces questions, comme nous le verrons par la suite. L'utilisation massive de l'acier et du métal dans l'architecture ce dernier siècle a largement contribué aux problèmes écologiques. Peu de considérations étaient portées sur l'énergie pour produire ces matériaux de même que celle pour les transporter. L'industrie dit «*écologique*» grâce aux nouvelles technologies et aux matériaux naturels environnants est une notion majeure à développer de nos jours. La légèreté structurelle exprime cette nécessité pour le futur de construire avec un minimum de matière. La conception architecturale doit être guidée par une méthode efficace pour développer une architecture plus écologique et plus vertueuse dans un contexte où l'environnement est clairement perturbé.

Le troisième principe de cette légèreté économique est celui de l'économie d'énergie maximale possible pour réaliser le projet. L'économie d'énergie dans la fabrication des matériaux peut s'étendre à tout le bâtiment et au chantier. L'utilisation maximum de la nature et des forces en présences disponibles sur le site devient primordiale. La diminution de l'emprunte carbone des bâtiments est devenue aujourd'hui une nécessité, mais aussi un défi de taille pour des architectes du monde entier. Aujourd'hui l'énergie utilisée dans les bâtiments, mais surtout celle utilisée pour leur construction représentent plus d'un tiers de la consommation globale d'énergie mondiale. Cela contribue également à près d'un quart de l'émission mondiale des gaz à effets de serre. Dans le cadre d'une population grandissante, la demande de consommation en énergie pour les bâtiments devrait augmenter de 50%, tout comme la surface globale de bâti au sol attendue à doubler, d'ici 2050. Les zones importantes de cette expansion sont l'Asie du Sud-Est par exemple, en passant de 15,6 milliards m2 en 2015 à 32,3 milliards en 2050, ou l'Amérique Latine en passant de 19,3 milliards m2 en 2015 à 43,1 milliards.[25] Pour palier à cela, une approche «*verte*» doit être développée, c'est à dire trouver des matériaux faibles en émission de carbone, capables d'être réutilisés ou recyclés facilement.

---

[25] UNEP, «*Towards zero-emission efficient and resilient buildings*», Global Status Report, 2016

« *les critiques et certains maîtres d'ouvrage considèrent encore trop souvent aujourd'hui qu'un bon projet d'architecture est avant tout une œuvre, une réalisation hors du commun qui se démarque de la banalité par son côté esthétique ou sculptural. Les résultats des concours d'architecture sont hélas trop souvent guidés par cette recherche de projets spectaculaires […] Ils pensent que l'architecture se doit d'être avant tout extraordinaire, comme une œuvre d'art* ».[26]

[26] http://www.anma.fr

2.3.3. Le principe de l'appropriation architecturale.

Le quatrième principe tient compte pour sa part de la manière dont les usagers vont appréhender le bâtiment, en prendre possession pour finalement le vivre. Cette notion fait écho à la notion de légèreté dans le monde de la littérature vu précédemment avec Italo Calvino. Le bâtiment doit d'une certaine manière laisser à l'individu le moyen de changer de perspective et de regard sur ce même bâtiment. Il s'agit alors de ne pas imposer de contraintes problématiques aux occupants, mais bien au contraire de proposer un plan capable d'évoluer dans le temps sans perdre son caractère d'appropriation. Italo Calvino voyait les restrictions comme un poids de la vie. Tandis que l'éphémérité d'une chose la rend « *légère* », son aspect immuable la rend «*lourde*». Ce principe apparaît clairement utile dans ce contexte de crise environnementale actuelle où l'on cherche à limiter l'étalement bâti sur la nature. En effet, dès lors qu'un projet est à même de répondre à plusieurs programmes et fonctions dû à sa flexibilité et son évolution programmatique, alors la construction d'une multitude de nouveaux projets rigides et monofonctionnels n'est pas nécessaire. Un lieu alternatif, où se mêlent diverses activités, apparait comme une solution potentielle. L'appréhension architecturale peut aussi être envisagée du point de vue constructif. Les ouvriers capables d'apporter leurs compétences dans la réalisation du projet, se l'approprient en même temps et trouvent là une matérialisation de leur savoir faire.

2.3.4. Le principe de «l'ordinaire-extra».

Enfin le cinquième et dernier principe que nous pouvons extraire de cette légèreté économique est celui de la discrétion dans le paysage environnant, qui sous entend une certaine contingence du lieu. Ce principe nous renvoie à une notion majeure de l'architecture actuelle : « *l'ordinaire extra* »[27]. A l'heure où l'architecture est divisée entre production de projets « *spectacles* » du star-système architectural et celle de projets plus « *raisonnés* », cette notion fait de plus en plus son apparition. L'enjeu de l'architecture en devenir serait d'une certaine manière un compromis entre une recherche spectaculaire qui fasse évoluer l'architecture, même si parfois elle tend à mettre en œuvre des moyens structuraux et financiers excessifs, et d'un autre côté une architecture banale. Le danger d'une architecture « *spectacle* » c'est finalement de faire plus signe que de sens, dans un contexte où le respect de l'environnement et des contraintes économiques n'est pas à négliger. Mais la notion d'ordinaire doit être nuancée et perçue d'un point de vue économe et d'intégration au contexte environnant. L'architecture dite « *ordinaire* » se voit alors chargée de sens et d'usage.

---

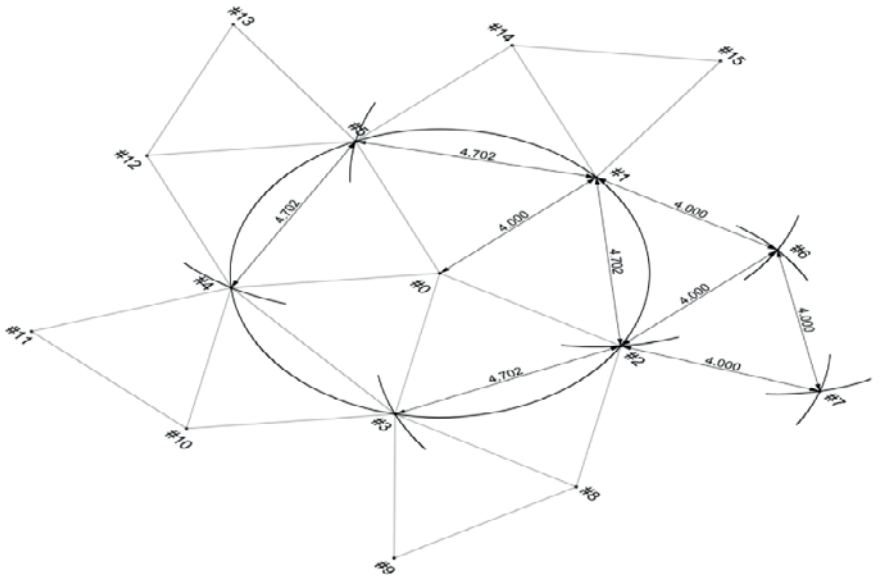
[27] http://www.anma.fr

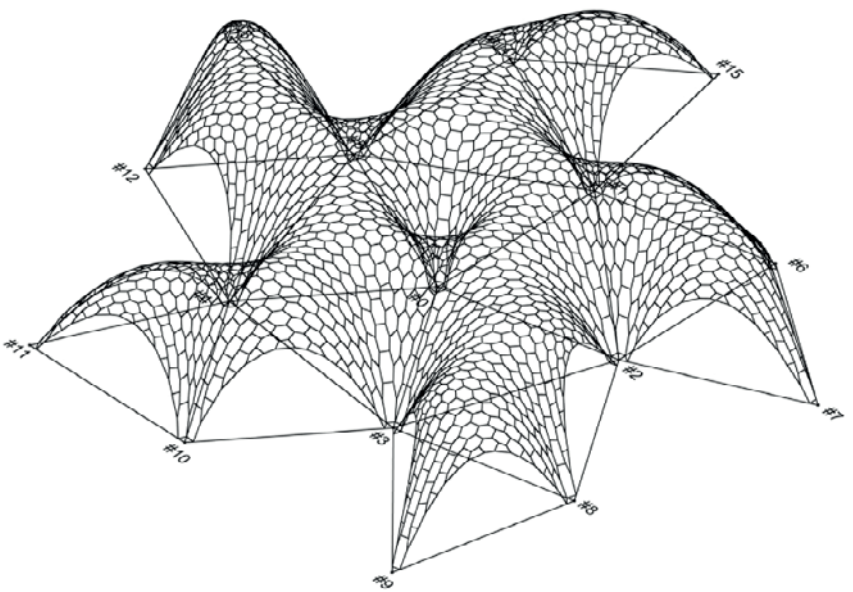
Liste des figures

Fig.1 p. 9: https://issuu.com/, Article « *Versus, Heritage for tomorrow*», 30/11/2014, p.223
Fig.2 p. 10: http://pinterest.com
Fig.3 p. 16: Jacques Lucan, Cours Théorie de l'architecture I EPFL, «*Quatres «récits» de l'origine de l'architecture*»
Fig.4 p. 16: Jacques Lucan, Cours Théorie de l'architecture I EPFL, «*Quatres «récits» de l'origine de l'architecture*»
Fig.5 p. 18: http://www.gettyimages.fr, «*Dickinson's Comprehensive Pictures of the Great Exhibition*»
Fig.6 p. 18: http://www.wikipedia.com
Fig.7 p. 20: http://www.penccil.com
Fig.8 p. 20: http://www. Art.rmngp.fr
Fig.9 p. 22: http://www.pinterest.com
Fig.10 p. 22: http://www.archidaily.com
Fig.11 p. 24: https://www.rts.ch
Fig.12 p. 24: https://www.wmf.org
Fig.13 p. 26: http://www.archidaily.com (© Shinkenchiku)
Fig.14 p. 26: http://www.pinterest.com
Fig.15 p. 28: http://www.pinterest.com
Fig.16 p. 28: https://www.designboom.com
Fig.17 p. 30: https://www.area-arch.it
Fig.18 p. 30: http://archidaily.com, *The Humanitarian Works of Shigeru Ban,* (© Hiroyuki Hirai)

2.4. Conclusion sur la légèreté comme «clé».

Ainsi nous avons vu que la légèreté était une notion «clé» pour développer un projet architectural efficace face aux enjeux futurs. Cette notion a une histoire longue avec la littérature, la philosophie et l'architecture, en nous faisant percevoir le monde d'une autre manière. Après avoir énoncé ces cinq principes actuels qui tendent à conduire la création architecturale de demain, nous comprenons que développer un projet lié à la notion de « *légèreté économique* » et « *d'ordinaire-extra* » se révèle beaucoup plus complexe qu'il n'y paraît. Mies Van Der Rohe avait déjà d'une certaine façon cerné la notion de « *légèreté économique* » avec cette emblématique citation «*Less is more*». Ces considérations tendent vers une nouvelle architecture qui puisse à la fois prendre en compte la puissance des outils technologiques actuels, tout en profitant des acquis du passé, comme la maîtrise de matériaux locaux par exemple. Aujourd'hui, c'est un équilibre entre deux approches à atteindre, une hybridation comme nous le verrons, qui peut être en mesure de concilier l'architecture légère de demain avec le contexte de crise environnementale que nous traversons. Afin de juger cet équilibre, nous nous intéresserons à ces deux approches permettant de développer une architecture légère et respectueuse de l'environnement. La première approche est celle du paramétrique, comme cheminement « *high tech* » pour aborder le problème posé.


#13
#14
#15
#5
#12
4.702
#1
4.702
4.000
4.000
#6
4.702
#4
#0
4.000
#11
4.000
#2
4.000
4.702
#7
#10
#3
#8
#9


#15
#12
#6
#0
#11
#2
#7
#10
#3
#8
#9

3. L'approche paramétrique, un cheminement «*Hightech*» vers une architecture légère.

3.1. Une approche théorique comme nouvelle manière de penser l'architecture.

Le développement des nouvelles technologies, notamment en matière de conception assistée par ordinateur a conduit les ingénieurs et architectes à penser l'architecture d'une nouvelle manière en aidant à la recherche de légèreté dans un projet par exemple (Fig.1). Dans cette partie, nous nous baserons sur les articles publiés dans le catalogue « *Generative Design* » par Danil Nagy, designer et chercheur au sein du groupe « *Autodesk Research* ».

3.1.1. Les fondements du « Generative Design ».

L'enjeu actuel de l'architecture est de maîtriser les nouveaux outils et concepts existants, pour guider notre intuition créatrice ainsi que notre processus de conception d'un projet. En ouvrant les champs du possible pour la profession future, l'une des approches la plus répandue via les logiciels paramétriques est le « *Generative Design* », qui s'intègre de manière plus large dans le contexte de l'Intelligence Artificielle.

L'un des points majeurs de cette approche « *high tech* » est cette capacité de la technologie à apprendre d'un projet en cours de conception. Grâce à une analyse et une connaissance cumulative, nous pouvons générer successivement un projet encore meilleur, ou encore plus léger. Cette motivation d'utiliser une intelligence informatique capable de se développer et d'apprendre par elle-même est notamment devenue une approche plus réaliste qu'utopique grâce aux progrès de ces dernières années. Bien que cette approche soit depuis quelques temps sur la scène internationale, ses premières tentatives datent d'il y a longtemps dans l'histoire de l'informatique.

En effet, le premier programme qui se voulait « *intelligent* » est le projet « *the Limits to Growth* » conçu et développé en 1972, soit au début du développement des ordinateurs, par un groupe de chercheurs au MIT[1]. Le but de ce programme était de

[1] David Nagyl, Article «*The problem of learning»,* Generative Design, 23/01/2017, https://medium.com

◀ Fig.1.

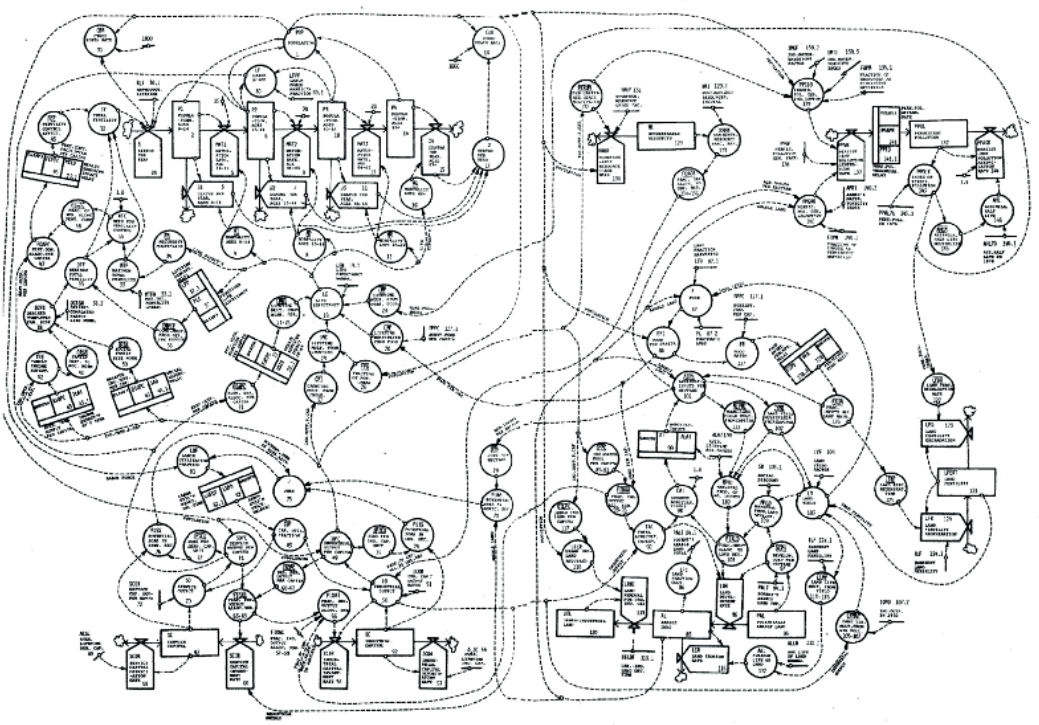


Fig.2. D.Meadows, *The Limits to Growth*, 1972

simuler le monde entier vu comme une série de flux qui s'interconnectent en boucle et s'influencent mutuellement de façon dynamique (Fig.2). Néanmoins, malgré l'intention de ce programme à vouloir montrer la complexité et la dynamique de notre monde, son fonctionnement et son élaboration n'en demeuraient pas moins statiques. Cela s'explique par le fait que le modèle n'apprenait pas, ses éléments connectés et pensés par les chercheurs et leur intuition de départ n'avaient pas la capacité de s'adapter à la variabilité. Ils tendaient alors à montrer des résultats prévisibles. A l'opposé de ce projet par exemple, le programme bien plus intelligent et complexe du « *GoogLeNet* » mis en ligne en 2014, présentait une capacité de reconnaissance et classement automatique d'images du web. En utilisant un programme informatique basé sur un réseau de neurones « *Neural Network* »[2], ce système est capable de s'entraîner automatiquement, de s'améliorer au fur et à mesure, mais aussi d'ajuster ses fonctions et l'importance de leurs connections mutuelles à partir de données.Dans le cadre de l'architecture et notamment du « *Generative Design* », c'est un autre aspect de l'Intelligence Artificielle qui est mis en avant : celui des « *algorithmes de recherche* ». Étant donné que les modèles de conception paramétriques dans ce domaine lient à la fois calculs et opérations géométriques, une analyse directe par calcul n'est pas vraiment possible. Ainsi plutôt que d'avoir un système qui apprend au sein d'un modèle comme c'est le cas chez le système de Google, il s'agit d'avoir un système séparé qui peut apprendre, grâce à ces algorithmes de recherche, à travailler avec un modèle de conception (un projet) sans directement comprendre comment celui-ci fonctionne. Ces algorithmes tendent alors à des tests, des itérations répétées de possibilités plutôt qu'une solution directe. L' « *algorithme génétique* » devient particulièrement intéressant puisqu'il emprunte ces concepts à la théorie de l'évolution, à savoir la sélection, l'éducation et la mutation pour rechercher itérativement des possibilités. Chaque possibilité est testée et évolue, la ou les meilleures aboutissent vers une forme ou structure de bâtiment optimisée, plus performante ou plus légère. La question de l'approche paramétrique serait finalement : *comment à partir d'éléments définis de base formant une forme primaire conceptuelle, peut-on parvenir à un système de conception qui prennent en compte une multitude de possibilités dont l'une serait la meilleure ou la plus légère ?* Pour reprendre notre analogie avec le monde du vivant, chaque possibilité correspond à un « *individu* » mais se rattache à un concept de base qui est « *l'espèce* ». Dans cette « *nouvelle conception architecturale* », les logiciels paramétriques, détachés mais combinés avec des logiciels de modélisation pure, permettent d'utiliser un ensemble de paramètres pour mener une série d'opérations de calculs et de géométries aboutissant à une forme finale.

---

[2] David Nagyl, Article «*The problem of learning»,* Generative Design, 23/01/2017, https://medium.com

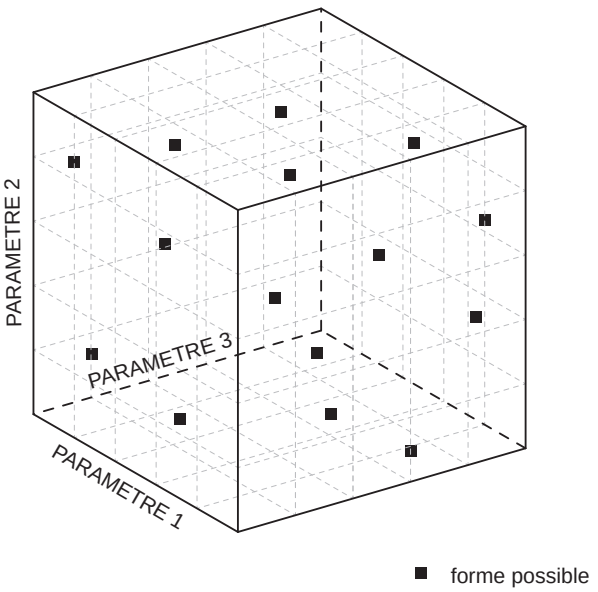


Fig.3. Exemple d'un Design Space à 3 dimensions (n=3)

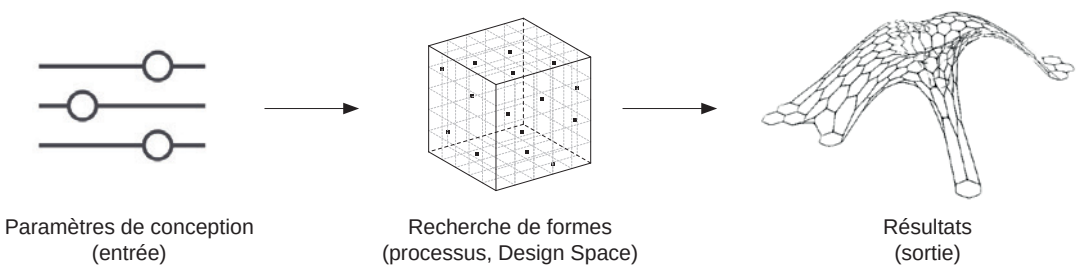


Fig.4. La paramétrisation du Design Space

3.1.2. La définition du « design space ».

Dans ce système de conception, chaque possible version d'une forme existe intrinsèquement quelque part dans un «*espace abstrait* ». Cet «*espace*» englobe toutes les possibilités formelles et uniques à partir de paramètres et de données : c'est ce que l'on appelle le « *design space* ». Il est une sorte « *d'hyper-cube en n dimensions*»[3] où « *n* » représente le nombre de paramètres définissant le système. Chaque combinaison unique de valeurs d'entrée dans les paramètres, définit un emplacement précis dans le « *design space* » où se situe une certaine unique forme qui en découle (Fig.3).

Bien qu'il soit difficile de visualiser d'un coup toutes ces possibilités, il en relève d'un processus d'itérations successives pour atteindre son objectif, d'autant plus si un nombre important de paramètres est pris en compte et rend le « *design space* » vaste à explorer. Les divers paramètres définis peuvent s'apparenter à des décisions prises successivement par l'architecte ou l'ingénieur dans le cas d'un processus de conception plus traditionnel. Dans le cas de l'approche paramétrique, cela constitue aussi des décisions. Nous pouvons voir ces paramètres comme des boutons formant une interface entre l'utilisateur et l'algorithme de recherche pour analyser diverses variations (Fig.4). De ce fait, un même problème peut aboutir à diverses stratégies aussi bien qu'une même stratégie peut être adoptée pour des problèmes différents.

L'algorithme de recherche n'étant pas familier avec le projet conçu, il est du devoir de l'architecte d'adopter une « *stratégie de conception* » c'est à dire définir des paramètres qui vont alors coder la façon dont l'architecte imagine résoudre le problème. Ce point est très important puisqu'il s'agit de comprendre que l'approche paramétrique n'est pas une automatisation totale du processus de conception architecturale qui remplacerait totalement l'intuition ou le savoir faire de l'architecte. Bien que l'algorithme de recherche automatisé soit capable d'explorer pour nous diverses solutions possibles, les résultats de cette recherche est clairement dépendant de la manière dont l'architecte a décidé de former ce « *design space* », par la spécification de mesures et de paramètres.

En partant de ce principe, l'architecte doit faire face à des compromis fondamentaux pour définir son « *design space* » et donc un projet architectural. Ces compromis résident dans deux notions opposées à chaque fois : le « *biais* » face à la « *variance* » et la « *continuité* » face à la « *complexité* ».

---

[3] David Nagyl, «*The design space»,* Generative Design*,* 24/01/2017, https://medium.com

Twin Towers, Minoru Yamasaki, New York

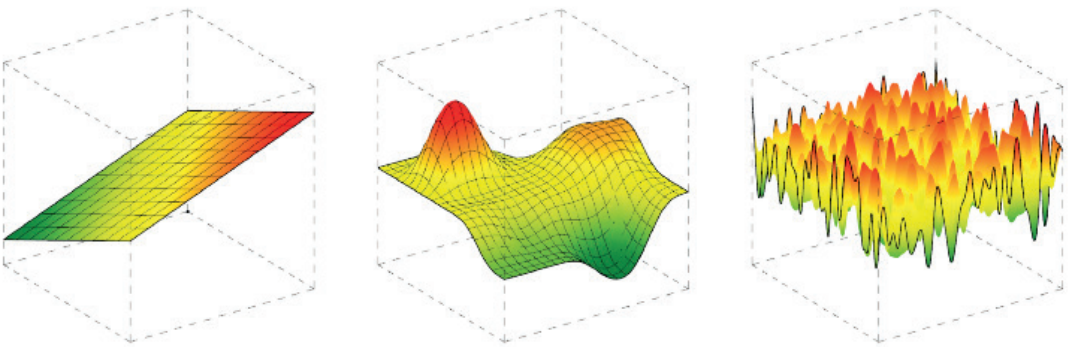
Skyscraper Sci-Arc, Danny Karas, Los Angeles

Trop simple
BIAIS

Compromis
Complexe sans être incertain

Trop incertain
VARIANCE

Fig.5. Le compromis Biais - Variance



Trop prévisible
CONTINUITE

Compromis
Complexe sans être aléatoire

Trop aléatoire
COMPLEXITE

Fig.6. Le compromis Continuité - Complexité

Concernant tout d'abord le « *biais* » face à la « *variance* », ce compromis définit la flexibilité d'un projet[4] (Fig.5). Le « *biais* » se rapporte à un état trop simple de conception parce que trop peu de paramètres le définissent. Un « *biais élevé* » de conception ne permet pas d'analyser des possibilités sous-jacentes et ne conduit pas vers un résultat particulier. L'exploration est limitée et peut mener rapidement à une solution qui n'est pas optimale, voir fausse. Danil Nagy met en lumière cette notion avec l'exemple d'une chaise. Un designer peut imaginer un modèle de chaise à quatre pieds, dont chaque position est un paramètre. Ce modèle a un « *biais* » tellement élevé pour une solution de chaise à quatre pieds que bien même en changeant les données dans les paramètres, nous n'obtiendrions pas une chaise à trois ou cinq pieds. A l'opposé de cela, nous avons la « *variance* » qui elle, se rapporte à un état trop incertain du projet avec trop de paramètres différents. Un projet avec une «*variance*» élevée produit beaucoup trop de variations ou d'erreurs et rend l'exploration du « *design space* » extrêmement compliquée et improductive, sans aboutir à de réelles bonnes solutions pour le projet architectural. L'enjeu du concepteur (ingénieurs ou architectes) est de créer un modèle de conception qui soit intermédiaire. Ce modèle ne doit pas être trop simple en donnant une solution directe, sans quoi l'approche paramétrique n'aurait aucun intérêt, mais ne doit pas être non plus trop flexible au point de ne pas donner de vraie solution.

L'autre compromis, dans la définition d'un modèle paramétrique de conception, est celui de la « *complexité* » face à la « *continuité* » qui décrit la structure interne du « design space » et la relation entre les formes présentes dedans[5] (Fig.6). La « *complexité* » se rapporte à la capacité du « *design space* » à créer des résultats imprévisibles auxquels le concepteur intuitivement n'aurait pas pensé. Une complexité trop faible ne nécessite pas d'approche paramétrique puisque l'on peut déjà avoir une idée de la meilleure solution, comme c'est le cas dans un processus de conception traditionnelle. En outre, la « *continuité* » se rapporte à la cohérence interne du « *design space* », c'est à dire que chaque forme possible d'un projet devrait entretenir des liens qui permettent à l'algorithme de recherche de passer d'une forme à l'autre, de façon réfléchie, par comparaison. Dans ce cas, il peut faire des prédictions quant à la performance de chacune dont son poids. L'absence de « *continuité* » conduirait le processus de conception paramétrique vers le chaos avec la recherche de formes aléatoires sans intérêt pour le problème initial posé et sans possibilité d'apprentissage progressif pour optimiser la situation. Ainsi, l'architecte devrait définir un « *design space* » suffisamment complexe pour stimuler la comparaison de formes non intuitives, sans pour autant tendre vers de la recherche inutile.

---

[4] David Nagyl, «*The design space»,* Generative Design*,* 24/01/2017, https://medium.com

[5] Ibidem

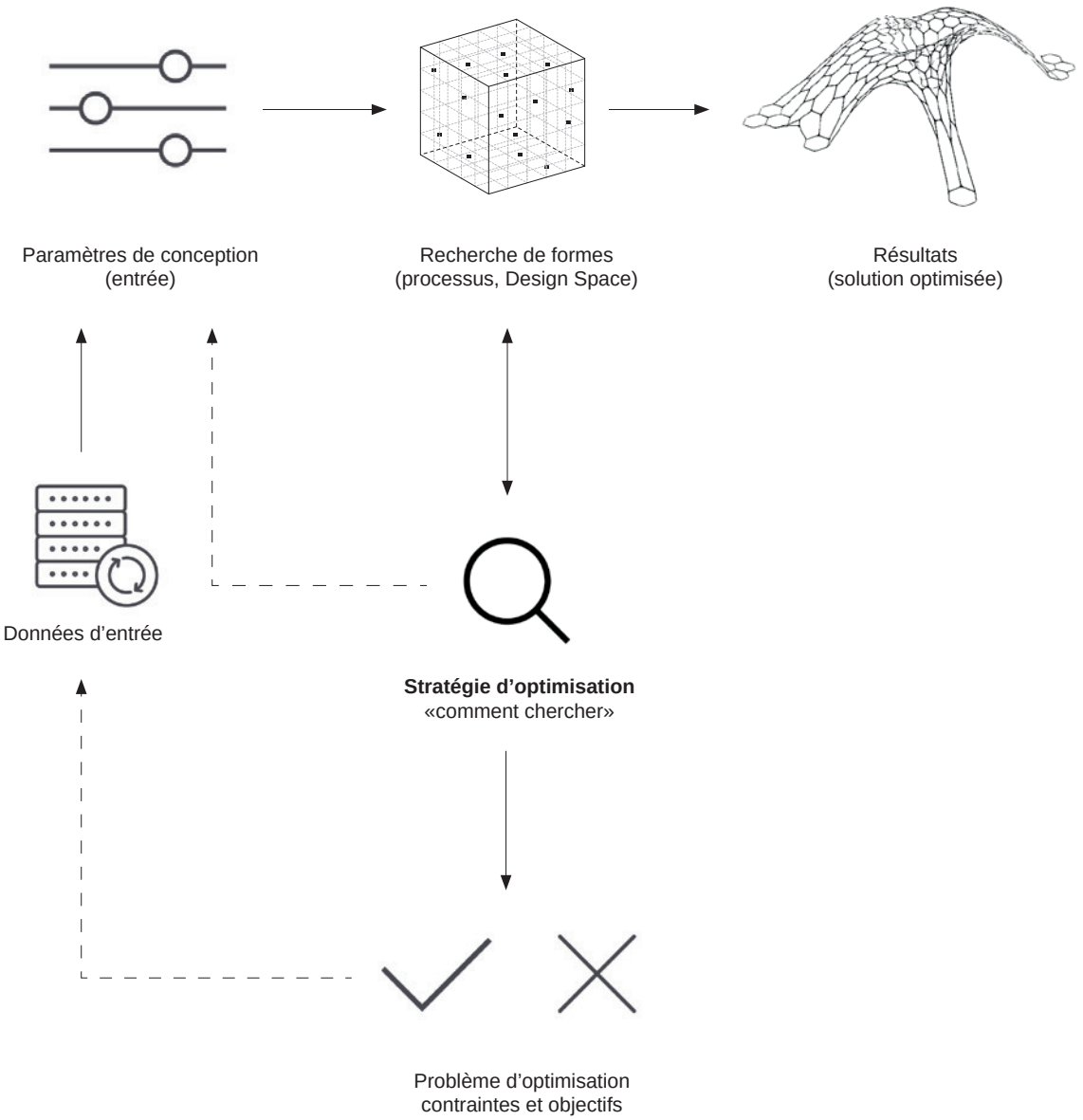


Fig.7.La définition d'un problème d'optimisation et d'une stratégie

3.1.3. L'optimisation.

L'optimisation est l'un des aspects majeurs de l'approche paramétrique. Une fois le «*design space*» défini, la volonté de trouver une forme performante s'établit grâce à trois grands éléments majeurs. Le premier correspond aux données d'entrée au départ dans le système qui influencent toutes les formes possibles dans le « *design space* ». Le second élément est l'instauration d'un ou plusieurs objectifs dans le système avec leurs valeurs correspondantes ; ce à quoi finalement on souhaite tendre à la fin. Le troisième et dernier élément de cette optimisation, c'est l'instauration de contraintes qui déterminent la faisabilité de chaque forme. Le but du processus d'optimisation est alors de trouver des combinaisons de données d'entrées qui satisfont au mieux les objectifs fixés, tout en respectant les limites des contraintes[6]. Prenons les données d'entrées directement liées aux paramètres définis. Celles-ci peuvent concerner le type de matériau ou la taille de l'empreinte d'un bâtiment au sol et sa hauteur par exemple. Toutes ensemble, elles définissent un «*design vector*» autrement dit des caractéristiques du projet. Dans un deuxième temps, les objectifs sont très importants dans le processus d'optimisation de l'approche paramétrique. L'architecte doit définir s'il souhaite minimiser ou maximiser la valeur des éléments concernés et implantés dans les paramètres pour satisfaire les objectifs. Ces éléments peuvent être singuliers ou pluriels et concerner le poids du bâtiment, son emprise au sol, sa hauteur, la quantité de matériaux utilisés ou encore les efforts présents dans la structure. Enfin, les contraintes décrivent si une forme du «*design space*» peut ou non être considérée comme une solution grâce à un processus de sélection. Nous souhaitons par exemple seulement conserver les solutions dont le poids de la structure est supérieur, inférieur ou égal à la valeur « *objectif* ». Une fois le problème d'optimisation défini il s'agit de définir la stratégie d'optimisation autrement dit comment chercher dans le «*design space*» pour trouver la solution optimale (Fig.7). Cette stratégie peut amener à modifier les paramètres d'entrée si besoin, et peut s'exécuter de deux manières. D'une part avec des méthodes déterministes qui résolvent directement le problème via une série d'étapes définies de calculs pour trouver la solution optimale. D'autre part, elle peut s'exécuter avec des méthodes dites « *stochastiques* » dont les algorithmes de recherches et leur apprentissage autonome font partie. Ces méthodes introduisent une certaine liberté de recherche. L'algorithme de recherche tend à échantillonner une ou plusieurs formes du « *design space* » au hasard, en tirer des analyses pour trouver d'autres formes plus performantes par comparaison et continuité. L'élément important de cette approche très fréquente dans le « *generative design* » c'est l'itération, le tâtonnement pour trouver la meilleure solution, ou du moins celle qui s'en rapproche.

---

[6] David Nagyl, «*Design optimization»,* Generative Design, 20/04/2017, https://medium.com

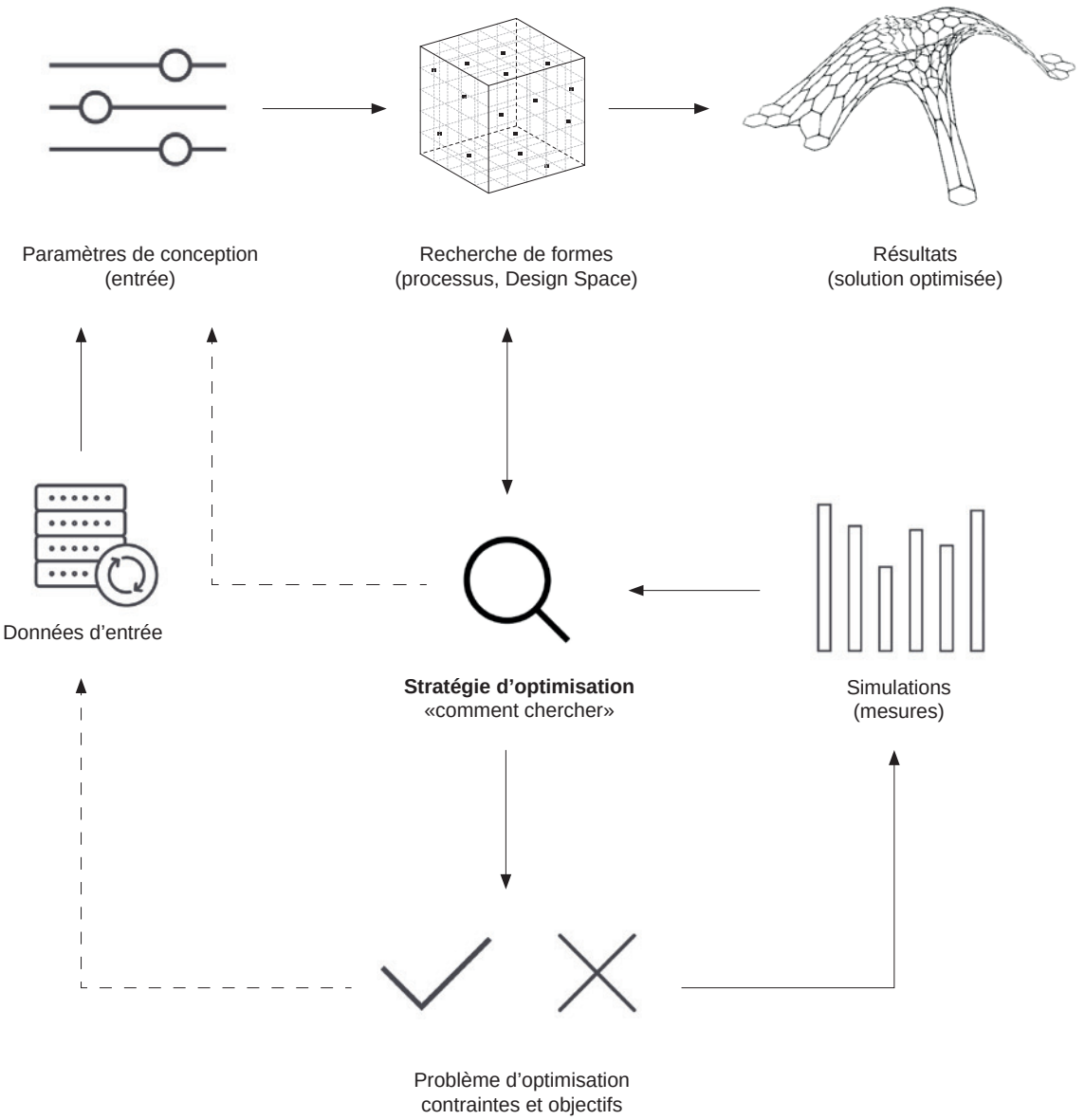


Fig.8.La définition de mesures

3.1.4. La définition de mesures.

Après avoir vu l'importance de la spécification d'une sorte d' « *espace de jeu* » pour concevoir un projet, ainsi qu'une stratégie pour l'explorer, il s'agit de faire des mesures pour chercher correctement dans le «*design space*». Tout comme dans la manière de penser un projet traditionnellement, les mesures dans la conception paramétrique tendent à comparer des formes objectivement, et à les évaluer de façon non-intuitive. Dans l'approche traditionnelle de l'architecture, l'architecte modifie lui même manuellement les paramètres d'une forme en utilisant son intuition, son savoir faire, pour le guider vers une forme qu'il jugera satisfaisante. Dans le cas de l'approche paramétrique, l'emploi « *high tech* » de l'intelligence artificielle pour rechercher des formes possibles automatiquement et intelligemment offre de nouvelles possibilités face à l'intuition humaine. Dans ce cas de figure, des mesures numériques strictes doivent être faites régulièrement dans le processus de conception et d'optimisation pour calculer de façon déterministe la validité d'un projet quant à sa légèreté, par exemple. En reprenant l'image des boutons vu auparavant, si les paramètres sont un ensemble de boutons que l'algorithme peut tourner, alors les mesures sont un ensemble d'indications qui renvoient à l'algorithme la performance de chaque forme selon les contraintes et objectifs fixés[7] (Fig.8). Dans une conception architecturale, les mesures peuvent être séparées en 3 catégories. La première concerne des valeurs simples comme la surface ou la hauteur d'un projet, directement et facilement mesurable. La seconde catégorie de mesures concerne des valeurs plus complexes qui peuvent être calculées mais seulement par des simulations informatiques, comme c'est le cas dans l'analyse structurelle d'un projet. Enfin, la troisième catégorie hors du champs calculatoire est celle des valeurs non calculables, comme la beauté d'un projet.

Dans le cadre de la « *légèreté architecturale* » de cet énoncé théorique, la seconde catégorie de mesures nous intéresse particulièrement. En effet, ces mesures complexes utilisants des simulations informatiques peuvent être calculées avec des méthodes statiques, c'est à dire d'un seul coup. Cela est très pratique pour le « *generative design* » nécessitant l'évaluation de beaucoup de formes. Grâce à des formules de bases ou de simples plugin dans Grasshopper que nous verrons par la suite, celles-ci peuvent être intégrées dans le processus automatique de conception. Parmis les méthodes statiques on trouve l'analyse par des éléments finis dit aussi «*FEA*» qui permet de comprendre un modèle en le décomposant en une série d'éléments analysables en une, deux ou trois dimensions (ligne, surface et volume).

---

[7] David Nagyl, «*Designing Measures»,* Generative Design*,* 24/01/2017, https://medium.com

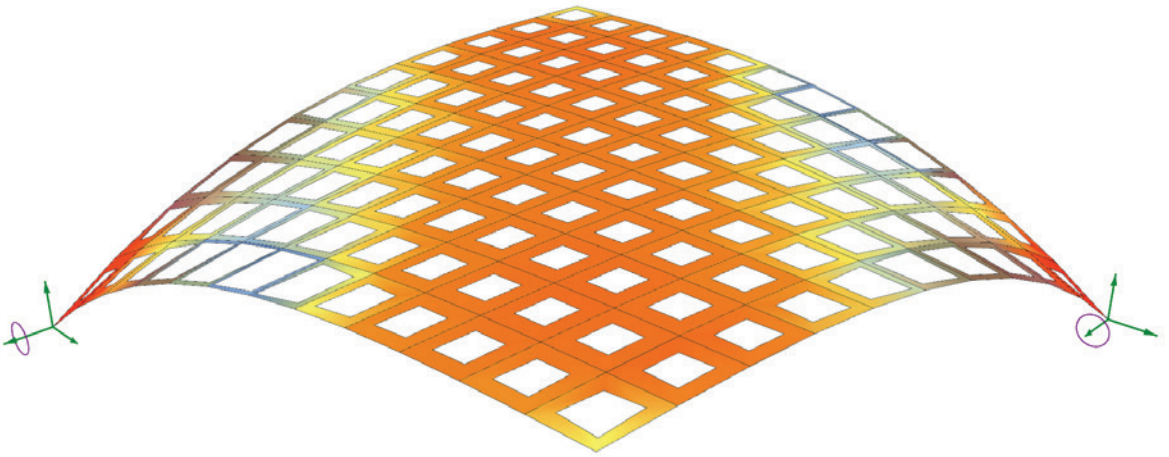


Fig.9. Méthode statique: Analyse FEA

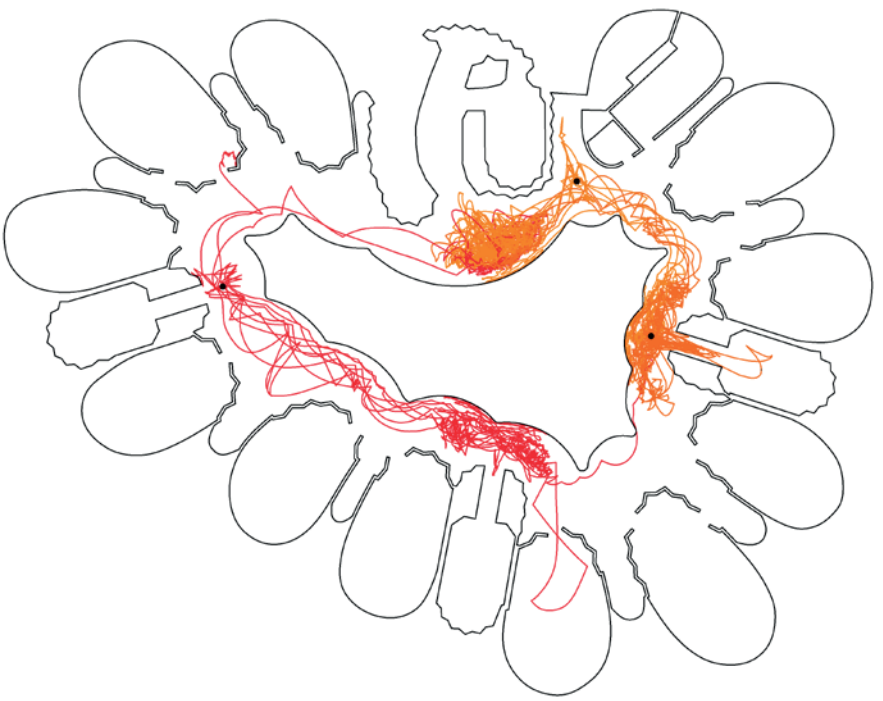


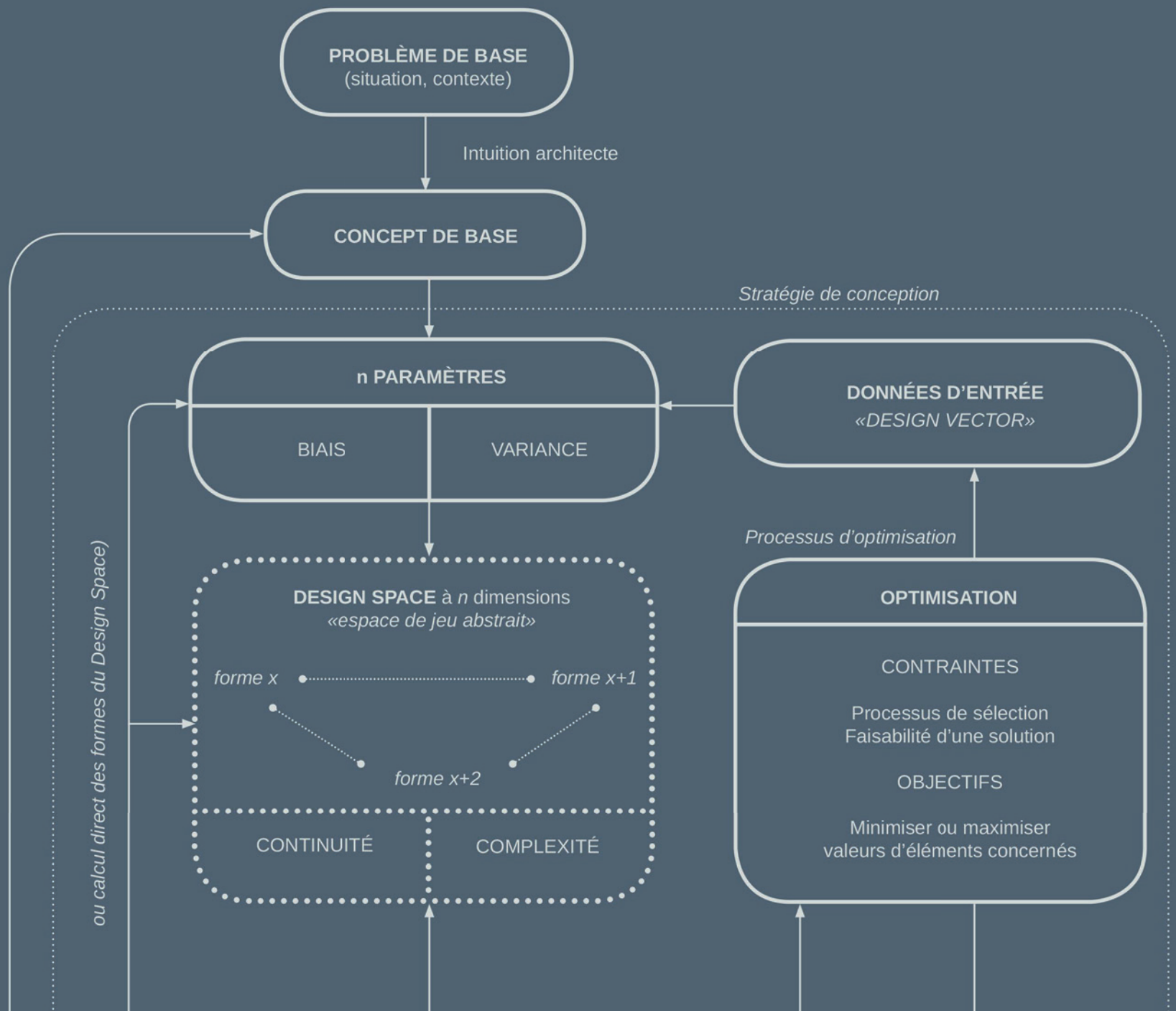
Fig.10. Méthode dynamique: Simulation d’agents

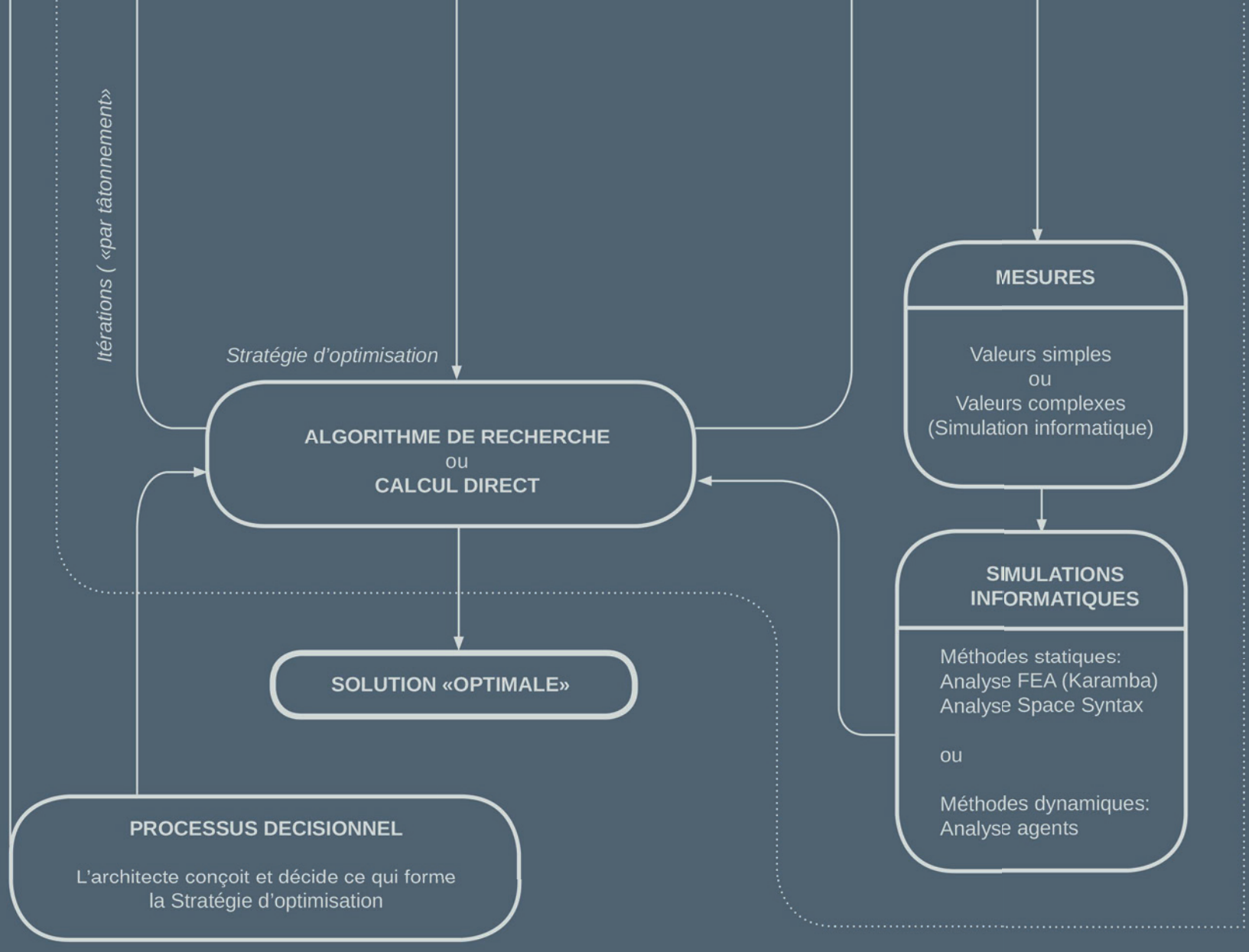
Cette méthode devient très utile dans l'analyse structurelle d'un projet afin de calculer les efforts, les zones sollicitées mais aussi calculer des éléments en faveur de l'environnement, en jugeant du type et de la quantité de matière nécessaire pour construire le projet (Fig.9). Nous verrons également cela par la suite avec le plugin Karamba dans Grasshopper. D'autres types de simulations parmi les méthodes statiques sont possibles telle que l'analyse de déplacement dans un espace, appelée « *Space Syntax* ».

L'autre type de méthode dit «dynamique», correspond à des modèles basés sur de la physique pure. La simulation d'éléments aux propriétés mécaniques définies peut être faite par la « *dynamique des fluides* » ou la technique de « *relaxation* ». La simulation d'agents dynamiques pour le déplacement de foule dans un espace en fait également partie (Fig.10).

En conclusion, nous avons vu comment se déroule théoriquement l'approche paramétrique et comment elle constitue une nouvelle manière de concevoir un projet d'architecture. Le schéma suivant (Fig.11) résume les grandes lignes de cette approche paramétrique. Grâce à elle nous pouvons explorer beaucoup de formes qu'il n'est normalement possible de voir intuitivement dans une conception traditionnelle. Comme l'énonce Danil Nagy « *we want to be able to learn from more designs than it is physically possible to generate or evaluate "by hand".* »[8] Nous avons pu voir à quel point l'approche « *high tech* » paramétrique permet aussi de mesurer la performance d'une forme en fonction de conditions réelles et complexes, sans se détacher de notre vrai monde sur lequel nous exerçons.Désormais, nous allons préciser cette approche en la transposant dans la pratique, autrement dit, quels sont les outils informatiques capables d'appliquer ce nouveau raisonnement et tendre vers un projet « *léger* ».

[8] David Nagyl, «*Designing Measures»,* Generative Design*,* 24/01/2017, https://medium.com


PROBLÈME DE BASE
(situation, contexte)
Intuition architecte
CONCEPT DE BASE
Stratégie de conception
n PARAMÈTRES
BIAIS
VARIANCE
DONNÉES D'ENTRÉE
«DESIGN VECTOR»
Processus d'optimisation
ou calcul direct des formes du Design Space)
DESIGN SPACE à n dimensions
«espace de jeu abstrait»
forme x
forme x+1
forme x+2
CONTINUITÉ
COMPLEXITÉ
OPTIMISATION
CONTRAINTES
Processus de sélection
Faisabilité d'une solution
OBJECTIFS
Minimiser ou maximiser
valeurs d'éléments concernés



APPROCHE PARAMETRIQUE «*HIGH TECH*»

Fig.11.

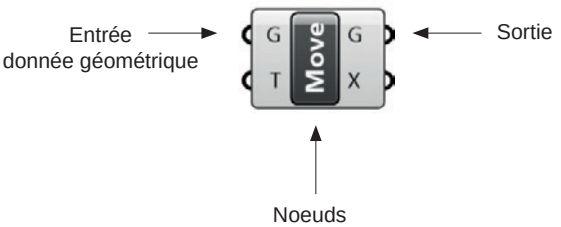


Fig.12. Exemple de «*noeuds conteneur*» dans Grasshopper

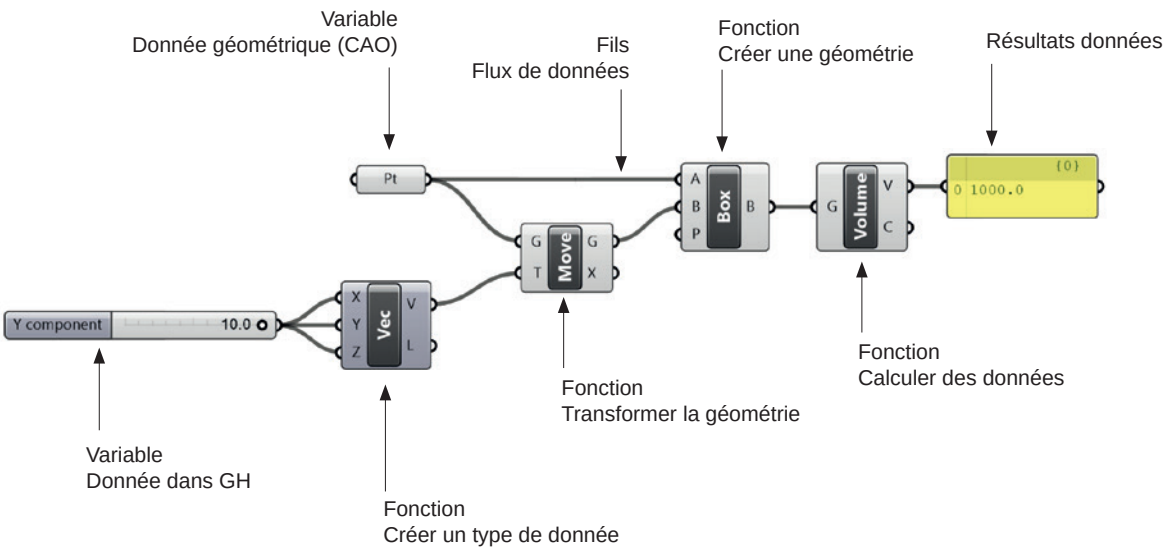


Fig.13. Exemple de script visuel dans Grasshopper

3.2. La légèreté structurelle: introduction à Grasshopper et Karamba.

3.2.1. L'univers de Grasshopper

Les outils de conception paramétrique ont beaucoup transformé le processus architectural et structurel de création, mais une chose est restée constante avec la conception traditionnelle : la tendance d'un projet à changer et à évoluer de la conception à l'achèvement. Le but de ces outils est de faciliter et de contrôler des géométries nouvelles et optimales de bâtiments grâce au « *design space* » pour produire diverses itérations de formes en fonction d'un ensemble de paramètres et de données d'entrée[9]. Cependant, les outils informatiques utilisés dans la conception traditionnelle d'un projet n'ont pas cette capacité puisqu'ils présentent le projet d'une manière statique. Les opérations successives traduisent des représentations 3D de formes physiques de façon singulière, sans lien entre elles et de façon permanente, autrement dit, qui n'ont pas la capacité d'évoluer. Pour réaliser cette approche paramétrique, l'architecte doit être en possession d'un outil de conception dynamique qui établit aussi un cheminement par lequel la forme du projet est créée. Il est alors possible d'avoir une véritable flexibilité du projet avec la capacité de revenir en arrière et modifier les diverses étapes de conception. Il est également possible d'ajouter de nouvelles conditions intermédiaires. Grasshopper (GH) figure aujourd'hui comme l'environnement de programmation idéal qui s'intègre à des logiciels de conception assistée (CAO/DAO). Il utilise une collection de nœuds visuels correspondant à des opérations sur le modèle et des connexions entre les nœuds qui spécifient comment les données circulent entre les opérations. Chacun de ces nœuds exécute des opérations spécifiques avec une ou plusieurs entrées et sorties. Il existe deux types d'entrée pour les noeuds. Une entrée pour des données géométriques qui définit un «*noeud conteneur*» ou une entrée pour des données algébriques qui définit un «*noeud paramètre*» (Fig.12). Les « *nœuds conteneurs* » sont utilisés pour stocker des données ou géométries depuis le logiciel CAO. Les « *nœuds de paramètres* » permettent à l'architecte de spécifier des variables depuis Grasshopper. Les nœuds accueillent diverses fonctions, la première est la création d'une nouvelle géométrie, la seconde est une transformation de géométries existantes et enfin la troisième est une fonction de calculs numériques. Ces nœuds sont connectés les uns aux autres par des « *fils* », qui rendent visuel le cheminement de pensée. Les connections transmettent des données d'un nœud à l'autre sous la forme d'un flux unidirectionnel (Fig.13). L'ensemble des connections définit un modèle géométrique à travers une série d'opérations issues de diverses données qui exclut tout élément arbitraire.

---

[9] David Nagyl, «*Computational Design with Grasshopper»,* Generative Design, 03/02/2017, https://medium.com

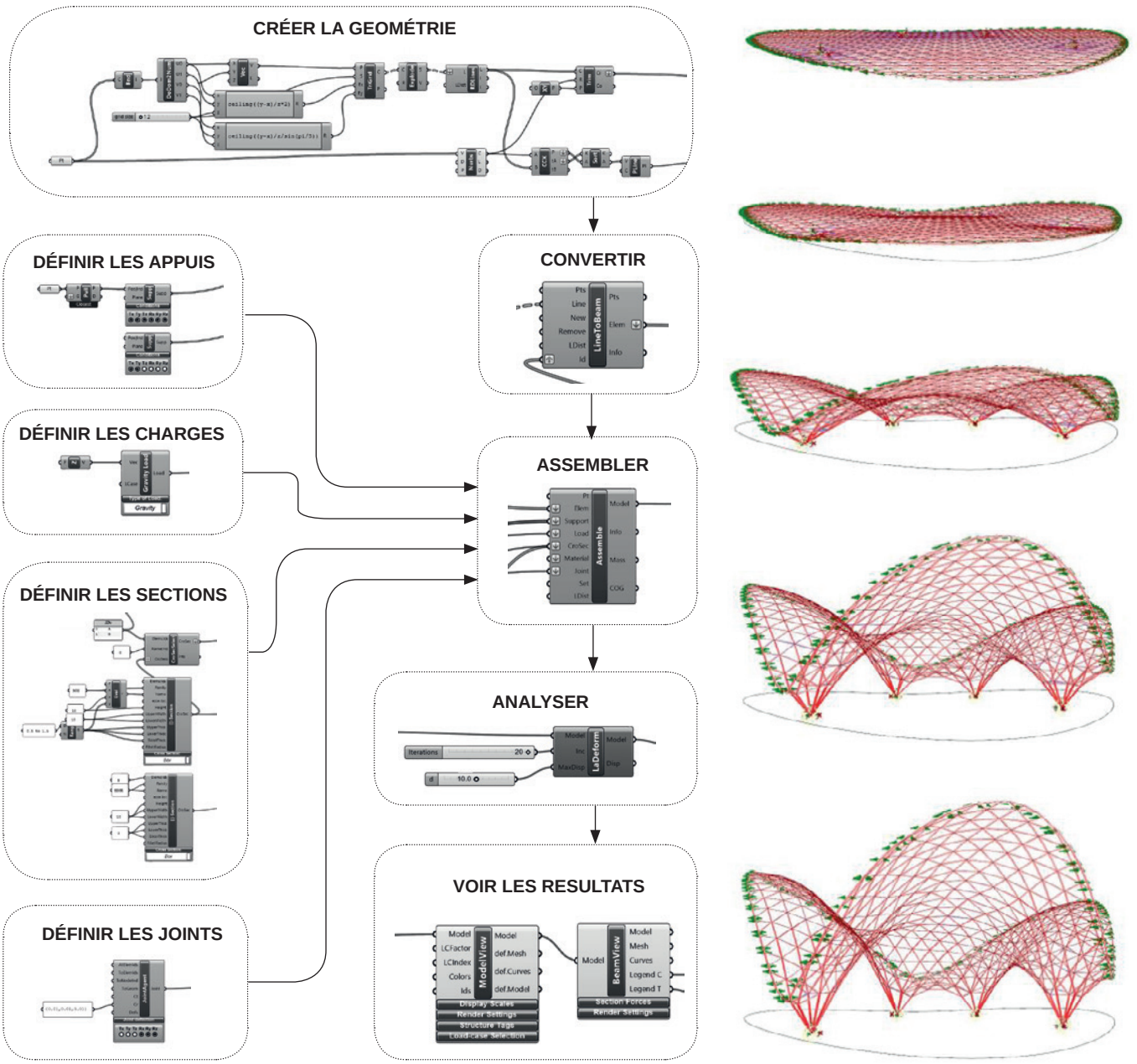


Fig.14. Processus d’analyse structurelle avec Karamba

3.2.2. L'approche technique et structurelle avec Karamba

Après avoir introduit d'une manière générale le fonctionnement de Grasshopper, nous comprenons que l'analyse structurelle « *gelée* » des ingénieurs à la fin du processus de conception n'est désormais plus adaptée. Dans le cadre de la flexibilité permise par Grasshopper, l'évaluation structurelle doit être intégrée dès le début, comme il est possible avec l'un des plugin majeur dans l'analyse structurelle : *Karamba*. En effet, dans ce cheminement de pensée, la prochaine étape logique consiste à connecter ces conceptions paramétriques à des plug-in qui évaluent des aspects non géométriques du projet tels que la physique du bâtiment ou sa performance structurelle. Cela apporte de nouvelles opportunités de collaboration entre architectes et ingénieurs aux premiers stades de la conception. La facilité de tester des alternatives en modifiant un ensemble de paramètres permet l'application d'algorithmes d'optimisation[10]. Précédemment nous avons évoqué les techniques de simulations en informatique et notamment l'analyse d'éléments finis FEA. En représentant des objets physiques comme une série d'éléments pouvant être représentés en une, deux ou trois dimensions, la simulation FEA utilise alors ces éléments pour calculer comment des forces appliquées via des efforts sur la structure se transmettent et se distribuent à travers la forme structurelle. Ces éléments peuvent représenter aussi bien des poutres, des coques que des treillis. En combinant calculs, propriétés de matériaux de chacun de ces éléments, profil de section ainsi que les conditions d'appuis, cette simulation peut analyser et prédire le comportement structurel d'un projet. Cela englobe l'équilibre statique, le déplacement et la déformation de la structure sous les charges,les vibrations structurelles ou encore les zones les plus sollicités aux efforts avec leurs intensités correspondantes. Pour Clemens Preisinger, le créateur de Karamba (voir Annexe), la solution idéale serait une boucle automatisée et rétroactive entre conception architecturale et réponse structurelle en temps réel[11]. Si l'architecte change les paramètres de sa forme, il reçoit immédiatement une réponse concernant l'impact sur la performance structurelle (Fig.14). C'est la force de Karamba comparé aux autres programmes FEA qui sont généralement détachés du logiciel de conception et demandent des navigations longues entre les deux interfaces. Ces outils permettent donc à l'architecte d'exprimer ses idées initiales dans des formes structurelles efficaces et facilement analysables. Du fait de l'interdépendance des éléments et des paramètres, la géométrie peut facilement changer, rendant ainsi la conception architecturale interactive pour étudier ses qualités, ses alternatives et leur optimisation pour faire face aux problèmes posés.

---

[10] David Nagyl, «*Structural analysis with Karamba»,*Generative Design*,* 19/02/2017, https://medium.com

[11] Clemens Preisinger et Moritz Heimrath, article *« Karamba a toolkit for parametric structural design », 2014*

« Lightness for me goes with precision and determination [...]»[12]

[12] Italo Calvino, «*Six Memos for the Next Millennium*», Harvard University Press, Massachusetts, 1988 p.16

3.2.3. Une analogie avec la pensée d'Italo Calvino.

En abordant la logique de pensée de l'approche paramétrique nous pouvons réaliser à quel point cela figure comme une mise en pratique concrète de la question de la « *légèreté* » évoquée auparavant par Italo Calvino. Le regard pesant de la Méduse pourrait être comparé à la lourdeur du langage informatique de nos jours. Cette lourdeur peut alors prendre deux aspects, un aspect technique d'un côté et un aspect plus imagé de l'autre. En effet, l'aspect technique se rattache à l'idée d'Italo Calvino, que la science informatique et ses logiciels ; en un sens l'approche paramétrique de nos jours ; ne peut exercer son pouvoir de légèreté qu'à travers le « *poids* » des ordinateurs. Les logiciels tels que Grasshopper ou Karamba sont alors les donneurs d'actions sur un projet à exécuter dans notre monde, et l'ordinateur, en tant que machine, l'opérateur de ces actions. D'un autre coté l'aspect de lourdeur peut s'envisager de façon imagée dans la complexité même des outils paramétriques et de leur compréhension totale. Pourtant l'analogie avec Persée est toujours valable. Lui qui ne se cache pas du regard de la Méduse mais compose avec en changeant de regard via le bouclier, présente la même attitude que nous pouvons avoir en tant qu'architecte avec l'approche paramétrique. L'architecte ne se défie pas du langage informatique complexe dans lequel nous vivons mais au contraire il tend vers un système visuel et interactif comme Grasshopper qui lui permet de le supporter et de composer avec.

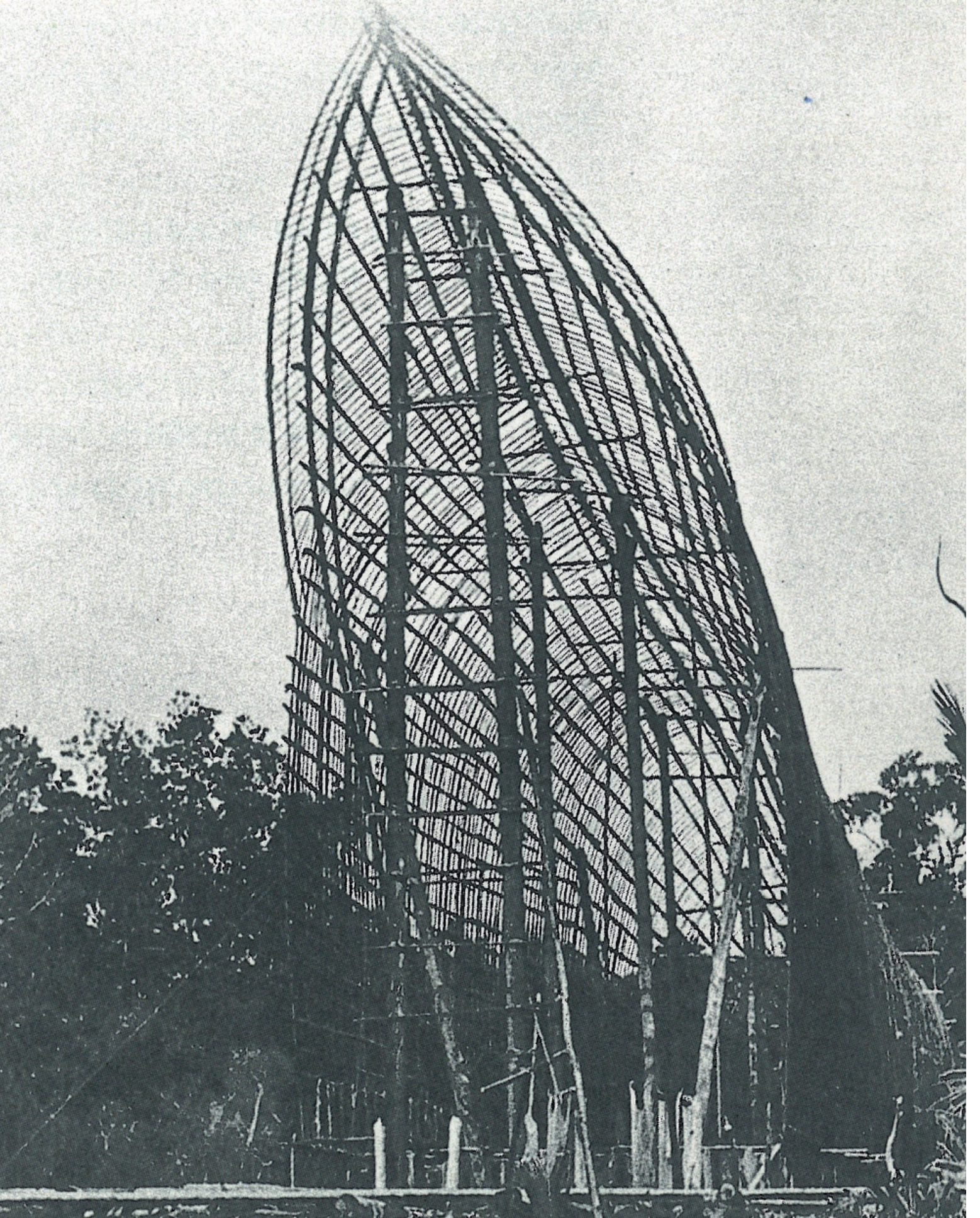
La pensée paramétrique a en quelque sorte adopté cette attitude de Persée à « *voler* ». Par le terme voler, encore une fois, nous entendons changer de regard et de perception sur le monde et son approche. Il ne s'agit pas de s'emporter dans les rêves et l'irrationnel d'Archigram mais au contraire, de penser avec une logique et des méthodes nouvelles de perception que propose la combinaison de Grasshopper et Karamba. Comme l'énoncait Italo Calvino, la science devient un moyen d'aborder le monde sans « *poids* » et le domaine scientifique tient de l'éphémère, de la temporalité et non de l'immuable. L'approche paramétrique dans la même logique fait disparaître la notion d' « *immuable* », en permettant à l'architecte de modifier et optimiser sans cesse son projet. Ainsi de la « lourdeur » naît une « *légèreté mentale* » mais surtout une « *légèreté réelle* » en optimisant la structure et la forme d'un projet. Lorsque Italo Calvino évoquait la notion de « *légèreté* » inséparablement de la notion de « *précision et de détermination* », alors l'approche paramétrique avec Grasshopper et Karamba a clairement du sens.

Liste des figures

Fig.1 p. 39: http://matsysdesign.com
Fig.2 p. 40: https://medium.com, «*The problem of learning*»
Fig.5 p. 44: http://detroit.cbslocal.com & http://super-architects.com
Fig.6 p. 44: https://medium.com, «*The Design Space*»
Fig.9 p. 50: https://karamba.com
Fig.10 p. 50: https://wordpress.com, «*MxD Singapore Studio*», Anna Bielski
Fig.14 p. 56: http://www.karamba3d.com/examples/moderate/large-deformation-of-a-triangular-grid/

3.3. Conclusion sur l’approche paramétrique «high tech».

En proposant une nouvelle manière de penser l’architecture, l’approche paramétrique et les possibilités qu’elle met en avant, s’ouvre sur l’architecture légère de demain. La correspondance entre la pensée de Italo Calvino et l’approche paramétrique validerait-elle cette même approche comme proposition efficace de « *faire véritablement du léger* », pour le « *nouveau millénaire* » comme il l’énonce ? Quoi qu’il en soit cette approche n’est pas la seule pour faire du léger et respecter l’environnement. En effet, l’approche vernaculaire développée depuis des millénaires aux quatre coins du globe a su déjà mettre en avant selon les techniques et matériaux locaux, cette architecture à la fois légère et immersive dans son milieu.



4. L'approche vernaculaire, un cheminement *«Low tech»* vers une architecture légère.

4.1. Les structures légères vernaculaires : reflet d'un mode de vie et d'un savoir faire.

4.1.1. La définition du terme « vernaculaire »

Le mot vernaculaire est une notion complexe à définir dans le vocabulaire architectural. En effet, bien que l'on puisse parfois le comprendre comme le terme « *traditionnel* », en réalité les deux notions diffèrent quelque peu. Selon la définition de Ivan Illich dans son livre « *Le Genre vernaculaire* », « *est vernaculaire dans le droit romain tout ce qui, dans la maison est produit par l'autoconsommation et n'est pas destiné à être mis sur le marché* »[1]; le terme latin « *vernaculus* » signifiant « *indigène, domestique* » lui même emprunt du terme « *verna* » désignant « *l'esclave né dans la maison*»[2]. Ainsi le terme vernaculaire s'apparente à la contingence propre d'un lieu et des éléments qui y sont présents. Comme l'énonce B.Rudofsky *« à défaut de terme spécifique, nous dirons que cette architecture, selon le cas, qu'elle est vernaculaire, anonyme, spontanée, indigène ou rurale. »*[3].

La notion de localité prend en compte le climat, la géographie mais surtout le type de matériaux environnants sur place. Ces matériaux disponibles directement autour témoignent alors d'une sauvegarde et évolution des savoir-faire quant à leur utilisation dans l'architecture notamment (Fig.1). Bien que ce terme exprime un certains reflet de la culture locale, celui ci n'est pas un élément décisif dans la définition du terme « *vernaculaire* », à la différence du terme « *traditionnel* » qui lui s'apparente clairement à une culture précise. L'utilisation d'un même matériau local en divers points du globe peut amener en raison de ces capacités techniques intrinsèques à des similarités d'assemblages vernaculaires, bien que la culture et ses traditions en tant que telles, soient différentes et se conçoivent en diverses formes architecturales.

---

[1] Ivan Illich, «*Le Genre vernaculaire*», Seuil, Paris, 1983, traduit de l'anglais (1982)

[2] Pierre Frey, «*Learning from Vernacular*», Actes sud, 2010, p.13

[3] Bernard Rudofsky, « *Architecture sans architectes* », traduction Sté Nlle des éditions du Chêne, 1980 p.1

◀ Fig.1.

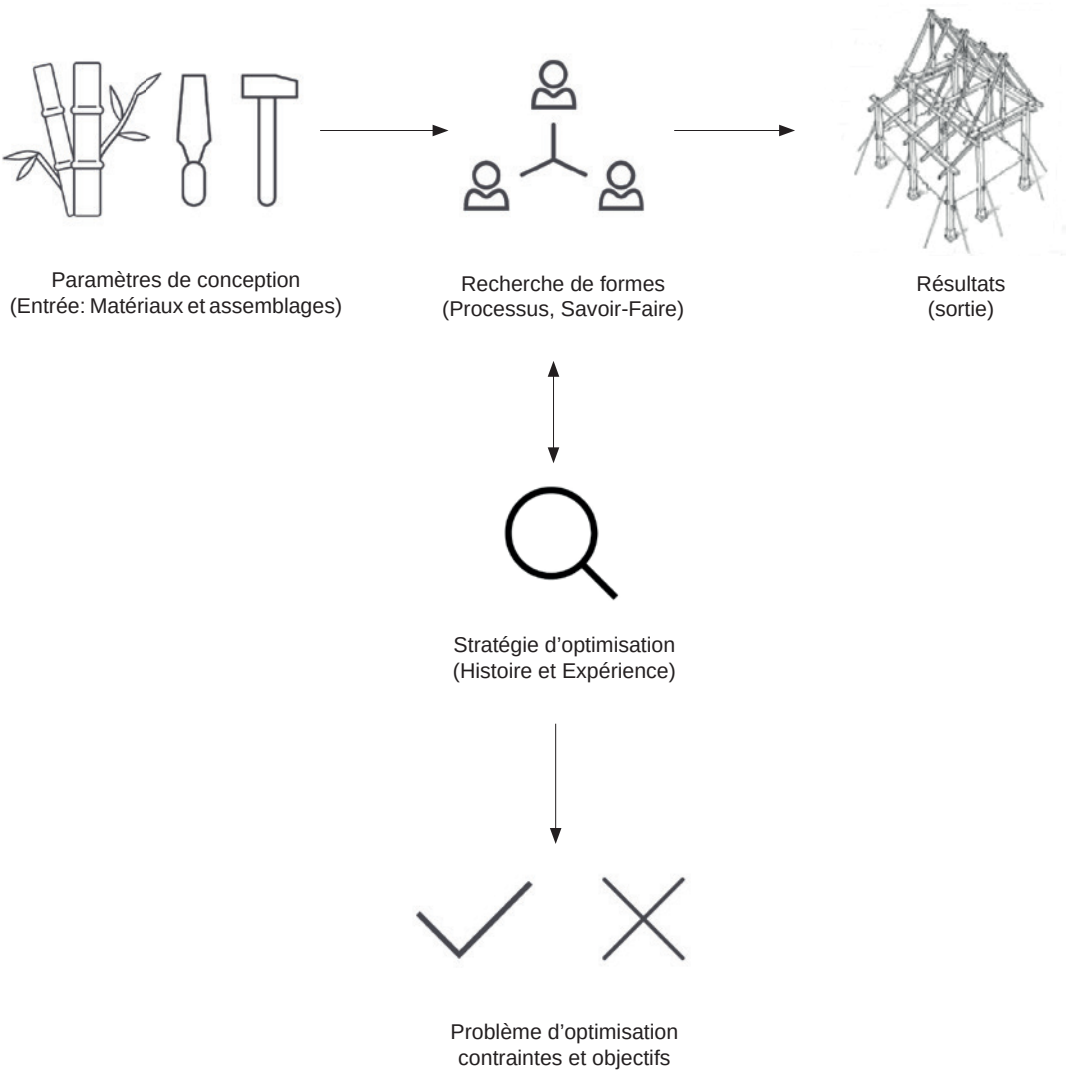
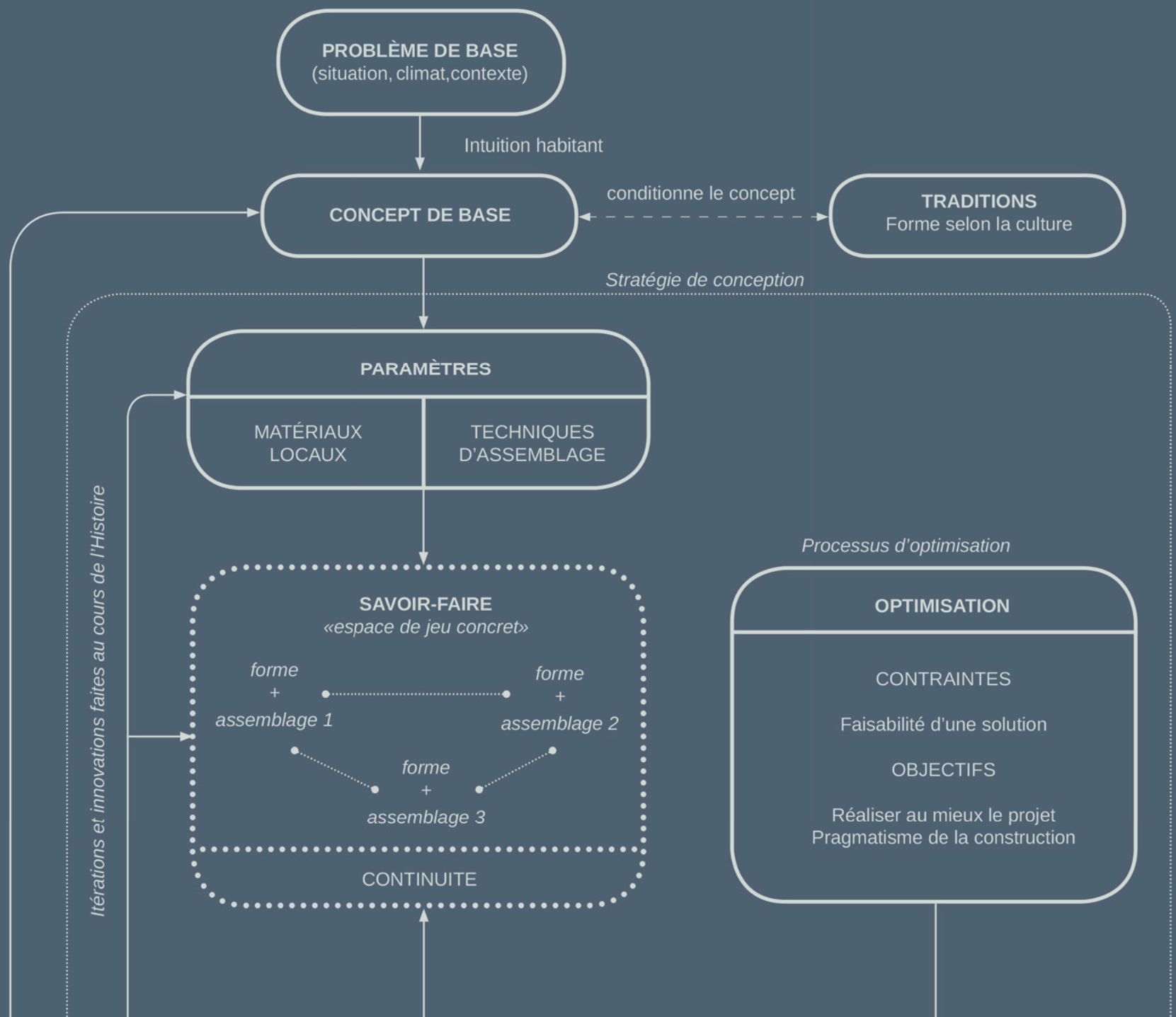
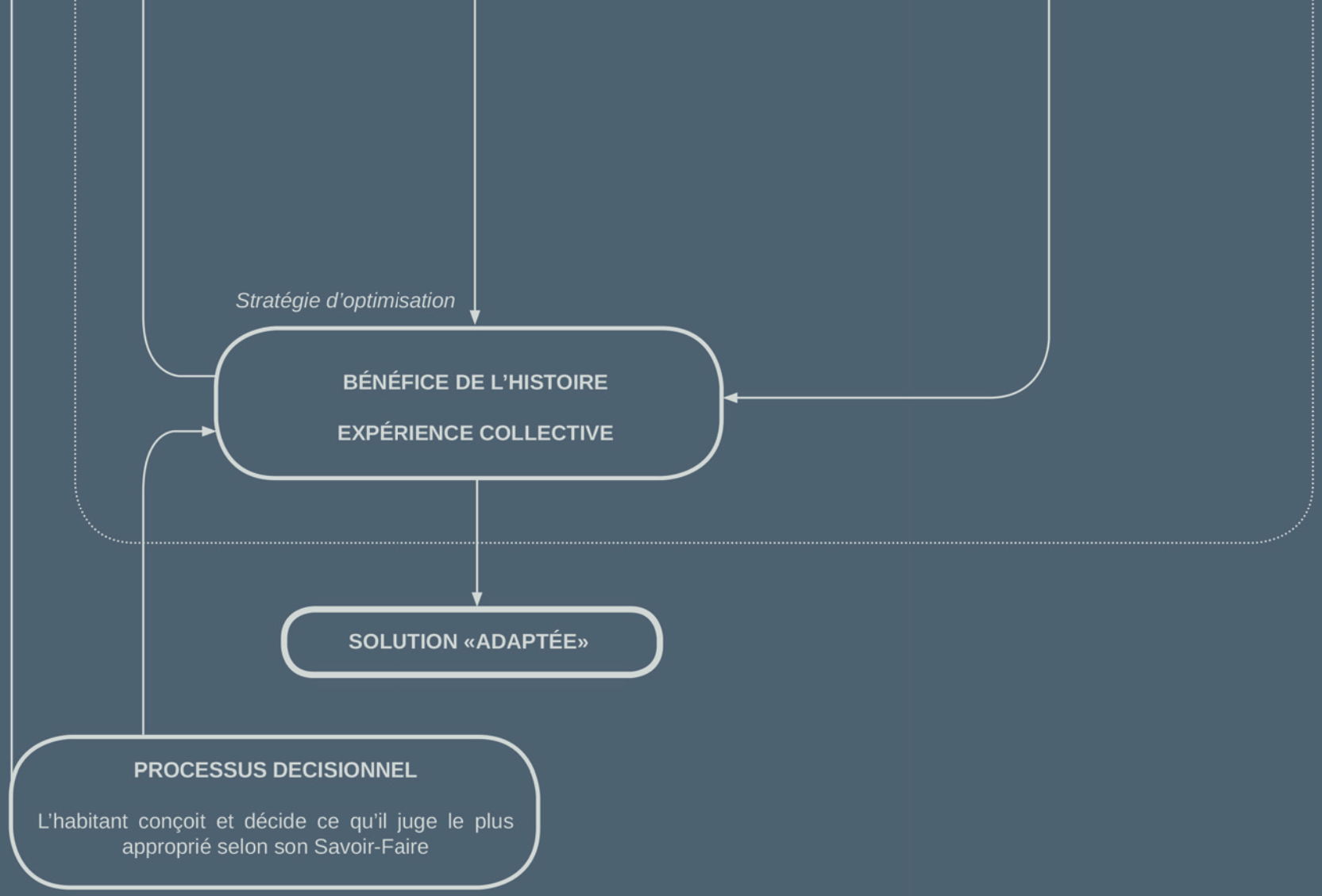


Fig.2.La définition d'un problème d'optimisation et d'une stratégie

4.1.2. L'approche et l'architecture *« vernaculaire ».*

L'approche vernaculaire constitue un cheminement de pensée qu'il est possible d'identifier. La base de cette approche se définit tout d'abord par la formulation d'un problème de base qui tient d'une localité, de son environnement et de son climat. Face à ce problème, l'habitant, par une sorte de processus intuitif tend à imaginer un « *concept de base* » pour le projet qu'il souhaite établir dans la situation qui lui est présentée, comme dans l'approche paramétrique. Ce « *concept de base* » se définit comme étant une idée abstraite du projet et de ses entités majeures constitutives. Par exemple, dans le cas d'un pays au climat tropical, l'habitant aurait cette intuition quasi naturelle pour son projet de développer un large toit protecteur pour se couvrir du soleil ou de la pluie intense dans sa région. Une fois ce concept imaginé dans les grandes lignes, la stratégie de conception vernaculaire peut se mettre en place. Pour concrétiser ce projet, l'habitant issu de cette localité particulière possède divers paramètres à disposition, définissables en deux éléments. Le premier correspond aux matériaux locaux issus de l'environnement dans lequel il se trouve et qui forment en soit la matière première du projet vernaculaire. Le second élément représente les techniques constructives ou plus précisément les techniques d'assemblages permises par ces matériaux locaux et leur qualités intrinsèques. Ces paramètres définissent alors un « *espace de jeu concret* » pour reprendre l'analogie avec le design space comme « *espace de jeu abstrait* » vu précédemment dans l'approche paramétrique. Cet « *espace de jeu concret* », représente ce que l'on peut appeler les « *savoirs-faire* », répartis au sein de la collectivité locale et énonce en somme toute les possibilités vernaculaires connues et applicables au projet (Fig.2). On peut imagnier qu'à ces savoirs-faire se mêlent les « *traditions* » qui définissent alors des formes particulières de projet selon les cultures, avec une esthétique différente. La connaissance des possibilités d'assemblage avec le matériau local au sein d'un savoir-faire sous entend également une certaine continuité entre les diverses possibilités qui sont identifiables et comparables. D'une façon plus générale, cette stratégie de conception vernaculaire ne possède pas de véritable méthode pour trouver une solution de projet adaptée. Elle s'effectue, comme énoncé précédemment, grâce au bénéfice de l'Histoire et de l'expérience collective sur le long terme et par une série d'itérations et d'innovations. Cette expérience qui forme par elle même une stratégie d'optimisation sur le long terme, permet ainsi à l'habitant de juger quelle forme, quels matériaux et quels assemblages sont les plus adaptés pour aboutir à une solution respectant des contraintes et des objectifs fixés. Ces contraintes sont déterminées par la faisabilité d'une solution, et les objectifs par cette idée de réaliser le projet au mieux et de la manière la plus pragmatique qu'il soit .Cette approche vernaculaire «*low tech*» est résumée dans la Fig.3 suivante.


PROBLÈME DE BASE
(situation, climat,contexte)
Intuition habitant
CONCEPT DE BASE
conditionne le concept
TRADITIONS
Forme selon la culture
Stratégie de conception
PARAMÈTRES
MATÉRIAUX LOCAUX
TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE
Itérations et innovations faites au cours de l'Histoire
SAVOIR-FAIRE
«espace de jeu concret»
forme + assemblage 1
forme + assemblage 2
forme + assemblage 3
CONTINUITE
Processus d'optimisation
OPTIMISATION
CONTRAINTES
Faisabilité d'une solution
OBJECTIFS
Réaliser au mieux le projet
Pragmatisme de la construction



APPROCHE VERNACULAIRE «*LOW TECH*»

Fig.3.

« *j'ai toujours pensé que la matérialisation de l'architecture n'a pas lieu au moment où elle se dessine, mais au moment où elle se construit. Sinon, elle n'a pas de sens. L'architecture vernaculaire, née sur place, façonnée par les contraintes, est par définition plus contextuelle. Sa force, en même temps que sa fragilité, vient du fait qu'elle se situe dans la permanence et non dans l'événement.* »[4]

« *[...] ces techniques comprennent des savoirs-faire profonds, étendus et complémentaires. […] Le nombre et la diversité, mais surtout la qualité comme l'efficacité avérées de ces savoirs et de ces savoir-faire, sont à mettre en rapport avec le fait qu'ils se sont constitués au cours des siècles, puis se sont transmis de génération en génération et sont disponibles gratuitement au sein des sociétés qui les ont développés. Ils nous rappellent que l'observation empirique, la collecte, le traitement de grandes quantités d'informations et leur corrélation ne sont en rien l'apanage exclusif des scientifiques modernes et de leurs laboratoires.* »[5]

« *[…] un bâtiment conçu par un amateur sans aucune formation dans l'architecture ; l'individu aura été guidé par une série de conventions développées dans sa ville ou dans son village, accordant peu d'attention à ce qui peut être en vogue. La fonction du bâtiment serait le facteur dominant, les considérations esthétiques, bien que présentes dans une certaine mesure, étant tout à fait minimes. Les matériaux locaux seraient bien entendu utilisés, d'autre matériaux étant choisis et importés de manière tout à fait exceptionnelle* ».[6]

« [...] *tout au plus accorde-t-on à cette architecture une certaine beauté – purement accidentelle. Aujourd'hui, il nous faut reconnaître qu'elle est le fruit d'un rare bon sens présidant à la recherche de solutions de problèmes pratiques.* »[7]

---

[4] Pierre Frey, *«Learning from Vernacular»*, Actes sud, 2010, p.13

[5] Pierre Frey, *«Learning from Vernacular»*, Actes sud, 2010, p.38

[6] Ronald Brunskil*, «An* Illustrated Handbook of Vernacular Architecture»,Faber & Faber, Londres, 2000, p.27-28

[7] Bernard Rudofsky, « *Architecture sans architectes* », traduction Sté Nlle des éditions du Chêne, 1980, p.4

Pour Pierre Frey, dans la construction d'une architecture vernaculaire «*chacun devient un maître bâtisseur vernaculaire en grandissant dans une initiation à l'autre, en devenant une habitante, un habitant.*»[8] L'architecture vernaculaire ne semble donc pas être une architecture de spécialistes. A cela se nuance l'architecture traditionnelle qui comporte des éléments d'une dimension plus élevée ou savante. La question stylistique et esthétique est clairement pensée avec une certaine symbolique, c'est une architecture « *codifiée* », si l'on reprend le terme de Bernard Rudofsky.[9] En outre, l'approche vernaculaire est issue d'une certaine spontanéité qui la rend belle de façon presque accidentelle et regorge de solutions innovantes, efficaces et adaptées à son environnement. L'architecture « *vernaculaire* », de fait, est une architecture du quotidien et de contraintes liées à ce qui se trouve autour d'elle, c'est à dire son environnement et l'usage de ses habitants. Les habitants ont « *[…] par nécessité, dû déployer des stratégies pragmatiques*»[10] pour construire leur habitat selon un contexte et des matériaux mis à disposition « *au lieu de s'évertuer, comme nous, à dominer la nature [...]* »[11]. Les diverses itérations notamment dans la question structurelle et technique se lissent dans le temps et dans la pratique. Ces itérations sont alors la preuve d'une familiarisation progressive avec les matériaux locaux qui constituent en somme la clé de l'architecture vernaculaire. De ce fait, c'est une architecture en immersion dans un environnement. Dans le cadre d'une matérialité locale et de ses techniques d'utilisation, la transmission du savoir-faire est centrale pour garantir leur pérennité. Ce savoir «[...] *est le fruit d'une entreprise collective et cumulative* ».[12]

Ainsi dans des régions riches en végétation, les habitants ont su développer une architecture vernaculaire essentiellement tournée vers le bois ou le bambou, comme cela a pu être le cas dans la majeure partie de l'Asie (Japon, Chine, Vietnam, Philippines, Indonésie etc...). En l'absence de cette végétation, il fallait alors se tourner plutôt vers la pierre ou la terre cuite, abondantes, comme par exemple dans les cultures européennes, arabes ou d'Afrique du Nord. Ce constat révèle plusieurs aspects de l'architecture vernaculaire. Le premier, c'est sa durabilité puisqu'elle n'épuise pas en théorie les ressources locales capables de se régénérer. Le second, particulièrement intéressant pour cet écrit, c'est la distinction entre des structures vernaculaires légères et des structures vernaculaires massives qui ont formé l'architecture, en fonction des matériaux locaux à disposition et qui peuvent servir d'inspiration pour la nouvelle architecture.

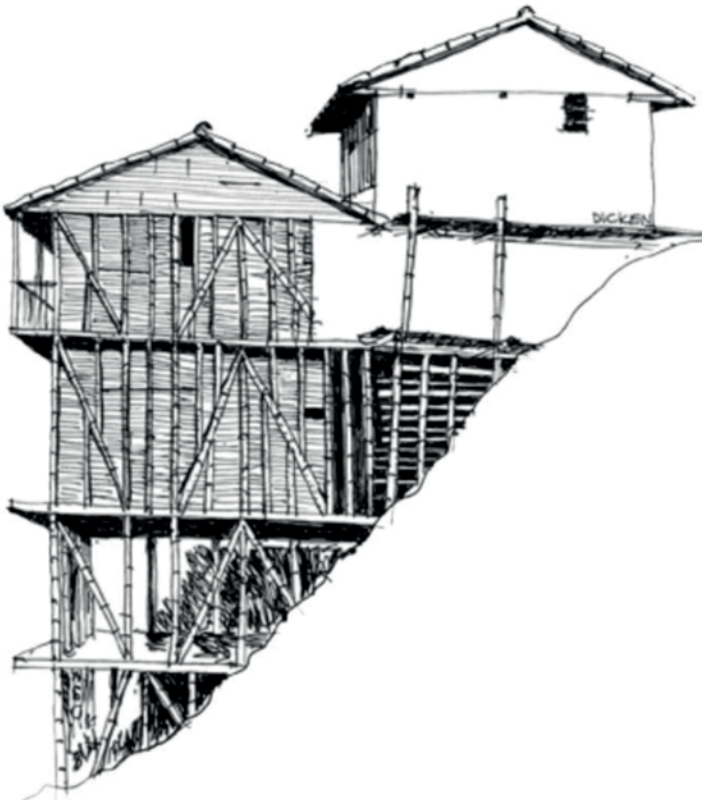
---

[8] Pierre Frey, *«Learning from Vernacular»*, Actes sud ,2010, p.75

[9] Bernard Rudofsky, « *Architecture sans architectes* », traduction Sté Nlle des éditions du Chêne, 1980, p.1

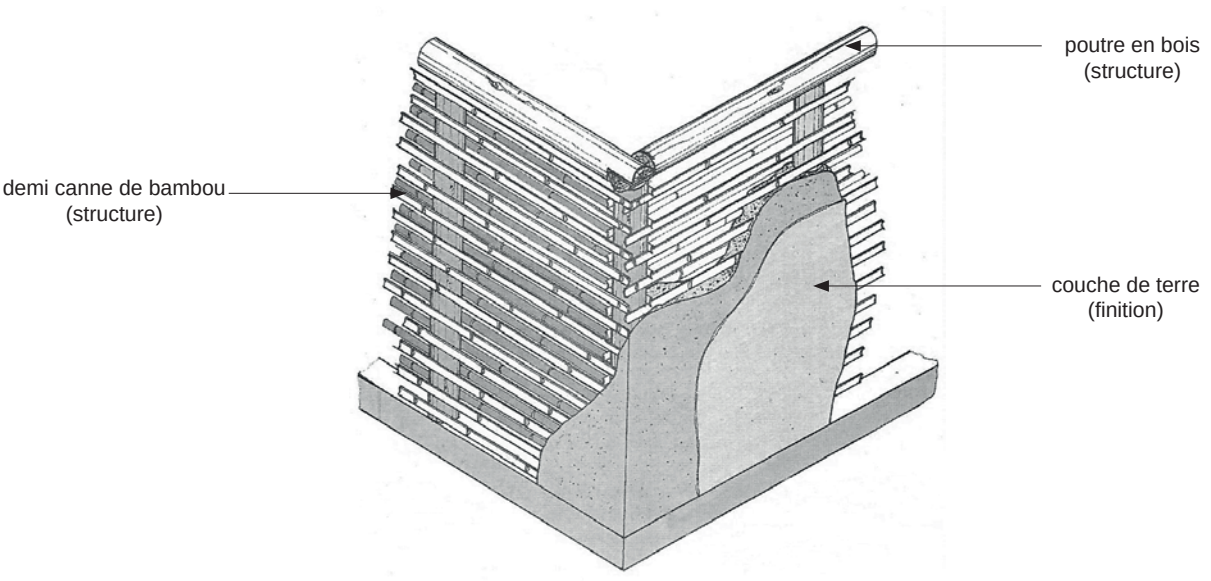
[10] Pierre Frey, *«Learning from Vernacular»*, Actes sud, 2010, p.13

[11] Bernard Rudofsky, « *Architecture sans architectes* », traduction Sté Nlle des éditions du Chêne, 1980, p.3



▲ Fig.4. Maison en *Bahareque*, Colombie

▼ Fig.5. Détail constructif du *Bahareque*



4.1.3. Des exemples de structures vernaculaires légères.

Les structures vernaculaires légères devaient en partie leur légèreté grâce à l'utilisation de matériaux tels que le bois, le bambou, la paille ou encore le palmier. Bien que ces matériaux étaient intrinsèquement légers, cela n'était pas la seule caractéristique des structures vernaculaires légères. En effet, leur légèreté étaient en partie dû aux techniques de construction et d'assemblage dites « *sèches* », c'est à dire sans l'utilisation importante d'un liant comme l'argile par exemple. Dans ce cas, la question des joints et nœuds d'assemblages étaient primordiale pour édifier le bâtiment, que ce soit par l'utilisation de cordes, de tissages ou bien de pièces annexes comme des cales.

D'une manière générale, les structures légères vernaculaires à la fonction porteuse ont souvent été perçues comme des structures « *cadre* » dit aussi « *frame structure* ». Elles sont formées le plus souvent d'une série d'éléments linéaires connectés mutuellement de bouts en bouts pour former une structure en trois dimensions.[12] Ces structures étaient utilisées pour leur rapport élevé poids-résistance, capable de reprendre d'importantes charges et fournir un support relativement efficace pour couvrir de larges zones si besoin, et en utilisant un minimum de matériaux. Pour les réaliser, il était nécessaire d'utiliser des matériaux avec un bon rapport poids-résistance aussi, capable de supporter des contraintes de déformations et d'être relativement facile à travailler, que ce soit en terme d'assemblages ou d'obtention de formes droites. Le bois tout comme le bambou ont été largement utilisés dans l'architecture vernaculaire pour bâtir ces squelettes structurels. Ces structures n'étaient pas seulement le résultat d'un pragmatisme constructif, mais aussi celui de questions pratiques de survie dans le milieu. En effet, la possibilité facile et efficace de bâtir des bâtiments sur piles grâce aux «*frame structures*», répondait au départ à des questions de détachement du sol face à de possibles dangers. Cela permettait également de se détacher de la topographie accidentée pour bâtir sur un nouveau sol plat ou encore pour optimiser le confort intérieur en favorisant la ventilation ou le chauffage.[13] Prenons l'exemple de la construction « *bahareque* » en Colombie (Fig.4). Cette technique est née en réponse à la sismicité de la zone cafetière à l'ouest du pays, là où les construction traditionnelles en « *tapia* » et pisé ne résistaient pas aux tremblements de terre. La construction en « *bahareque* », qui signifie « *mur de cannes et de terre* », utilisait un mélange de bois pour la structure porteuse principale et de bambou pour la seconde avec une couche de terre entre les deux (Fig.5). Ce type de construction modeste a permi de construire des maisons sur plusieurs étages adaptées aux

---

[12] Oliver P. , «*Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World*»,Cambridge University Press, 1997

[13] Lewis, M « *Building on piles* », « *Vernacular Heritage and Earthern Architecture*», 2014

▲ Fig.6. Hutte Yalawapiti, Brésil

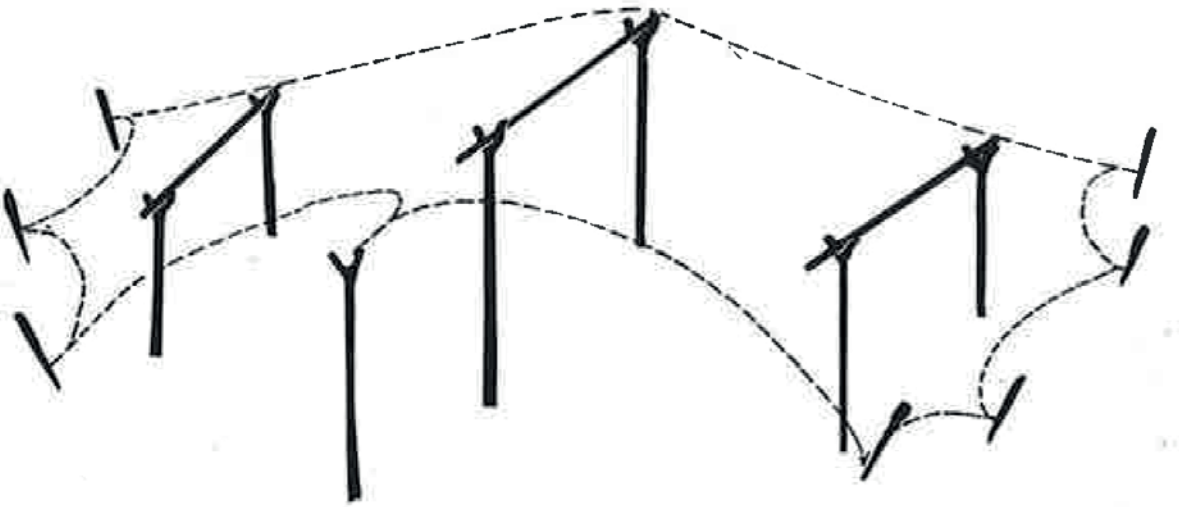
▼ Fig.7. Tente de Nomades noirs du Sahara

terrains pentus du pays. Initialement c'était une construction éphémère utilisée par des habitants qui n'étaient pas en mesure de construire avec des matériaux plus nobles comme l'adobe. Ce type de structure légère était utilisée par nécessité pour répondre rapidement et économiquement à des besoins, ne pouvant construire massivement en brique comme dans la tradition espagnole. Ce genre de structure, notamment dans le cas des sols suspendus présentaient également d'autres avantages comme celui d'une possible extension ou mobilité du bâtit qui ne reste pas figé dans le temps, tout en pouvant s'édifier sur une courte durée.

D'autres exemples, comme les maisons ancestrales « Batak » en Indonésie, étaient fabriquées à la fois de bois et de bambou pour constituer des structures légères détachées du sol et dont le toit s'élançait magistralement de plusieurs mètres. Ce système de légèreté grâce aux structures cadres sur pilotis servait également pour les greniers de riz en Indonésie par exemple, pour le protéger des intempéries et des dangers au sol. En revanche, le système sur pilotis n'était pas une étape obligatoire pour construire rapidement et de façon légère. Effectivement, d'autres structures cette fois-ci posées au sol démontrent cette persistance de la légèreté dans l'architecture vernaculaire bien qu'il s'agisse de mégastructures. Les maisons Yawalapiti au Brésil (Fig.6), les huttes du lac Malawi en Tanzanie ou encore le « Dawi » (lieu de rencontre public, Fig.1) en Nouvelle-Guinée représentent des structures extraordinaires et vernaculaires dont la hauteur pouvait dépasser les 20 mètres[14].

De plus, la versatilité des structures légères vernaculaires a été l'un des aspects majeur des abris nomades justement parce que leur légèreté permettait un transport facile. Le système des tentes nomades du désert ou bien des tipis dans les cultures indiennes d'Amériques sont un bel exemple de ce genre de structure, mais aussi d'enveloppe légère avec l'utilisation de tissu tendu entre les éléments structurels pour couvrir du soleil et apporter de l'ombre (Fig.7). De cette façon, ces structures légères rencontraient une dimension sociale et culturelle. De part leur nature éphémère, elles supportaient un mode de vie et représentaient une solution rationnelle à des besoins déterminés par des activités économiques ou un lieu donné. Dans l'architecture nomade et du transports de bêtes par exemple, les abris légers vernaculaires sont apparus pour répondre à ces besoins spécifiques de mobilité. De la même manière, les peuples nomades du Triangle Doré, comprenant une partie du Sud-Est de la Chine, la Birmanie et le Nord de la Thaïlande, utilisaient largement des assemblages faits de simples liens maintenant des structures cadres en bambou. Les structures étaient érigées pour une dizaine d'années, le temps de développer une mono-agriculture sur place suffisante pour

[14] Alexander von Vegesack, Simón Vélez, «*Grow your own house*», Vitra Design Museum , 2000, p.134-142



▲ Fig.8. Structure d’une tente de Nomades noirs du Sahara

▼ Fig.9.

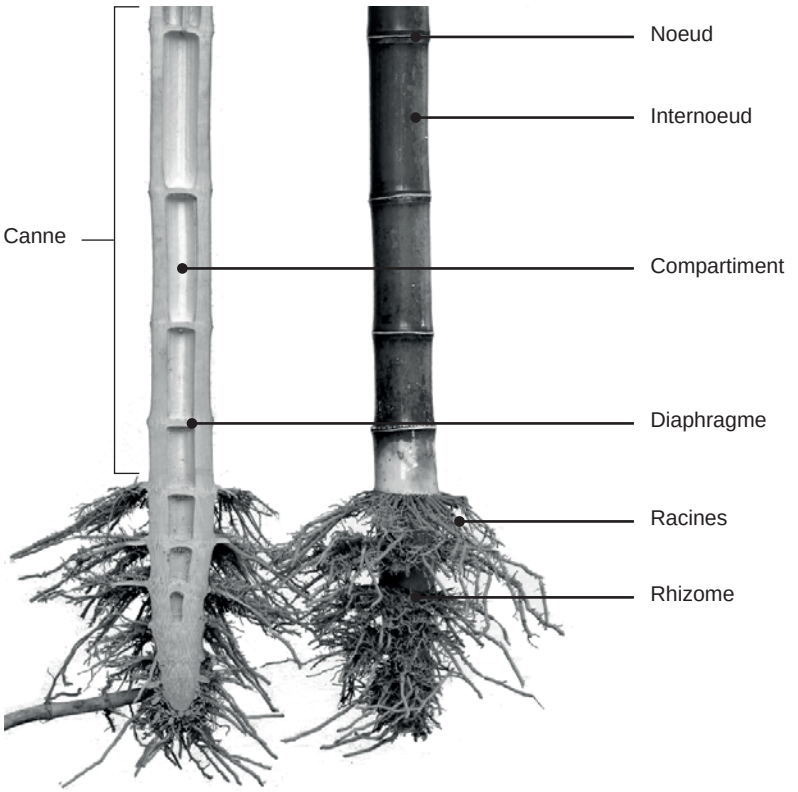
subsister. Ensuite, les structures étaient désassemblées et remontées dans un nouveau lieu propice au développement de cette agriculture.[16] Finalement en partant d'un point de vue bioclimatique, les structures légères vernaculaires ont été particulièrement profitables pour des bâtiments dans les climats chauds et humides tels qu'en Asie ou en Amérique du sud. Ces structures avaient l'avantage de procurer à la fois de l'ombre et de la ventilation naturelle, deux stratégies passives des plus efficaces dans les pays avec une chaleur et humidité constante. En effet, en utilisant ces structures cadres légères comme squelette de support (Fig.8), l'enveloppe non porteuse pouvait être respirable par la présence continue de flux d'airs, tout en protégeant du soleil et de la pluie. De même, en utilisant des matériaux locaux combinés avec des techniques d'assemblages « *sèches* », le cycle de vie du bâtiment pouvait perdurer. Les matériaux facilement accessibles permettaient une régénération du bâti dans une courte durée et sans pollution de part leur recyclage. Les bâtiments pouvaient être facilement maintenus, modifiés ou démolis, grâce à leur assemblages démontables et remplaçables. Dans tout les cas, l'engagement des ressources mises en œuvre était optimisé pour l'utilisation requise. Cette gestion du cycle de vie du bâtiment, sa durabilité et son écologie sont des questions cruciales pour notre situation actuelle.

Ainsi comme nous l'avons vu le bambou et le bois ont joué un rôle important dans l'architecture vernaculaire légère. Cependant le bambou offre de nombreux avantages face au bois, c'est la raison pour laquelle il sera développé dans la suite de cet écrit, comme emblème de la légèreté et du « *low tech* ».

4.2. Le bambou, un matériau léger et ancestral tourné vers l'avenir.

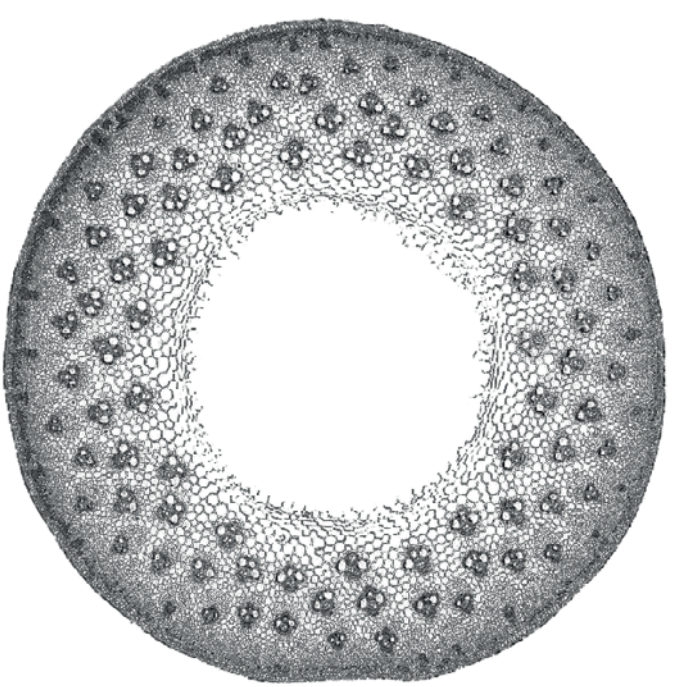
4.2.1. Nature et contexte.

Du point de vue botanique, le bambou fait partie des plantes vivaces ligneuses avec un feuillage persistant. Bien qu'il soit issu de la famille des « Herbe plantes » comme le riz, le maïs ou la canne à sucre, le bambou possède grâce à ses fibres, une force, une stabilité et une durabilité qui font de lui un élément extraordinaire de la nature (Fig.9). De plus, sa capacité de photosynthèse pour une plante est parmi les plus importante. Sa capacité de croissance,elle, défit toute concurrence sur la planète, en partie grâce à sa composition biologique. Cette composition comprend les rhizomes, les cannes ou chaumes et enfin les branches et leurs feuillages. Son taux de croissance varie selon plusieurs facteurs comme la qualité du sol, le climat mais surtout l'espèce de bambou. Ainsi certains bambou comme le « *Bambou Nain* » peuvent grandir de seulement quelques centimètres alors que d'autres peuvent atteindre plus de 30 mètres avec un diamètre de canne



▲ Fig.10. Composition biologique du bambou

▼ Fig.11. Section de bambou



considérable avoisinant les 30 centimètres comme c'est le cas avec la « *Guadua* » ou le « *Bambou Géant* ». Le bambou doit sa croissance impressionnante grâce à un vaste réseaux souterrain de rhizomes dépendants, pouvant pousser en moyenne de 60 cm en 24 heures jusqu'à plus d'1,2 mètre dans certains cas[15]. Ces rhizomes sont fondamentaux pour la plante car ce sont eux qui fournissent les nutriments aux chaumes dit aussi « *cannes* » de bambou, mais assurent également le développement et la reproduction de cette plante. Selon le développement de ce réseau, le bambou ne s'étendra pas de la même manière.

On distingue deux grandes catégories de rhizomes : les rhizomes dit « *agglutinants* » ou « *pachymorphes* » présents majoritairement dans les régions tempérées et ceux dit « *courants* » ou « *leptomorphes* » présents plutôt dans les régions tropicales. Les rhizomes « *agglutinants* » ont tendance à se propager lentement et sur de faibles distances, avec des réseaux de racines progressifs pour donner lieu à de nouvelles chaumes en surface. Les rhizomes « *courants* » au contraire se développent rapidement, sur de longues distances et dans de nombreuses directions en profondeur. De ce fait, certaines espèces de bambou vont s'étendre sur plusieurs mètres par année alors que d'autres resteront plus ou moins au même endroit. Les bambous avec un système de rhizomes « *courants* » doivent être cultivés en les canalisant sinon leur comportement invasif peut poser de nombreux problèmes aux écosystèmes environnants.

Les cannes de bambou se constituent de nœuds, d'internoeuds et de diaphragmes internes. Le réseau vasculaire de fibres se développe le long de la canne et se concentre successivement au niveau des divers nœuds de développement. A ce même niveau, se trouve chaque fois un diaphragme interne qui connecte les parois externes et renforce le tout en séparant la canne en compartiments (Fig.10). En analysant plus précisément une section de bambou on peut distinguer une zone externe et dense de fibres qui représente environ 30% de la surface, et une zone interne moins dense qui représente les 70% restants[16] (Fig.11). En raison de cette structure biologique, les cannes de bambou sont très résistantes, puisqu'à la différence du bois, c'est l'extérieur qui est véritablement dur et l'intérieur qui est tendre. Cet avantage structurel est renforcé par la section tubulaire et évidée du bambou qui le rend encore plus efficace en terme de support de charges. Au fur et a mesure de la hauteur, la canne de bambou s'amincit en épaisseur de parois et en diamètre. Ce phénomène est d'autant plus marqué avec les petites cannes, ce qui explique l'utilisation de cannes de plus grandes dimensions pour la construction par exemple.

---

[15] An.nonymous, «*Bambooklet*», 2010, p.12

[16] Ibidem p.18

Fig.12. Implantation du bambou dans le monde

Il est à noter que la canne de bambou émergente du sol avec un certain diamètre le conservera pour toute sa vie, de même que la hauteur atteinte dans ses premières années. Après les 3 premières années de croissance, la canne commence à se lignifier, le réseau vasculaire se ferme, autrement dit à se charger en acide silicique. La peau externe se durcie, change progressivement de couleur pour brunir et devient alors utilisable en tant que matériau de construction. Le bambou passe d'une humidité de plus de 80% à moins de 20% à terme[17]. Cette dureté lui permet de résister aux agressions externes aussi bien chimiques, que mécaniques.

En 1753 le botaniste suédois Carl Von Linne, fondateur de la taxonomie moderne a établi une classification des diverses espèces de bambou dont le mot proviendrait du terme indien « *Mambu* » ou « *bambu* ». Dans le monde entier, il existe environ 1200 espèces de bambou différentes dont 750 environ en Asie et 450 en Amérique du Sud[18], réparties selon environ 90 types de bambou. Parmi ces 90 types, seulement 6 environ sont utilisés pour la construction ou la culture domestique, ce qui représente une cinquantaine d'espèces environ. Cette faible proportion est approximative dûe au manque de documentations et de descriptions dans la taxonomie toujours en cours de cette plante. A partir des informations actuelles nous pouvons tout de même analyser l'étendue d'implantation du bambou dans le monde. Il apparaît sur tous les continents excepté en Europe et aux pôles extrêmes (Arctique et Antarctique), et se développe particulièrement dans la zone entre le Tropique du Cancer et le Tropique du Capricorne. Son développement en Asie de l'Est s'étend d'une latitude de 50°N jusqu'au Nord de l'Océanie, en comprenant l'Inde à l'ouest puis se retrouve également dans toutes les régions Subsahariennes pour enfin occuper le Sud des Etats-Unis, l'Amérique Centrale et quasiment toute l'Amérique Latine jusqu'à une latitude de 47°S en Argentine[19] (Fig.12).Ce développement massif en divers endroits du globe, traduit une adaptation de la plante aussi bien à des altitudes supérieures à 3800 mètres (Chine, Japon par exemple), qu'en pleine forêt tropicale avec 90% d'humidité, ou encore dans des zones semi arides de l'Inde. En général, le bambou se développe dans des zones chaudes, sur des sols sablonneux ou argileux, riches en humidité (au-delà de 80%), bien drainés et qui ne contiennent pas de sel. Au total, il s'étend sur environ 37 millions d'hectares de forêt dont 6 millions en Chine, 9 millions en Inde et 10 millions en Amérique Latine répartie sur 10 pays environ[20]. Le reste correspond à l'Asie du sud et les régions Sub-sahariennes.

---

[17] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.16

[18] Ibidem p.9

[19] An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.15

[20] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.9

Material	Working stress σ (N/mm^2)	E (N/mm^2) Modulus of elasticity	Working strain $\varepsilon(10^{-6})$	Strain energy stored	
				J/m^3	J/kg
concrete	8	25 000	300	1200	0.5
steel	160	210 000	800	64000	8.2
wood	7.5	11 000	700	2600	4.3
bamboo	10.7	20 000	500	2500	4.2

Fig.13. Comparaison des propriétés mécaniques du bambou avec d'autres matériaux.

material	$\frac{\text{Working stress}}{\text{Weight by volume}}$	$\frac{\text{E}}{\text{Weight by volume}}$
concrete	8/2400 = 0.003	25000/2400 = 10
steel	160/7800 = 0.02	210000/7800 = 27
wood	7.5/600 = 0.013	11000/600 = 18
bamboo	10/600 = 0.017	20000/600 = 33

Fig.14. Comparaison résistance/poids du bambou avec d'autres matériaux.

4.2.2. Propriétés mécaniques, environnementales et traitements.

Popriétés mécaniques...

Le bambou a une longue histoire d'utilisation à travers le monde que ce soit en terme de construction de bâtiments vernaculaires ou d'objets du quotidien. Partout où il est présent, que ce soit en Colombie, au Vietnam ou en Indonésie par exemple, il fait partie intégrante de la culture. Ce phénomène est particulièrement dû à ses propriétés mécaniques très intéressantes.

En raison de ces fibres longitudinales, le bambou est très flexible notamment avant son assèchement. Des études menées par l'ingénieur Janssen en 1981 (Fig.13) sur le bambou ont montré que son module d'élasticité, autrement dit sa déformation sous la contrainte, était quasiment le même que celui du béton et près du double de celui du bois.[21] Grâce à son périmètre externe très dur à la différence de son intérieur tendre, il est très résistant et stable pour la conception de structures. Cette densification des fibres sur le périmètre offre une résistance à la traction près de 3 fois plus importante que la partie intérieure du bambou[22]. Son incroyable résistance à la traction et à la compression lui vaut la réputation d'être l'un des meilleurs matériaux naturels que l'on puisse trouver et utiliser directement. Ainsi dans sa partie externe, il possède autant de résistance à la traction que l'acier soit l'équivalent de 40 kN/cm2, d'où le surnom « *d'acier végétal* »[23]. Sur l'entier de la section, cette résistance est bien sûr plus faible que l'acier. De même, il possède une incroyable résistance à la compression proche de celle du béton.

Un autre avantage structurel du bambou c'est sa légèreté, en partie dûe à son évidemment central comme nous l'avons vu. En comparaison avec d'autres matériaux, le rapport contrainte/poids volumétrique nous démontre que le bambou a d'excellentes capacités de résistance pour un matériau de cette légèreté. De la même manière, le rapport module d'élasticité/poids volumétrique dépasse de loin tout les autres matériaux même l'acier (Fig.14). Cet évidemment central du bambou lui permet 4 fois plus de resistance qu'une section cylindrique pleine. Si l'on compare le poids d'une barre de 3 m de long pour supporter un poids de 290 kg par exemple, le poids d'une barre de métal serait de 10kg alors que le bambou serait d'à peine 6 kg[24]. En accumulant cette différence de poids pour

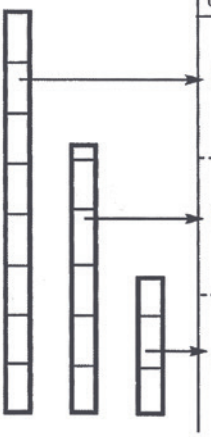
---

[21] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.26

[22] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.33

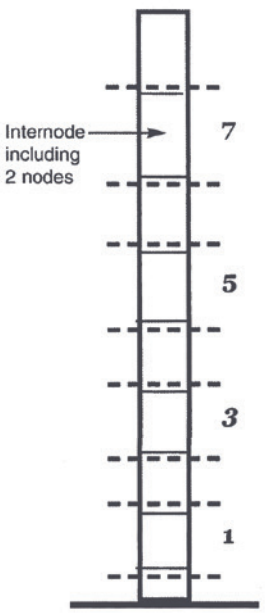
[23] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.22

[24] David Trujillo, *«Bamboo: 21st century steel»*, Conférence TEDx Coventry University, 20/02/2016



Length of culm sect.	Culm age (years)	Crushing strength Kg/cm²		Base Diam cm	Wall thick. cm	Number of nodes
3 meters	1 to 3 years	Maximum	4,930	9.08	0.79	8
		Minimum	2,740	9,44	0.97	10
	3 to 5 years	Maximum	8,350	10.76	1.58	13
		Minimum	2,775	9.04	0.96	9
	more than 5 years	Maximum	16,600	13.09	1.92	13
		Minimum	3,200	9.89	0.87	9
2 meters	1 to 3 years	Maximum	10,125	11.33	1.15	7
		Minimum	3,830	7.86	0.71	6
	3 to 5 years	Maximum	12,830	11.73	1.52	7
		Minimum	5,100	9.53	1.26	7
	more than 5 years	Maximum	22,500	14.33	1.62	7
		Minimum	6,600	9.09	0.88	6
1 meter	1 to 3 years	Maximum	14,050	9.27	1.50	5
		Minimum	7,350	8.39	0.73	3
	3 to 5 years	Maximum	19,000	11.57	1.72	4
		Minimum	8,000	8.28	0.98	4
	more than 5 years	Maximum	23,650	13.50	1.55	4
		Minimum	9,910	10.23	1.20	5

Fig.15. Résistance à la compression de la *Guadua* selon son âge et sa longueur.



Species	Internodes of basal part	Modulus of elasticity Kg/cm²	Modulus of rupture Kg/cm²	Compres. strength Kg/cm²	Tensile strength Kg/cm²
Dendrocalamus giganteous	1	172,097	1828	602	1836
	3	122,463	1758	619	1946
	5	147,912	1827	640	1880
	7	130,352	2880	646	1966
	Average	143,206	1823	627	1907
Dendrocalamus asper	1	122,073	1637	639	2145
	3	149,587	1741	592	2040
	5	129,542	1595	622	2220
	7	123,966	1578	566	2104
	Average	131,292	1638	605	2127
Gigantochloa robusta	1	94,208	1384	533	1970
	3	92,367	1294	510	1767
	5	109,217	1398	511	1854
	7	97,381	1345	530	2066
	Average	98,293	1355	521	1914
Bambusa vulgaris var. *striata*	1	60,652	1075	484	1392
	3	71,931	1123	443	1196
	5	88,297	1105	475	1352
	7	83,939	1286	417	1346
	Average	76,205	1147	455	1322

Fig.16. Comparaison de résistance le long de la canne et l'espèce du bambou.

Species	Compression strength σ (N/mm²)	Bending strength (N/mm²)	E Modulus (N/mm²)	Shearing strength (N/mm²)	Tensile strength σ (N/mm²)
Phyllostachys pubescens	56	129.1	10500	13.9	196.0
Guadua angustifolia	56	74	19000	9	140

Fig.17. Comparaison de propriétés mécaniques selon l'espèce de bambou.

chaque canne de bambou au lieu d'une barre d'acier, le poids du bâtiment peut être considérablement différent. Cette légèreté intrinsèque du bambou lui permet d'être transporté plus facilement et efficacement du point de vue énergétique, tout comme sa mise en œuvre sur un chantier. Cette mise en œuvre est d'autant plus facilitée dans la mesure où il est utilisable en intégralité et tel quel, à la différence du bois qui possède une écorce. Alors que sa résistance à la traction est amenée à diminuer quelque peu avec l'âge du matériau, sa résistance à la compression en revanche ne fait qu'augmenter dû à son assèchement progressif. Des tests effectués par les ingénieurs Martín et Mateus en 1981 sur la *Guadua* de Colombie (Fig.15) ont pu évaluer qu'une canne de 6 ans pouvait résister 2,5 fois plus qu'une jeune canne de 1 an. Cette résistance à la compression selon l'âge du bambou varie aussi selon la longueur de la canne (Fig.16), c'est à dire que plus la canne est courte plus elle est résistante. Ce phénomène s'explique en partie par la présence plus ou moins importante de nœuds de concentration de fibres le long de la canne. Certes, ces nœuds limitent la flexibilité du bambou en le rigidifiant plus ils sont nombreux, mais ils permettent aussi de reprendre jusqu'à 45% de charges en plus, si l'on considère des efforts s'appliquant perpendiculairement à la canne par rapport à une canne hypothétique sans nœuds.[25] Sa forme tubulaire accentue ce phénomène en résistant mieux aux déformations qu'avec une barre hypothétique pleine. Bien que le bambou soit flexible, sa mise en tension ne limite pas pour autant les risques d'efforts de cisaillement et les risques de fissures le long de la canne. Ces fissures se développent alors le long des fibres progressivement, les nœuds étant les points d'arrêt de propagation. La flexibilité maximum d'un bambou est généralement entre ses 6 et 12 mois d'âge[26] ce qui correspond à une période propice pour le courber et travailler avec. Il est par exemple un moyen efficace de résister face aux tremblements de terre qui sévissent en Amérique Latine ou en Asie du Sud-Est notamment. L'importance de densité des fibres internes du bambou et son épaisseur de paroi varient selon l'environnement de développement du bambou et selon son espèce. En général, le bambou est plus résistant à la base là où son épaisseur et son diamètre sont importants. Cela explique l'utilisation régulière de cannes courtes plûtot que longues dans la construction. Ces caractéristiques influent sur ses capacités structurelles qui peuvent alors varier selon les bambous. Par exemple, un bambou ayant grandi sur un terrain accidenté et avec peu d'eau développera plus de réseaux de racines pour se développer correctement et constituera en somme un bambou plus résistant qu'un autre en zone plate et humide.[27] La *Guadua* de Colombie figure comme un des meilleurs bambou pour la construction de bâtiments (Fig.17) avec le *Tam Vong* au Vietnam.

---

[25] An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.32

[26] An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.30

[27] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.16

« *Being a plant that self-regenerates, bamboo has, with adequate management and harvest, a permanent CO2 absorption, which does not happen with other species.* »[28].

« *if I choose to make this beam out of bamboo, instead of steel, we would be making a saving of around 19 kg of carbone dioxyde. That equates to the emissions produced by an average European car over 150km.* »[29]

Materials	Weight per volume Kg/m³	Energy for production MJ/m³
Concrete	2400	240
Steel	7800	1500
Wood	600	80
Bamboo	600	30

Fig.18.Comparaison des énergies de production entre le bambou et d'autres matériaux.

[28] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.11

[29] David Trujillo, «*Bamboo: 21st century steel*», Conférence TEDx Coventry University, 20/02/2016

Propriétés environnementales...

Le bambou compte aussi de nombreux avantages environnementaux. En effet, il est capable d'absorber une grande quantité de CO_2 atmosphérique et de relâcher jusqu'à 35% d'oxygène en plus par rapport à des arbres de dimension équivalente[30]. Cette capacité du bambou permet d'une certaine manière de contre balancer la pollution industrielle. Par exemple la *Guadua* de Colombie peut capter environ 22 tonnes de CO_2 par hectare par année[31]. De la même manière, il est capable d'accumuler très rapidement une grande quantité de biomasse, augmentant jusqu'à 30% par année face au moins de 5% des arbres équivalents. Selon l'INBAR (*International Network for Bamboo and Rattan*), cette plante n'utilise que 30MJ/m^3 pour son développement et sa production, au lieu de 240 MJ/m^3 pour le béton, plus de 1500 MJ/m^3 pour le métal ou encore 80 MJ/m^3 pour le bois[32] (Fig.18). Cela veut dire que pour la réalisation d'un bâtiment type, le bambou requiert 1/8ème de l'énergie du béton et 1/50ème de celle du métal, ce qui est considérable en terme d'économie d'énergie. Si l'on reprend l'exemple précèdent de la poutre, en métal celle-ci demanderait une consommation en CO_2 de 15 kg alors que pour le bambou elle serait de à peine de 1 kg. De plus, cette poutre en bambou serait capable de fixer près de 10 kg de CO_2. En la brûlant, elle libérera son CO_2 et si nous réutilisons cela pour produire de l'électricité par exemple au lieu de consommer de l'energie fossile qui rejette de nouveau du CO_2 dans l'atmophere alors nous pourrions créer une sorte de stockage permanent[33]. De plus, grâce à son réseau dense de racines, il permet de réduire l'érosion des sols, particulièrement dans les terrains accidentés et permet aussi de retenir l'eau ; l'équivalent de 30 000 litres d'eau pour un hectare de *Guadua*[34]. Cette eau stockée par le bambou permet de réguler les flux hydrauliques du sol en la rejetant durant les saisons sèches et en abaissant ainsi la température de l'air. Enfin, rappelons que le bambou peut être planté et récolté sans impacter violemment l'environnement et sans utiliser de fertilisants ou pesticides. Sa récolte suit des cycles rapides pouvant se renouveler en 2 à 3 ans au lieu de 10 à 20 ans pour un arbre, ce qui constitue un moyen efficace contre la déforestation qui sévit aujourd'hui dans le monde et menace la stabilité du climat. En terme de capacité de production par superficie et par année, le bambou est 25 fois plus performant que le bois, autrement dit 1 hectare de bambou peut produire entre 22 et 44 tonnes de matière.[35]

---

[30] An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.40

[31] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.11

[32] Alexander von Vegesack, Simón Vélez, «*Grow your own house*», Vitra Design Museum , 2000, p.155

[33] David Trujillo, «*Bamboo: 21st century steel*», Conférence TEDx Coventry University, 20/02/2016

[34] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.11

[35] Alexander von Vegesack, Simón Vélez, «*Grow your own house*», Vitra Design Museum , 2000, p.151

▲ Fig.19.

▲ Fig.20.

▲ Fig.21.

▲ Fig.22.

▲ Fig.23. ▼ Fig.24.

▼ Fig.25.

Les traitements du bambou...

Les traitements du bambou sont le fruit d'un savoir-faire et d'une expérience sur le long terme depuis des millénaires qui respectent l'environnement, même si de nouvelles techniques sont apparues successivement avec les machines et produits protecteurs. Le but de ces traitements est de lutter face à l'attaque d'insectes ou le développement de moisissures capables d'anéantir les propriétés structurelles du bambou. Avant ces traitements, une étape importante concerne la récolte (Fig.19). En effet, le bambou doit être récolté en saison sèche hors des moussons, et coupé en biais à la base juste au dessus d'un nœud pour éviter l'infiltration d'eau dans le rhizome. La découpe se fait à l'aube, à cause des procédés d'attraction physiques influant sur les flux internes du bambou dont son humidité. Concernant les traitements du bambou, il existe une multitude de possibilités entre moyens vernaculaires ou plus technologiques. Le premier traitement est celui par la chaleur, qui assèche en même temps le bambou. Le principe est simple, les cannes sont placées à une certaine distance d'un brasier pour les sécher sans les brûler (Fig.20), sachant qu'une chaleur trop importante peut fragiliser la canne voir même la faire rétrécir. Un second traitement sur le même principe consiste à placer la canne dans un four à très basse température, en utilisant des feuilles humides comme combustible pour dégager de la fumée et « *enfumer* » alors le bambou (Fig.21). Cette technique permet de détruire les impuretés à l'intérieur et repousser les insectes. Une autre méthode écologique, consiste à immerger le bambou dans l'eau sur une durée prolongée de 6 à 12 semaines. Cette méthode ancestrale particulièrement pratiquée en Indonésie ou au Viêtnam, permet de dissoudre dans l'eau tous les composants riches en amidon qui sont présents dans la paroi interne du bambou et qui attirent les insectes. Une autre variante utilise de l'argile comme c'est le cas par exemple au Bangladesh. Enfin, l'ouvrier peut tout simplement recouvrir la surface du bambou avec, soit des peintures à l'huile ou de la cire comme pour le bois, même si cette couche est temporaire. Les autres traitements connus sont plus nocifs pour l'environnement mais plus efficaces, comme par exemple les méthodes utilisant des substances chimiques telles que la peinture à la chaux ou encore l'immersion dans une solution immunisante de Borax pendant 20 jours (Fig.22). Cette dernière possibilité demande à l'ouvrier de percer les diaphragmes internes pour innonder successivement les divers internoeuds et récupérer la solution contenant les impuretés dissoutes. Enfin, des méthodes plus mécaniques qui demandent l'intervention de machines consistent à traiter la surface de la canne avec un système de « *karcher* » (Fig.23) ou encore pulser de l'air à l'intérieur de la canne dit aussi la « *méthode Boucherie* ».L'assèchement du bambou est ensuite primordial et peut se faire simplement en disposant le bambou à la verticale en forme de tipi en plein air (Fig.24) ou dans un hangar couvert et ventilé pendant 4 semaines (Fig.25).

Fig.26.

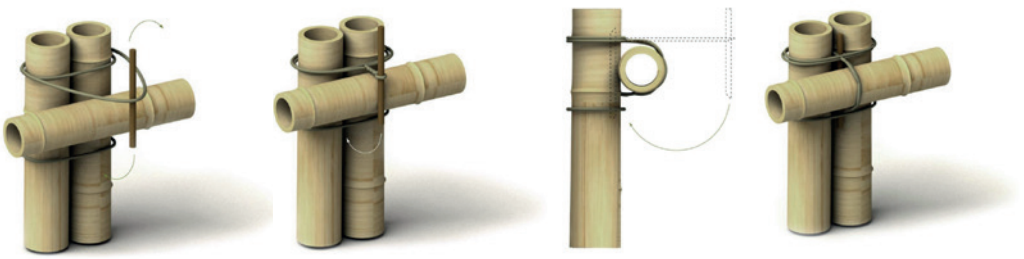


Fig.27.

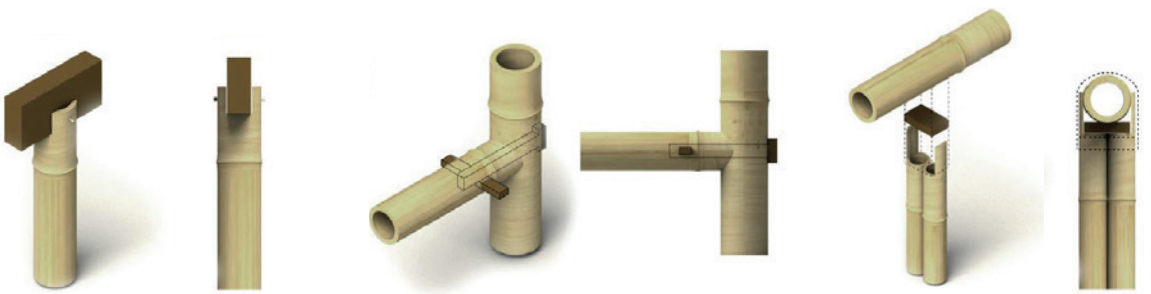


Fig.28.

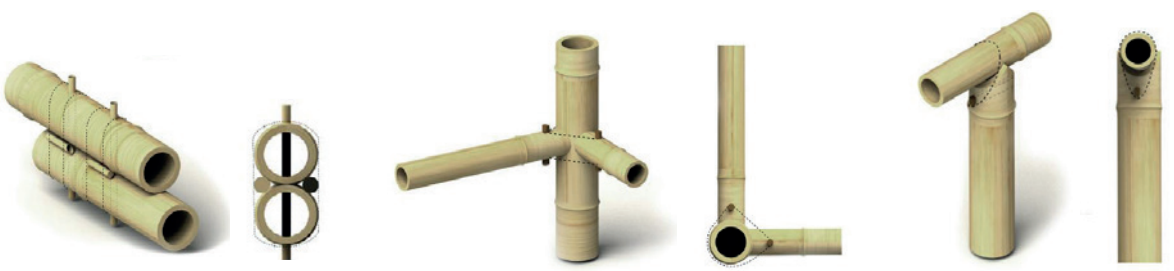


Fig.29.

4.2.3. Types de combinaisons et systèmes constructifs.

Les types de combinaisons vernaculaires...

Les assemblages sont un point essentiel de la construction en bambou. Ce sont eux qui transmettent les efforts d'un élément à l'autre et permettent l'équilibre statique. Cependant, en raison de sa forme tubulaire creuse et de ses fibres longitudinales, le bambou possède ses « propres » techniques d'assemblage qui diffèrent quelque peu du bois. Ces techniques représentent un véritable savoir-faire développé sur l'expérience et le long terme au sein d'une collectivité comme nous avons pu le voir dans l'approche vernaculaire précédemment. Les instituts techniques et universitaires allemands ont développé beaucoup d'inventaires concernant les éléments constitutifs des structures légères notamment leurs assemblages. Ainsi en 1985, l'Université de Stuttgart dirigée alors à l'époque par Frei Otto publie un ouvrage sur le bambou intitulé « Bambus » dont les travaux sont continués par l'ingénieur allemand Gernot Minke dans son ouvrage « *Building with bamboo* ». On y trouve des assemblages allant des techniques primitives aux techniques les plus sophistiquées actuelles.Tout d'abord, les assemblages vernaculaires peuvent se faire par des connections parallèles, orthogonales ou encore angulaires pour les plus connues. Afin de transmettre au mieux les efforts, la surface de contact entre les différents éléments doit être maximisée et donc le bambou découpé. Il existe divers types de découpes (Fig.26) dont les plus répandues sont la découpe en « *bouche de poisson* » ou en « *bec de flûte* »[36]. Une fois les éléments en contact, une des méthodes les plus utilisée dans l'architecture vernaculaire en bambou était l'assemblage par des liens, faciles et peu chers (Fig.27). Des liens organiques comme des lianes, des fibres de palmier ou encore des bandes de bambou pouvaient être utilisées. La pratique avec les cordes naturelles par exemple, consistait à les mouiller avant de les nouer. En séchant la corde se rétracte et développe une tension qui maintient le joint. Ces assemblages par des liens pouvaient être renforcés ou remplacés par des cales de bois dur pour éviter certaines découpes (Fig.28). Ces éléments complémentaires en bois sont choisis pour résister aux insectes et possèdent plusieurs noms selon le pays. Par exemple, en Colombie, l'utilisation d'une telle pièce de bois en « *Chonta* », une espèce de pin très dur, est appelée « *Muneco* » et permet d'éviter la découpe en « *bec de flûte* »[37]. D'autres solutions, plus subtiles se limitent à de simples baguettes de bois transversales pour rigidifier des colonnes, ou encore à la pose de baguettes perpendiculaires les unes aux autres pour rigidifier un assemblage (Fig.30).

---

[36] An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.67

[37] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.41

▲ Fig.30.

▲ Fig.31.

▲ Fig.32.

▲ Fig.33.

▲ Fig.34.

▲ Fig.35.

▼ Fig.38.

▲ Fig.36.

▼ Fig.39.

▲ Fig.37.

D'autre part, les assemblages en bambou ont fait l'objet d'innovations successives plus ou moins avancées. En effet, bien que les techniques vernaculaires aient fait leurs preuves par le passé, la technocratie grandissante a tout de même porté un impact dessus. Ces assemblages plus élaborés tentent d'exploiter au mieux le potentiel du bambou en le combinant avec d'autres matériaux de façon plus ou moins modérée. Marcelo Villegas et Simón Vélez par exemple ont développé en Colombie une technique d'assemblage qui consiste à insérer une tige métallique dans la canne puis de verser du ciment dans les internoeuds pour former une armature «*low tech*» permettant au bambou de résister bien mieux sous les charges (Fig.30, Fig.31). Ce type d'assemblage permet alors une connection directe avec un socle de ciment pour former un appui ponctuel efficace (Fig.32). De la même manière, ils ont inventés un type d'assemblage en métal pour maximiser la surface de contact entre les éléments structuraux et permettre une meilleure distribution des charges (Fig.33)[38]. Le système de noeud central métallique de Jörg Stamm peut également être adapté pour la construction en bambou. En striant le bout de la canne pour lui donner une forme conique, puis en injectant du ciment à l'intérieur avec une visse métallique, ce système permet une terminaison assez simple au noeud central pour s'orienter dans diverses directions (Fig.34)[39]. Des systèmes astucieux tel que ceux de Vitor Marcal utilisent des tubes métalliques aplatis à l'intérieur de la canne ou encore de simples plaques métalliques qui maintiennent la canne (Fig.35, Fig.36)[40]. Ces deux systèmes permettent d'éviter les découpes en effectuant simplement des percements et un boulonnage. Simón Vélez a aussi réinterprété les assemblages avec des liens, pour proposer de simples bandes métalliques, résistantes, peu chères et rapides de mise en œuvre (Fig.37). Ce système convient également avec de simples fils métalliques ou cordes synthétiques. Enfin, le système développé par Renzo Piano, par exemple (Fig.38), reste aussi assez basique avec un noeud fait d'une série de plaques métalliques soudées et insérées dans les cannes. Ainsi, bien que tous ces systèmes utilisent des matériaux tels que le ciment ou le métal, qui ne sont pas naturels, leur utilisation restent relativement faibles et ne comptent pas beaucoup d'éléments différents. Ces systèmes restent constructibles avec un artisanat local sans réelle complexité technique au niveau de la fabrication des pièces. D'une façon plus générale, les trous dans la canne de bambou doivent être évités au maximum dans la mesure où ils fragilisent les fibres et donc la résistance du bambou. De ce fait, les assemblages vernaculaires par de simples liens métalliques ou naturels sont souvent privilégiés (Fig.39), avec les découpes en «*bec de flûte*» ou en «*bouche de poisson*».

---

[38] Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.44

[39] Ibidem p.50

[40] Ibidem p.45

▲ Fig.40.

▲ Fig.41.

▲ Fig.42.

▲ Fig.43.

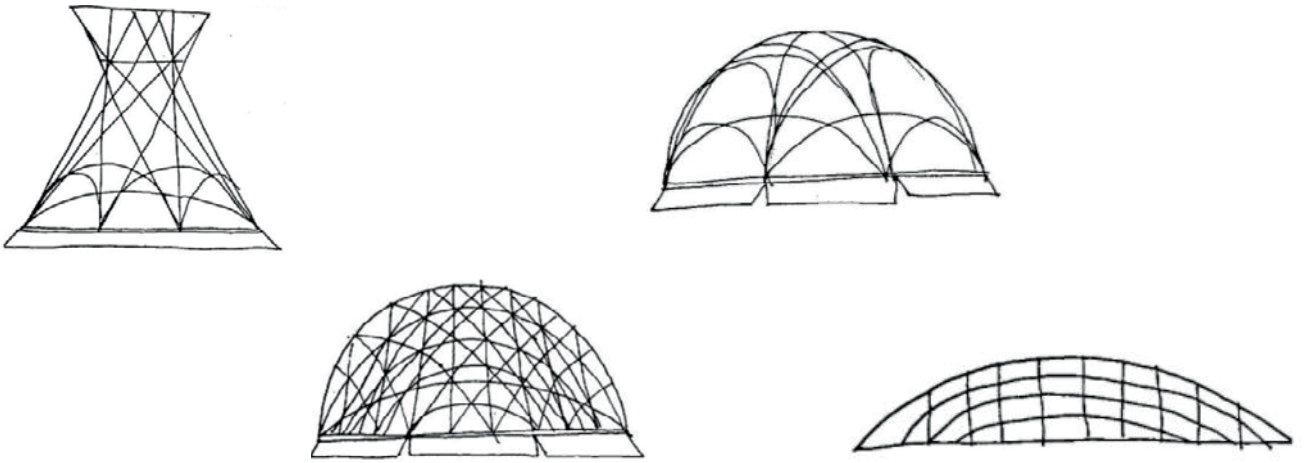
▼ Fig.44.

▼ Fig.45.

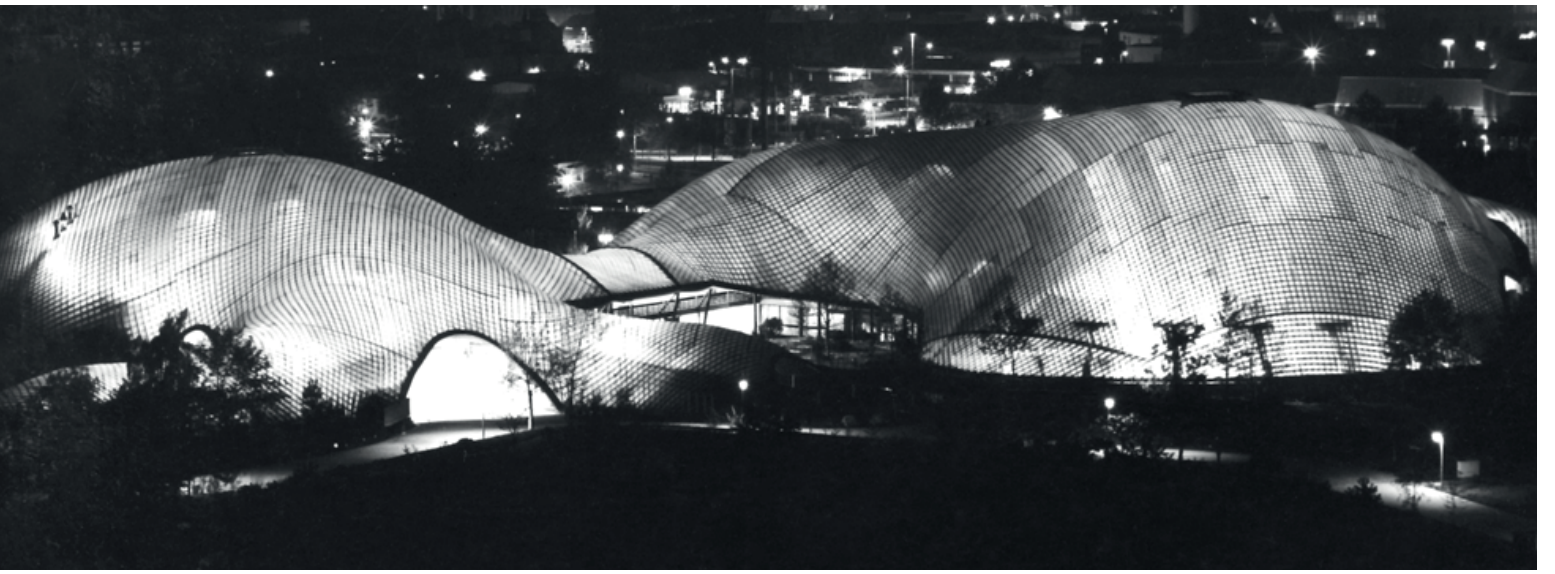
Les systèmes constructifs vernaculaires de base...

Dans la pratique vernaculaire, les colonnes sont souvent réalisées avec une série de cannes attachées les unes aux autres avec des liens pour une meilleure reprise des charges. Les poutres sont consituées de la même manière avec bien souvent des cales ou baguettes de bois qui rigidifient leur assemblage (Fig.40). Les treillis ou cadres mettent en oeuvre majoritairement les découpes vu précèdemment. Des solutions ingénieuses rendent possible la création d'un arc et câble par exemple, entièrement en bambou (Fig.41). L'ouvrier rigidifie la poutre de bambou par une canne souple qui agit comme un câble créant une pré-tension dans la structure. De plus pour les murs, les bambous peuvent être agencés les uns à côté des autres pour former une sorte de palissade. En général, des structures cadres légères sont utilisées pour ensuite les « remplir ». Ce remplissage peut se faire avec un tissage de bandes de bambou ou alors avec des planches de bambou faites de cannes striées. Concernant la création de toits dont le rôle est avant tout protecteur, le bambou est souvent utilisé en bandes ou en demi canne agencées inversement après le retrait des diaphragmes internes. Cet agencement constitue une protection primaire efficace bien que le bambou doive être protégé par la suite. Pour les sols, des cannes entières ou striées et déroulées permettent de créer des planches directement utilisables sur une structure cadre. Cette option a été majoritairement utilisée dans les constructions légères sur pilotis.

Par ailleurs, pour la réalisation d'arcs en bambou plusieurs possibilités s'offrent au constructeur. Celui-ci peut tout d'abord utiliser directement une jeune canne de bambou très flexible pour lui donner la forme voulue. Dans de nombreuses constructions, l'arc est consitué d'un agglomérat compact de bandes de cannes liées pour une reprise efficace des efforts (Fig.42). Dans le cas d'une canne plus rigide et sèche, l'opération se révèle plus complexe. Dès lors l'arc en bambou peut être constitué de segments de cannes successifs maintenus par des bandes de bambou. En allongeant la longueur des sections, une voûte selon le même système peut être obtenue (Fig.43). Enfin, les dômes largement présents dans l'architecture vernaculaire en bambou peuvent être réalisés de différentes manières. La première consiste à utiliser une structure primaire de cannes entières courbées sur lesquelles s'ajoutent une structure secondaire de bandes de cannes très flexibles. Ce réseau de bandes est orienté dans deux directions pour former un maillage structurel à l'image des gridshells de Frei Otto (Fig.44). L'assemblage entre la structure primaire et secondaire se fait simplement par des liens de cordes, tout comme les assemblages entre chaque bande de la structure secondaire. La seconde solution consiste à réaliser la structure primaire avec des arcs compactes d'agglomérats de bandes (Fig.45).



▲ Fig.46.



▲ Fig.47.

▼ Fig.48.

A l'image des types de combinaisons qui ont su être innovées et améliorées suite à diverses expériences et tests comme nous l'avons vu, les systèmes constructifs ont aussi été mis au service d'innovations. En effet, depuis plusieurs décennies, ces systèmes de base de l'architecure vernaculaire sont repris pour la réalisation de formes plus élaborées et complexes que celles proposées au départ. En utilisant parfois d'autres matériaux complémentaires certes, ces protagonistes qui tentent de faire évoluer le langage architectural vernaculaire entament d'une certaine façon une marche vers un nouveau langage architectural. Autrement dit, c'est un langage qui emprunte les acquis du passé pour les faire évoluer avec l'apport de nouvelles connaissances sans pour autant tomber dans la technologie et l'industrie pures. Cette marche vers un nouveau langage tend alors à de nouvelles formes architecturales.

4.3. Des protagonistes en marche vers un nouveau langage architectural ?

Durant ce dernier siècle, les industries de la construction en développant massivement le métal ou le béton ont véhiculé l'image d'une architecture moderne saine au détriment des matériaux naturels comme le bambou. Ce dernier, vu alors comme le « *bois du pauvre* », connaît depuis quelques temps un renouveau spectaculaire. En effet, le contexte de crise écologique actuel a abouti à une prise de conscience de la réutilisation des matériaux issus directement de la nature. En utilisant le bambou ces 50 dernières années, plusieurs architectes ont pu expérimenter une pluralité de formes structurelles qui dépassent de loin la simple architecture vernaculaire. Plus récemment, des architectes comme Simón Vélez ou Vo Trong Nghia s'inscrivent à la fois dans cet usage vernaculaire et dans un mouvement qui renouvelle l'architecture contemporaine tout en répondant à des questions environnementales.

4.3.1. L'approche vernaculaire au service d'une pluralité de formes structurelles.

En courbant le bambou, il reste un potentiel formel inattendu dans l'architecture notamment dans les formes organiques. En 1970, Yona Friedman vu précédemment avec ces questions de mobilité et de légèreté, a développé avec Eda Shaur une série de petits projets appelés « *Roofs for People* » (Fig.46) notamment à l' « *Institute for Light Surface Support Structure* » à Ahmedabad en Inde où Frei Otto a également enseigné. Cela explique probablement la similarité avec son projet de la multihalle de Mannheim (Fig.47). Ensemble ils réalisent des expérimentations à la fois esthétiques et structurelles sur les toits en bambou en utilisant le système de gridshells et de dôme (Fig.48).

▲ Fig.49.

▼ Fig.50.

A ce titre Eda Schaur énonce : « *Why sould we should we concern ourselves with building with bamboo in this age where we have so namy excellent industrially produced building materials ? […] if we compare the ecological problems of our world and its limited ressources with the need of the ever-growing population has for more buildings, then the interest in building with bamboo is evidently justified.* »[1]. L'élaboration de structures en tension et en compression en utilisant le bambou a permis de créer une variété de formes de toits tous plus légers et rapides à construire. Le projet du « *Museum for Simple Technology* » à Madras en Inde, par exemple, est un bel exemple de reprise des savoir-faire vernaculaires utilisant la main d'œuvre locale.

Dans le cadre d'expérimentations formelles plus récentes en utilisant les techniques d'assemblages vernaculaires, l'équipe d'architectes indonésiens IBUKU, le studio 24H Architecture ou encore le studio EcoBamboo figurent comme des révélations. Ces diverses agences proposent un langage architectural similaire, très novateur et créatif. La « *Green School* » à Bali de IBUKU (Fig.49) met en avant une forme enroulée du toit qui donne une impression de légèreté et de dynamisme au bâtiment. Les assemblages dans ce projet sont totalement issus des savoirs faire vernaculaires vu précèdemment notamment des liens mis ici au service d'une forme novatrice. De la même manière, le langage de la colonne vernaculaire de base a été magnifié et innové dans ce projet. En effet, la colonne n'est plus un simple faisceau de cannes droites mais laisse place à une torsion des cannes qui forment alors une colonne évidée, esthétique et plus rigide, rappelant la Bibliothèque de Sendaï de Toyo Ito. Ce langage des colonnes sera également repris dans le projet « *Trois montagnes* » de Ecobamboo à Bali.

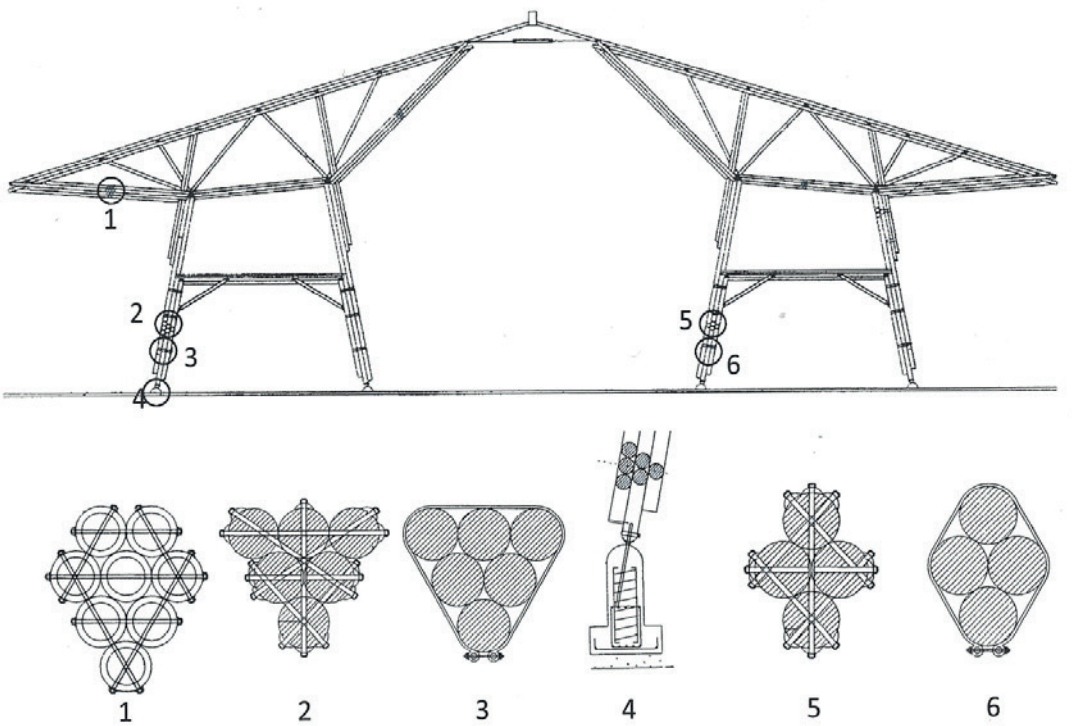
De la même manière, le projet de 24 H architecture pour le « *Centre d'activités et apprentissage infantile* » à Koh Kood en Thaïlande (Fig.50) démontre tout le potentiel créatif avec le bambou et de simples assemblages faits de liens et de découpes de cannes. En effet, le bâtiment à la forme totalement nouvelle s'inspire des poissons marins locaux comme une sorte de raie Manta géante et légère à la fois. Le concept de « *protéger au travers de la conception* »[41] a engendré des prouesses techniques et esthétiques tels que les grands portes-à-faux de plus de 8 mètres qui protègent la structure des intempéries. Le bâtiment surélevé du sol par des piliers rappelle les structures vernaculaires légères que nous énoncions précèdemment.
Cet élan de créativité assez récent est en parti dû à l'un des pionniers de l'architecture en bambou, le colombien Simón Vélez.

---

[41] Eduard Broto, «*Le bambou : architecture et design : manuel pratique et 59 projets*», Barcelone Links, 2014, p.50

▲ Fig.51.

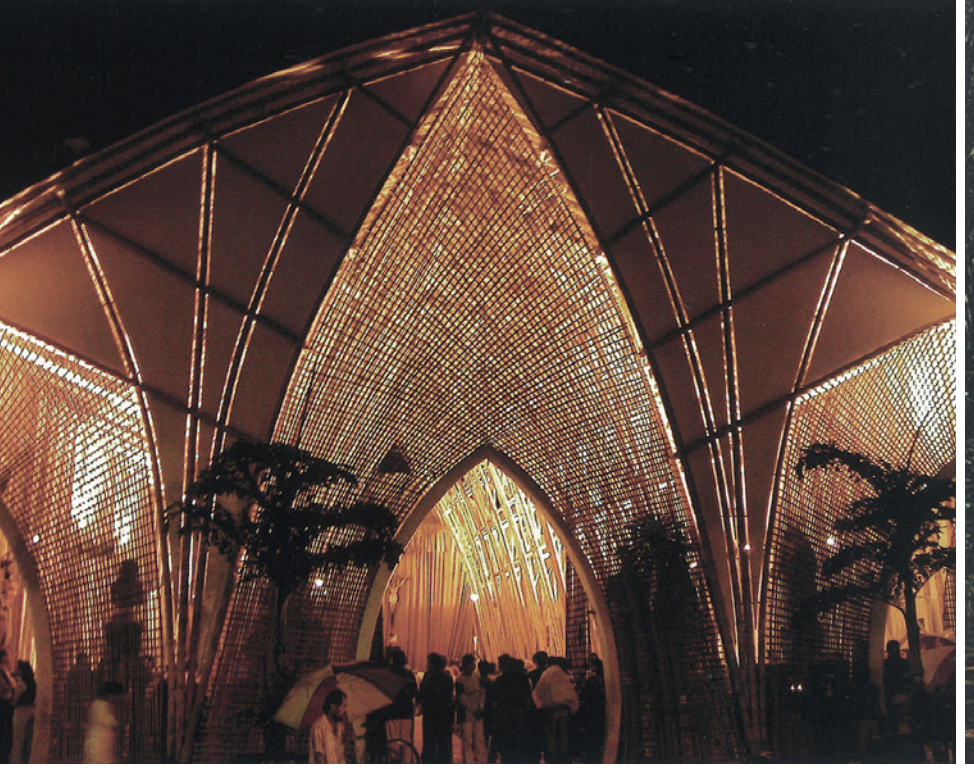
▼ Fig.52.

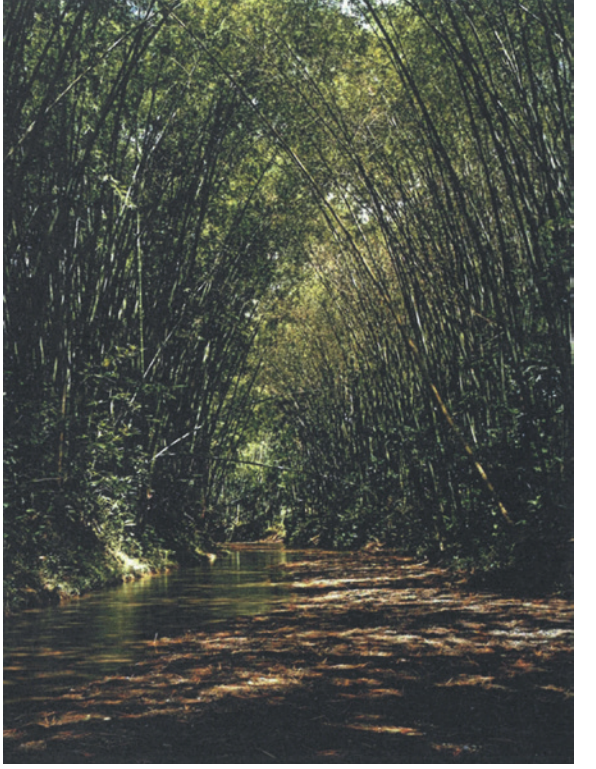


4.3.2. L'approche de Simón Vélez.

Simón Vélez est l'un des acteurs majeurs de la construction en bambou. Cet architecte qui se considère plutôt comme un «constructeur» vante depuis plusieurs décennies le bambou comme matériau léger et extraordinaire de la nature. Sa démarche est remarquable dans la mesure où il a su tirer des leçons de l'architecture vernaculaire sans forcement copier ses formes. Ces leçons s'apparentent avant tout à la réutilisation d'une approche : celle de l'approche vernaculaire mentionnée auparavant. En réutilisant le bambou et les savoir-faire associés, Simón Vélez a su rendre à ce matériau ses lettres de noblesse. En effet, il était massivement utilisé dans l'architecture vernaculaire colombienne des classes populaires, mais il était devenu petit à petit l'emblème d'une architecture de pauvres, au bénéfice du béton qui était alors vu comme le matériau de l'ascension sociale. Cependant comme il l'énonce « *le béton est un matériau aux possibilités illimitées, mais c'est précisément lorsqu'il n'y a pas de limites que se perdent le rythme et le vocabulaire d'une expression architecturale* »[42]. En effectuant un retour d'intérêt pour le bambou, Simón Vélez a su combiner dans une belle synthèse le langage vernaculaire avec un processus constructif écologique et innovant. Ces bâtiments mettent en œuvre des toits gigantesques, des structures complexes mais efficaces et surtout des joints innovants emprunts des savoirs-faire de l'architecture vernaculaire en bambou comme nous l'avons vu précédemment. Durant le premier séminaire international sur le thème « *New and creative uses of bamboo resources* » tenu au Vietnam en 1997 par l'UNESCO, cet architecte s'est particulièrement fait remarqué en montrant l'étendue des possibilités grâce au bambou, que ce soit pour la construction d'ouvrages privés, publics ou même encore de l'ordre du génie civil. L'un de ses ouvrages les plus emblématique est le *Pavillon ZERI* conçu pour l'Exposition de Hanovre en 2000 (Fig.51). Le bambou étant encore inhabituel dans la construction de programmes public en Europe, celui-ci fut d'abord expérimenté en Colombie à Manizales, ville de 600 000 habitants au cœur de la région productrice de café et de *Guadua* . Grâce à une modernisation optimale des savoirs-faire vernaculaires utilisés par les communautés indiennes indigènes présentes avant l'arrivée des Européens en Colombie, Simón Vélez accompagné de Marcelo Villegas, ont su bâtir un pavillon de 40 mètres de diamètre en bambou (Fig.52). Sa démarche n'a pas du tout été celle d'exclure les matériaux issus de la modernité et de l'industrie, mais au contraire de tirer partie de leurs capacités complémentaires pour valoriser le bambou. Cette démarche d'amélioration des assemblages de la manière la plus simple possible a été entrepris également par d'autres ingénieurs comme nous l'avons vu. Son utilisation du métal et du béton reste toujours justifiée et raisonnable, y compris dans la réalisation qui est possible avec un artisanat local. Sa motivation

[42] Pierre Frey, *«Learning from Vernacular»*, Actes sud, 2010, p.133





▲ Fig.53.

▼ Fig.55.

▲ Fig.54.

provenait d'un doute sur la fiabilité des assemblages vernaculaires de base dont une hybridation par l'innovation pouvaient aboutir à des techniques plus élaborées mais toujours aussi simples. Ainsi Pierre Frey parle de «*potentiel d'innovation fondé sur la finesse de l'hybridation et l'agencement de techniques connues, banales en elles-mêmes, dans un ordre et par des connexions inédites.*»[43] Le résultat de cette combinaison intelligente et pragmatique de matériaux naturels et de technologies « *ultra économique* »[44] a conduit au succès de ce pavillon en terme de structure. En effet, les ingénieurs allemands de l'exposition dont le professeur Klaus Steffens, en charge de contrôler le projet a été forcé d'admettre qu'il était grandement impressionné par le Pavillon ZERI et les perspectives futures de l'architecture en bambou[45]. En adoptant une telle approche, Simón Vélez s'offre un large panel de possibilités formelles et structurelles qui lui vaut le surnom de « *Calatrava du Bambou* », même si son approche est totalement différente. Les structures qu'il met en avant telle que la fameuse « *Église sans Religion* » (Fig.53) associe à la fois prouesse technique, légèreté et majestuosité, à l'image d'une cathédrale gothique de Viollet-le-Duc mais naturelle (Fig.54). En combinant un matériau naturel local avec des produits industriels très simples comme le ciment ou les tiges métalliques, cet architecte ouvre son architecture sur l'autoconsommation. A cela s'ajoute une stimulation du travail local, une utilisation d'une main d'œuvre qualifiée sur place qui dispose des savoirs-faire[46] (Fig.55). Cependant cette approche se limite dans l'expérimentation par le dessin et sur le chantier directement avec cette question : « *comment vais-je le construire ?* »[47]. Même lorsqu'il développe des structures complexes, il laisse toujours une certaine marge de manœuvre pour les ouvriers qui libèrent leurs savoirs-faire et parviennent à des compromis. L'approche adoptée par Simón Vélez est loin de celle du paramétrique dont il n'a peut être même pas la connaissance. Partant de ce constat, la question que nous pouvons poser reste ouverte : *Comment Simon Velez aurait-il poussé ce nouveau langage architectural, notamment dans la recherche structurelle et formelle, s'il avait eu les outils paramétriques en sa possession ?* Quoi qu'il en soit l'approche mise en avant par cet architecte peut être appliquée dans tous les pays où le bambou pousse naturellement en masse et où les habitants savent travailler avec. Cette idée « *d'architecture cultivable* » en utilisant directement le matériau sur place tout en lui conférant de nouvelles possibilités formelles se rattache à la notion de « *Thinking globally, acting locally* »[48].

---

[43] Pierre Frey, «*Simón Vélez Architecte // la maîtrise du bambou*», Actes Sud, 2013, p.45

[44] Alexander von Vegesack, Simón Vélez, «*Grow your own house*», Vitra Design Museum, 2000, p.36

[45] Ibidem p.54

[46] Pierre Frey, «*Simón Vélez Architecte // la maîtrise du bambou*», Actes Sud, 2013, p.83-84

[47] Ibidem p.54

[48] Alexander von Vegesack, Simón Vélez, «*Grow your own house*», Vitra Design Museum, 2000, p.42

▲ Fig.56.

▼ Fig.57.

4.3.3. L'approche de Vo Trong Nghia.

Vo Trong Nghia est un architecte vietnamien dont la construction en bambou est devenue sa signature architecturale. L'originalité et la créativité de ses projets a permis de mettre l'architecture en bambou en avant sur la scène internationale. En 2012, cet architecte obtient pas moins de onze prix internationaux, tels que le prix « *Architecte avant-gardiste 2012* » du magazine de renommée mondiale *Architectural Record*. Comme il l'énonce : « *I think bamboo and laminated bamboo will replace other materials and become the 'green steel' of the 21st century* [...] *I hope many architects realise the potential of the material and build with bamboo more and more.* »[49]. De la même manière que Simón Vélez, Vo Trong Nghia développe des structures qui sont à la fois vernaculaires dans leur matérialité et techniques d'assemblages, mais innovantes de par de leur formes. Son architecture « *verte* » est en plus adaptée au climat local et au mode de vie des vietnamiens. Parmi ces projets les plus emblématiques citons tout d'abord le « *Diamond Island Community Center* » à Hô Chi Minh Ville. Ce projet répond clairement aux principes de la légèreté économique évoqués précédemment, en libérant l'espace pour une meilleure appropriation architecturale. Les 8 dômes sur colonnes présentent diverses tailles et divers usages pouvant aussi bien servir d'espaces de conférences ou de restaurant pour les locaux et les touristes. Les deux plus grands dômes sont entièrement fait de bambou et mesurent plus de 24 mètres de haut pour une hauteur de 12,5 mètres (Fig.56), les plus petits ont un diamètre de 11 mètres et une hauteur de 7 mètres (Fig.57). La forme des structures inspirée des paniers locaux en bambou est préfabriquée sur place en plusieurs unités successivement assemblées par les ouvriers pour plus de rapidité. Les dômes sont constitués de deux couches, celle intérieure est structurelle et celle extérieure protège avec une couverture en chaume pour fabriquer un avant toit efficace. La performance incroyable de ces structures légères en bambou permet une ouverture zénithale et des colonnes périphériques apportant de la lumière naturelle, tout en garantissant la pérennité de la structure face à la pluie et au soleil. La régulation de la chaleur est parfaitement exécutée, en accueillant l'air frais à la base et en évacuant l'air chaud par l'ouverture zénithale. Bien que Vo Trong Nghia utilise des assemblages vernaculaires avec de simples liens, l'idée n'était pas de reproduire l'architecture vernaculaire mais au contraire de créer une architecture écologique qui s'adapte au langage architectural actuel. Ainsi, la systématisation de la production de bambou et sa mise en œuvre font de ce projet un mélange parfait entre approche vernaculaire et architecture contemporaine[50].

---

[49] Marcus Fairs, «*Bamboo «will replace other materials in architecture says Vo Trong Nghia»*,16/07/2014, http://deezen.com

[50] «*Diamond Island Community Center / Vo Trong Nghia Architects*», 03/12/15, http://archidaily.com

▲ Fig.58.

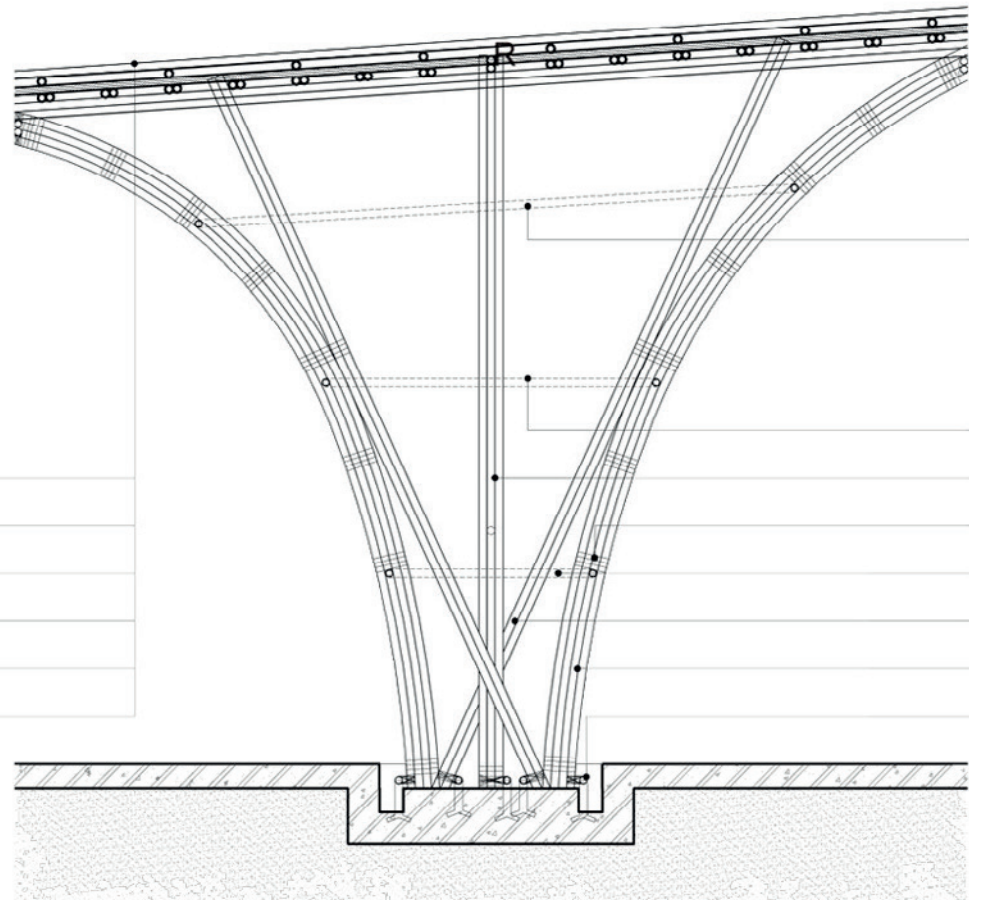
▼ Fig.59.

Le projet « *The Dailai Bamboo Complex* » dans la province de Vinh Phuc est un autre exemple innovant de structure en bambou (Fig.58). Ce projet remporte d'ailleurs le prix du bâtiment de l'année par l'*ARCASIA* (*Architects Regional Council Asia*). Ce complexe comprend un restaurant/café qui sert d'espace alternatif de musique live, de défilés de mode ou autres usages, tout en expérimentant des formes nouvelles de structures. Une nouvelle fois cette structure est entièrement en bambou local et faite de simples assemblages. Sa forme particulière en « *aile d'oiseau* » légère évite la présence massive de colonnes. Le but de ce projet pour Vo Trong Nghia était non seulement d'expérimenter le bambou en tant que structure, mais aussi en tant que « *producteur d'espace et d'atmosphère* »[51] sachant qu'il est directement le revêtement. Le pavillon à la forme semie circulaire offre un panorama sur la nature totalement dégagé sur 12 mètres de largeur sans aucune colonne verticale. La forme en « *aile d'oiseau* » permet également de capturer le vent à l'intérieur du bâtiment et éviter ainsi l'utilisation d'air conditionné.

Dans ce mouvement extraordinaire de créativité et d'apport de connaissances sur le bambou, il convient de parler de son projet du « *Castaway Island Resort* » sur l'archipel de Cat Ba au Vietnam. Ce projet de plus de 3000 m2 compte une série de 5 huttes, un restaurant et un pavillon le tout réalisé avec le bambou local du Viêtnam équivalent à la *Guadua* de Colombie : le «*Tam Vong*», un bambou fin de 4-5 cm de diamètre extrêmement résistant. Le projet est en immersion dans la nature et en total respect avec elle. Les cannes de bambou sont assemblées simplement avec des chevilles et cales de bois ensuite maintenues par des liens. Au préalable les cannes ont été traitées selon les techniques vernaculaires vu précédemment, à savoir l'immersion dans la boue puis l'enfumage. Le restaurant semi-ouvert se compose d'une « *shell structure* » hyperbolique-paraboloïde constituée de 13 « *shells* » en série. Chacune d'elle est composée de 80 cannes droites de bambou (Fig.59). L'agencement de ces cannes crée une structure protectrice ondulante et rythmique qui dialogue avec le paysage environnant. Les 5 huttes sont composées de structures cadres assemblées d'abord au sol pour faciliter le travail des ouvriers et le temps de construction, puis sont érigées.

Enfin, son projet du « *Kontum Indochine Café* » dans la province de Kon Tum est une fois de plus une mise en avant spectaculaire et créative de la construction vernaculaire au service de l'architecture contemporaine. En effet, ce projet similaire à celui du Pavilion Vietnamien à l'Exposition Universelle de Milan en 2015, présente un espace semi couvert dans un contexte urbain. La forme du bâtiment rectangulaire est très simple, mais le plus magistral réside dans la forme des colonnes. Le toit en panneaux plastiques transparents recouverts de bambou est

[51] «*Bamboo Wing / VTN Architects*», 27/03/12, http://archidaily.com



▲ Fig.60.

▲ Fig.61.

▼ Fig.62.

supporté par 15 colonnes en cônes inversés et surtout totalement en bambou. La forme de ces colonnes a été inspiré par le panier à poisson traditionnel vietnamien qui s'évase (Fig.60). Chaque colonne est constituée d'une alternance de cannes de bambou en périphérie et préfabriquées sur place au préalable. Ce pourtour masque la colonne centrale et celles croisées qui le maintiennent. Des anneaux métalliques intérieurs très simples assurent la pérennité de la forme ainsi qu'une reprise optimale des efforts, tout comme la base solide en béton à la manière de Simón Vélez (Fig.61). Le fait que chaque colonne se touche, produit un effet visuel d'arches donnant l'impression au visiteur d'être dans une véritable forêt de bambou. Comme dans les autres projets mentionnés avant, la circulation de l'air est facilitée tout en garantissant une protection face à la pluie et au soleil.

4.4. Conclusion sur l'approche vernaculaire «low tech».

En conclusion, nous avons vu que l'approche vernaculaire constituait une base très enrichissante et inspirante pour développer une architecture légère « *low tech* » notamment du point de vue des assemblages. Cette approche associée au bambou a permi de développer une multitude de projets tous plus extraordinaires et inspirants les uns que les autres, tant au niveau formel que structurel. Le toit ondulé de l'architecte vietnamiem Tran Ba Tiep en est l'exemple incontestable (Fig.62). La combinaison des techniques d'assemblages vernaculaires avec quelques matériaux industriels judicieusement utilisés démontre la possibilité de construire une architecture débridée en marche pour une hybridation avec l'approche paramétrique. Le fait que des architectes tels que Buckminster Fuller, Frei Otto ou encore Renzo Piano prônant au départ la légèreté architecturale, aient aussi expérimenté le bambou, signifie que : l'expérimentation formelle et structurelle, la notion de légèreté et l'utilisation de matériaux naturels légers, peuvent entrer en parfaite corrélation. Pourtant, tous les architectes précédemment mentionnés n'ont pas utilisé l'approche paramétrique et toutes les possibilités qu'elle contient. Dans la prochaine partie, nous aborderons l'architecture « *hybride* », autrement dit une combinaison entre l'approche paramétrique « *high tech* » et une approche vernaculaire « *low tech* », et comment les deux peuvent intéragir pour poursuivre ce nouveau langage architectural déjà en marche vers le futur.

Liste des figures

Fig.1 p. 63: Vitra Design Museum, «*Grow your own house*», 2000, p.142
Fig.2 p. 64: http://pinterest.com & https://thenounproject.com
Fig.4 p. 70: https://issuu.com, «*Le Bambou : Du savoir-faire vernaculaire à l'architecture d'aujourd'hui*», p.17
Fig.5 p. 70: http://db.world-housing.net
Fig.6 p. 72: http://pinterest.com
Fig.7 p. 72: https://issuu.com, «*Versus, heritage for tomorrow*», p.226
Fig.8 p. 74: Bernard Rudofsky, « *Architecture sans architectes* », traduction Sté Nlle des éditions du Chêne, 1980, p.44
Fig.9 p. 74: http://wallpaperswide.com
Fig.10 p. 76: https://i.pinimg.com
Fig.11 p. 76: https://popperfont.net
Fig.12 p. 78: An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.15
Fig.13 p. 80: Xiaobing Yu, Inaugural Dissertation, «*Bamboo: Structure and Culture*», 14.05.2007, p.20
Fig.14 p. 80: Xiaobing Yu, Inaugural Dissertation, «*Bamboo: Structure and Culture*», 14.05.2007, p.21
Fig.15 p. 82: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.24
Fig.16 p. 82: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.24
Fig.17 p. 82: Xiaobing Yu, Inaugural Dissertation, «*Bamboo: Structure and Culture*», 14.05.2007, p.20
Fig.18 p. 84: http://www.bambouscience.fr / https://fr.wikipedia.org
Fig.19 p. 86: Eduard Broto, «*Le bambou : architecture et design : manuel pratique et 59 projets*», Barcelone : Links, 2014, p.15
Fig.20 p. 86: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.18
Fig.21 p. 86: Vitra Design Museum, «*Grow your own house*», 2000, p.168
Fig.22 p. 86: https://www.guaduabamboo.com/preservation/
Fig.23 p. 86: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.18
Fig.24 p. 86: https://everythingsbamboo.com
Fig.25 p. 86: https://www.bamboo-earth-architecture-construction.com
Fig.26 p. 88: An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.67-72
Fig.27 p. 88: An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.67-72
Fig.28 p. 88: An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.67-72
Fig.30 p. 90: An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.67-72
Fig.30 p. 90: http://www.portodalua.com.br
Fig.31 p. 90: http://www.portodalua.com.br
Fig.32 p. 90: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.48
Fig.33 p. 90: http://constructpix.com
Fig.34 p. 90: https://wordpress.com, Chinese Pavilion for Milan 2015 EXPO and Application of Bamboo on Long Span Structure
Fig.35 p. 90: https://whisperingwindsbamboo.wordpress.com
Fig.36 p. 90: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.45
Fig.37 p. 90: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.45
Fig.38 p. 90: http://bambus.rwth-aachen.de
Fig.39 p. 90: https://www.guggenheim.org
Fig.40 p. 92: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.50
Fig.41 p. 92: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.51
Fig.42 p. 92: http://www.worldarchitecturenews.com
Fig.43 p. 92: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.60
Fig.44 p. 92: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.70
Fig.45 p. 92: https://www.bamboo-earth-architecture-construction.com
Fig.46 p. 94: https://archive.org/stream/Roofs-PartOne-English-YonaFriedman
Fig.47 p. 94: http://www.larchitecturedaujourdhui.fr
Fig.48 p. 94: https://umanitoba.ca
Fig.49 p. 96: https://images.adsttc.com
Fig.50 p. 96: http://www.natrufied.nl
Fig.51 p. 98: https://actu.epfl.ch

Fig.52 p. 98: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.132
Fig.53 p. 100: Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012, p.119
Fig.54 p. 100: Pierre Frey, «*Simón Vélez Architecte // la maîtrise du bambou*», Actes Sud, 2013, p.204
Fig.55 p. 100: Pierre Frey, «*Simón Vélez Architecte // la maîtrise du bambou*», Actes Sud, 2013, p.206
Fig.56 p. 102: http://archidaily.com
Fig.57 p. 102: http://archidaily.com
Fig.58 p. 104: http://archidaily.com
Fig.59 p. 104: http://archidaily.com
Fig.60 p. 106: http://archidaily.com
Fig.61 p. 106: http://archidaily.com
Fig.62 p. 106: http://www.bambubuild.com

5. L'approche paramétrique combinée à l'approche vernaculaire : une architecture hybride et légère en bambou.

5.1. Hybridation dans la pratique.

5.1.1. De la génétique à l'architecture.

Le terme hybridation provient du latin « *hybrida* » signifiant « *sang mêlé* » et évoque un croisement de deux espèces différentes mais de même nature. Du point de vue de la génétique, cette fécondation ne suit pas les lois naturelles et donne naissance à une nouvelle espèce qui réunit les caractères spécifiques de chaque gêne « *parent* » de façon plus ou moins dominante. La rareté de l'hybridation naturelle s'explique par la dissemblance entre les génomes, autrement dit le nombre et la structure des chromosomes. De ce fait, pour qu'une hybridation fonctionne, il faut une similarité suffisante dans les génomes pour permettre leur coexistence cellulaire. Dans le cas d'une hybridation qui fonctionne, l'information génétique peut circuler et transmettre les compétences ou caractéristiques d'une espèce à une autre. Dans la pratique, l'hybridation est une opération de croisement qui a pour but d'exploiter certaines qualités d'une espèce et les transmettre à une autre. Ainsi, chaque espèce à la base est sélectionnée pour un ou plusieurs avantages intéressants et combinable à d'autres.[1]

Bien que cette méthode créée principalement par l'Homme soit devenue très fréquente dans l'amélioration d'espèces animales et végétales, l'hybridation n'est pourtant pas limitable à la génétique. En effet, cette capacité de combiner deux espèces différentes, mais de même nature, peut également s'appliquer à l'architecture avec l'approche paramétrique et vernaculaire pour donner lieu à un nouveau langage architectural, celui d'une architecture hybride et légère (Fig.1).

5.1.2. Deux approches différentes de même nature.

Bien que l'approche paramétrique et l'approche vernaculaire soient perçues de prime abord comme différentes et opposées, elles n'en demeurent pas moins de même nature. En effet, comme nous l'avons vu, ces deux approches partent

[1] Yves Demarly, Georges Barski, Simone Gilgenkrantz, Article « *Hybridation* », Encyclopædia Universalis [en ligne]

◀ Fig.1. ZCB Bamboo

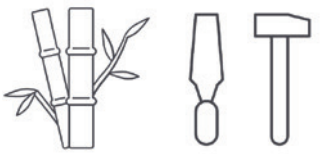
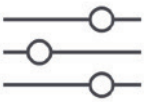
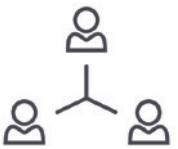
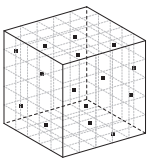
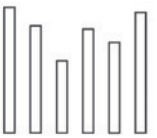
	LOW TECH	HIGH TECH
Paramètres de conception (entrée)	 Matériau, assemblages	 n paramètres
Recherche de formes (processus)	 design space concret (savoir-faire, collectivité et traditions)	 design space abstrait
Stratégie d'optimisation (processus, comment chercher)	 expérience (itérations)	 algorithme et calculs (itérations)
Problème d'optimisation	 contraintes et objectifs	 contraintes et objectifs
Mesures et analyse	 maquette/ sur le chantier	 simulations
Résultats **(sortie)**	 projet vernaculaire	 projet paramétrique

Fig.2.

tout d'abord d'un problème de base lié à un contexte avec des caractéristiques précises. A partir de ce problème, l'intuition de l'architecte ou de l'habitant conduit au développement d'un concept de base architectural qui se matérialisera et se perfectionnera de différentes manières selon l'approche choisie. Dans les deux cas, une stratégie de conception et d'optimisation est mise en place. Cette stratégie utilise des paramètres de conception d'entrée, qui sont les matériaux locaux et les techniques d'assemblages pour l'approche vernaculaire, et *n* paramètres définissables pour l'approche paramétrique. Dans la recherche de formes et de leur élaboration, un « *espace de jeu* » qui contient toutes les potentielles solutions au problème initial posé est présent dans chacune des approches. Cet espace est «*abstrait*» pour l'approche paramétrique et contient une grande quantité de solutions non intuitives, tandis qu'il est «*concret*» pour l'approche vernaculaire en proposant une série de solutions basées sur les savoirs-faire, la collectivité et les traditions. De la même manière, une stratégie d'optimisation est mise en place pour les deux, autrement dit une méthode déterministe de calculs ou d'algorithme génétique pour l'approche paramétrique, et une méthode basée sur l'expérience collective et l'Histoire pour l'approche vernaculaire. Dans les deux cas, la recherche et le choix de la meilleure solution en résulte d'une série d'itérations afin de respecter un problème d'optimisation fait de contraintes et d'objectifs fixés. Afin de juger de la validité du projet, des mesures et analyses sont mises en place pour chacune d'elle. La maquette, mais surtout les tests sur le chantier dominent dans l'approche vernaculaire, alors que l'approche paramétrique utilise des simulations informatiques. Au final, l'architecte ou l'habitant ouvrier est le décisionnaire final. En somme, la similarité de ces deux approches permet alors une hybridation au sens propre du terme (Fig.2).

5.2. Les diverses possibilités d'hybridité.

Tout comme dans la génétique, le croisement entre les deux approches peut s'exprimer dans un langage architectural dont les caractéristiques dépendent de la répartition ou de la proportion des caractéristiques transmises par les approches « *parents* ». Toute comme dans la génétique, diverses possibilités d'hybridité sont possibles selon les critères que l'on souhaite mettre en avant dans l'approche hybride.

5.2.1. Les critères d'évaluation pour l'hybridité.

Le terme « *Low Tech* » pour désigner l'approche vernaculaire et le terme « *High Tech* » pour désigner l'approche paramétrique vu auparavant seront repris ici. Afin d'évaluer les diverses possibilités d'hybridité, il est important de fixer des critères d'évaluation, qui selon les approches, constituent des avantages majeurs.

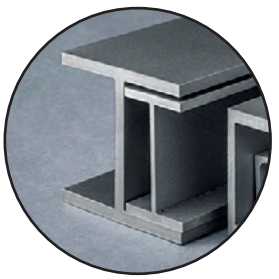
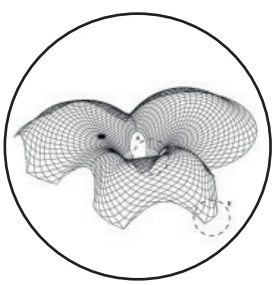
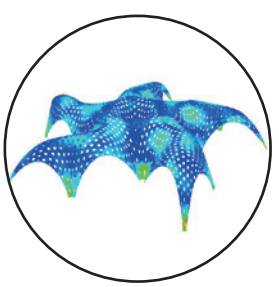
	HIGH TECH	LOW TECH
MATÉRIAUX		
ASSEMBLAGES		
FORME		
ANALYSE		

Fig.3. Les critères d’évaluations de l’approche hybride.

Ainsi, pour chacune d'elle seront distingués quatre critères : les matériaux, les types d'assemblages, la forme du projet et enfin son analyse structurelle (Fig.3).

Prenons tout d'abord l'exemple de l'approche « *High Tech* » guidée par les nouvelles technologies. Les matériaux dits « *high tech* » sont les divers matériaux issus de l'industrie de la construction, transformés et non utilisés directement depuis leur milieu naturel. Cela inclu bien évidemment le métal, le béton, les divers composites et matières plastiques mais aussi le bois non massif comme le bois lamellé collé. Nous désignons les matériaux qui constituent essentiellement le projet et sont dominants dans la structure. Une utilisation limitée et justifiée dans le projet n'est pas pris en compte. Les assemblages dit « *high tech* » peuvent correspondre d'une certaine manière, à des éléments de connections complexes et technologiques obligatoirement issus de l'industrie de pointe et hors des compétences d'un artisanat local. Les assemblages complexes de Markus Heinsdordd ou de Shoei Yov sont des assemblages «*high tech*», dans la mesure où ils font intervenir un grand nombre de pièces diverses et précises. De la même manière, tous les assemblages imprimés avec des imprimantes 3D, nécessitant des machines spéciales de pointe sont considérés également comme «*high tech*». De plus, cette catégorie englobe la transformation d'un matériau selon des procédés industriels importants. Par exemple, un assemblage avec une cale en bois massif vu précèdemment, peut être perçu comme un type d'assemblage « *low tech* » mais s'il est transformé en bois lamellé collé plus résistant et issu d'un procédé industriel conséquent, alors nous pouvons parler d'assemblage «*high tech*». En outre, la forme dite « *high tech* » s'apparente tout simplement à une forme paramétrique contextuelle et innovante. Cette forme est évolutive et issue de paramètres définis et modifiables comme nous l'avons vu précèdemment. Enfin, l'analyse dite « *high tech* » correspond aux diverses simulations informatiques dont celle avec Karamba par exemple pour évaluer les performances et les qualités du projet.

Pour l'approche vernaculaire, ces mêmes critères d'évaluations s'expriment différemment. Les matériaux « *low tech* » représentent tous les matériaux présents dans la nature et utilisables directement sans procédés d'industrialisation. Ces matériaux contingents d'un lieu, se renouvellent régulièrement et naturellement pour constituer une matière première en abondance et pas cher. Le bois massif et surtout le bambou vu auparavant sont des exemples majeurs de matériaux «l*ow tech*» légers. Les assemblages « *low tech* », eux, correspondent à ce que nous avons vu précédemment dans l'architecture vernaculaire avec le bambou. Ces assemblages sont le fruit de l'expérience collective sur le long terme et sont la preuve de savoirs-faire locaux qui ne nécessitent pas l'intervention de procédés industriels importants. Si des matériaux industriels tels que le métal ou le ciment sont utilisés en faible quantité pour des assemblages réalisables par

un simple artisanat local, alors nous pouvons dire que l'aspect « *low tech* » est toujours garanti. Les assemblages précèdemment mentionnés dans les types de combinaisons du bambou sont des exemples d'assemblages «*low tech*». La forme d'un projet dite «*low tech*» est une forme ordinaire de bâtiment emprunt d'une localité, et qui répond le plus pragmatiquement possible à des problèmes contextuels. Les exemples vernaculaires vus auparavant constituent des habitats «*low tech*». Cette forme n'a pas un but esthétique ou d'expérimentation formelle de prime abord, c'est le reflet d'une culture locale et d'un quotidien. Enfin, l'analyse «l*ow tech*» s'apparente à une évaluation des performances et des qualités du projet non pas par simulation informatique, mais par maquette directement et des tests sur le site de construction à l'échelle 1/1. La *Green School* de IBUKU à Bali est un bel exemple d'analyse «*low tech*». En effet, le projet a été directement pensé, amélioré et testé en maquette sur le site à tel point que la maquette était directement présente sur le chantier pour reproduire le projet à la vraie échelle.

5.2.2. Hybridité à dominance « Low Tech ».

L'hybridité à dominance « *low tech* » signifie que parmi les 4 critères d'évaluations choisis, 3 font partie de l'approche « *low tech* » vernaculaire. Dans ce modèle d'hybridité, 4 combinaisons sont possibles. Dans le but de ne pas énumérer systématiquement toutes les diverses possibilités, une hybridation bien représentative sera présentée plus précisément. Dans le cas présent, l'hybridation 4 représente bien cette dominance du vernaculaire sur le paramétrique dans l'approche hybride (Fig.5). Dans cette hybridité, les matériaux, les assemblages et la forme sont issues d'une approche «*low tech*», l'analyse du projet, elle, est issue d'une approche «*high tech*». Prenons l'exemple d'une maison en bambou vernaculaire aux Philipines (Fig.4). La forme de cette maison est très simple et contextuelle, en plan c'est un rectangle sur pilotis couvert d'un toit à deux pans. Les pilotis permettent de détacher la maison du sol et de permettre également du stockage de matériel au sec en dessous. Ce type de maison utilise directement le bambou à proximité et présent massivement dans le pays. Le bambou permet également d'assurer la ventilation de la maison face à l'humidité importante qui règne. Les divers éléments architecturaux constitutifs de la maison ont été réalisés grâce à des assemblages simples comme ceux vu précèdemment. Tous ces assemblages sont issus des savoirs-faire liés à ce matériau et permettent la construction d'une maison qui se veut au final légère. Dans le cadre d'une approche hybride et du mélange de connaissances liées à chaque approche de base, une analyse informatique sur la structure du bâtiment avant sa construction serait théoriquement tout à fait envisageable. Au lieu d'effectuer des tests sur le chantier, cette analyse permettrait des possibilités d'améliorations structurelles.

◀ Fig.4.

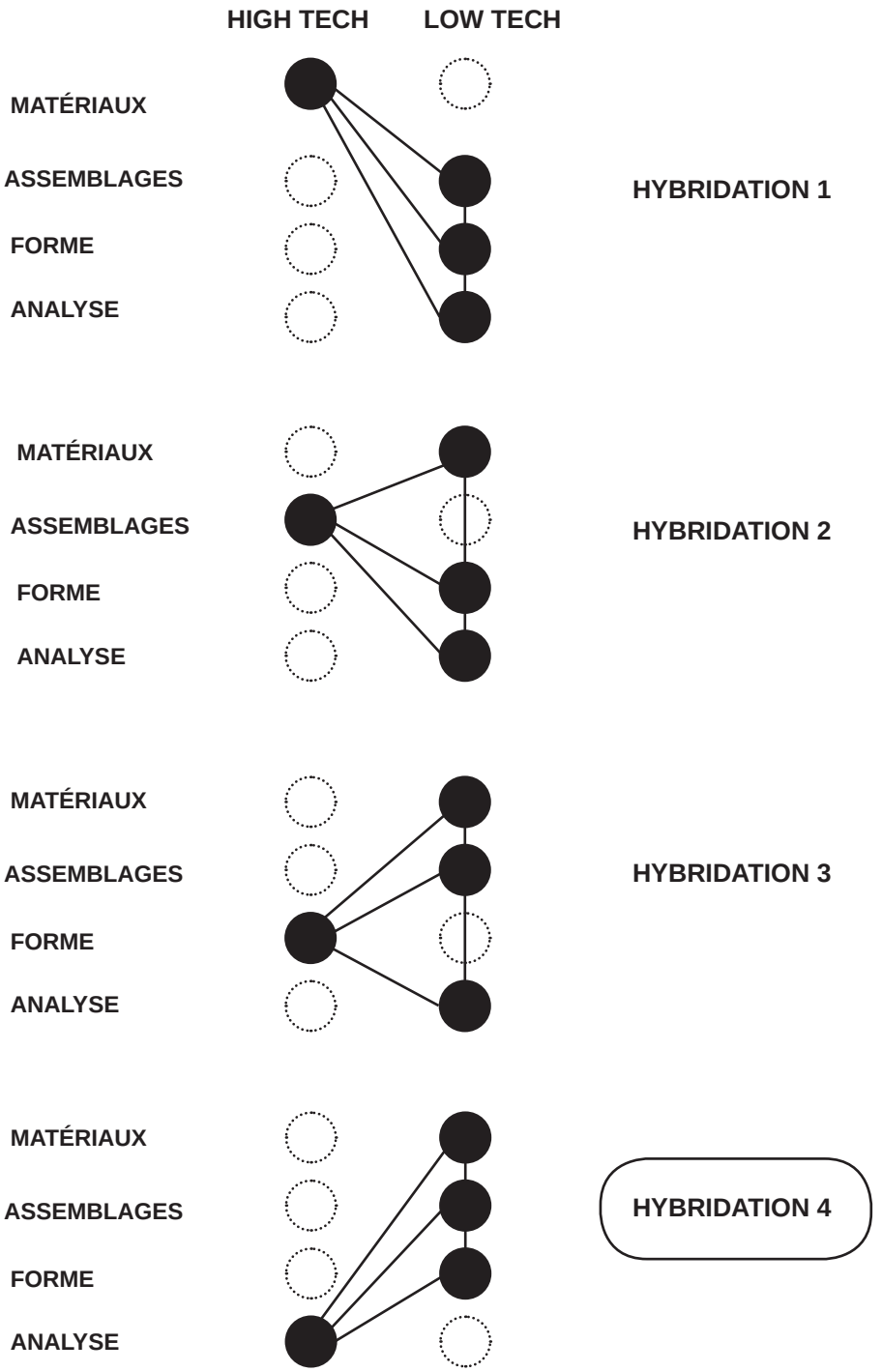

HIGH TECH
LOW TECH
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 1
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 2
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 3
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 4

Fig.5.

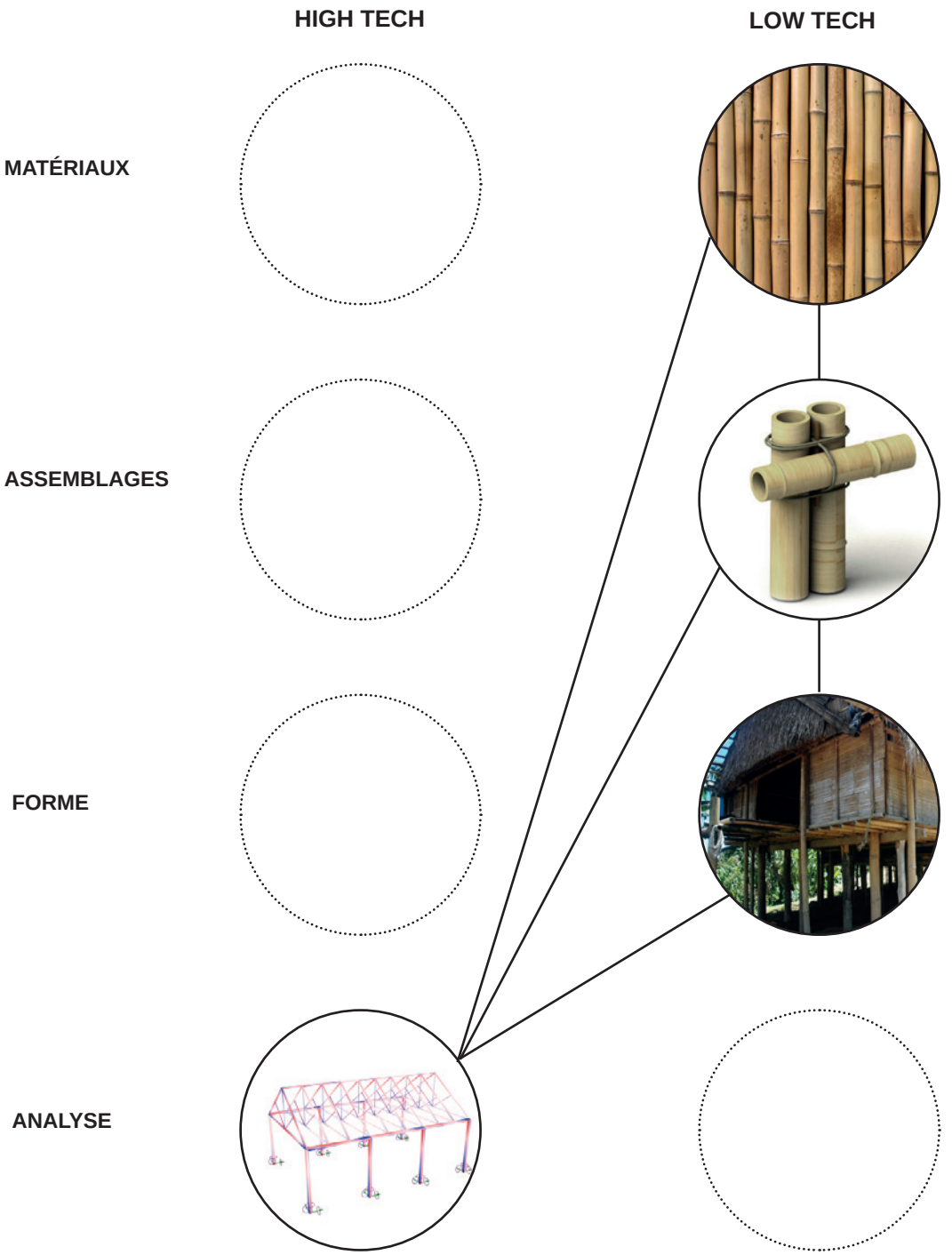


Fig.6.

Nous pourrions gagner en efficacité et en légèreté, tout en conservant les qualités « *low tech* » initiales (Fig.6). Cette approche qui aurait alors plus un but humanitaire, semble néanmoins compliquée à mettre en oeuvre réellement dans la mesure où ce type d'habitations est présent principalement dans les campagnes pauvres et reculées.

5.2.3. Hybridité à dominance « High Tech ».

L'hybridité à dominance « high Tech » signifie à son tour que parmi les 4 critères d'évaluations choisis, 3 font partie de l'approche « *high tech* » paramétrique. Tout comme l'hybridité précédente, 4 combinaisons sont possibles. Une hybridation bien représentative de cette dominance «*high tech*» est l'hybridation 1 (Fig.8). Dans cette hybridation, la forme, les assemblages et l'analyse sont issus d'une approche technologique et paramétrique mais les matériaux, eux, restent «*low tech*».

Penons l'exemple de la toiture du Centre Pompidou de Shigeru Ban à Metz (Fig.7). Cette toiture emblématique illustre d'une certaine manière ce type d'hybridation. En effet, la structure de la toiture est principalement constituée de bois, un matériau «*low tech*» qui a su intelligemment être adapté à une forme complexe. La forme de la toiture est une sorte de nappe évidée et légère qui recouvre en entier le bâtiment de 8000 m^2. Les grands débords de cette gigantesque canopée nous rappelle sa fonction protectrice, à l'image du pavillon ZERI de Simón Vélez. Les motifs hexagonaux de la structure sont une réinterpretation du cannage des chapeaux traditionnels chinois dont l'élaboration exacte sur l'ensemble de la toiture complexe n'a été possible que grâce aux outils paramétriques.
Cependant bien que le matériau de base de cette toiture soit le bois, les assemblages qui paraissent de prime abord très simples relèvent pourtant d'une certaine complexité. En effet, même si les connections sont simples et très pragmatiques entre les réseaux de planches formant le maillage structurel, les connections au niveau des poutres de rives ou des anneaux métalliques de renforcement sont beaucoup plus complexes. Chaque assemblage en acier est constitué d'une multitude de pièces spécifiques dont la fabrication n'a été possible qu'à travers un procédé industriel spécifique loin d'un simple artisanat local. Pour cette raison, les assemblages sont vu comme «*high tech*» dans ce projet.

Enfin l'analyse d'une telle structure a évidemment nécessité une étude approfondie de mesures et de simulations grâce aux outils informatiques et paramétriques afin d'assurer son état de service. Au final ce projet est une belle synthèse d'architecture hybride et légère dont l'approche «*high tech*» a été résolument dominante (Fig.9).

◀ Fig.7.

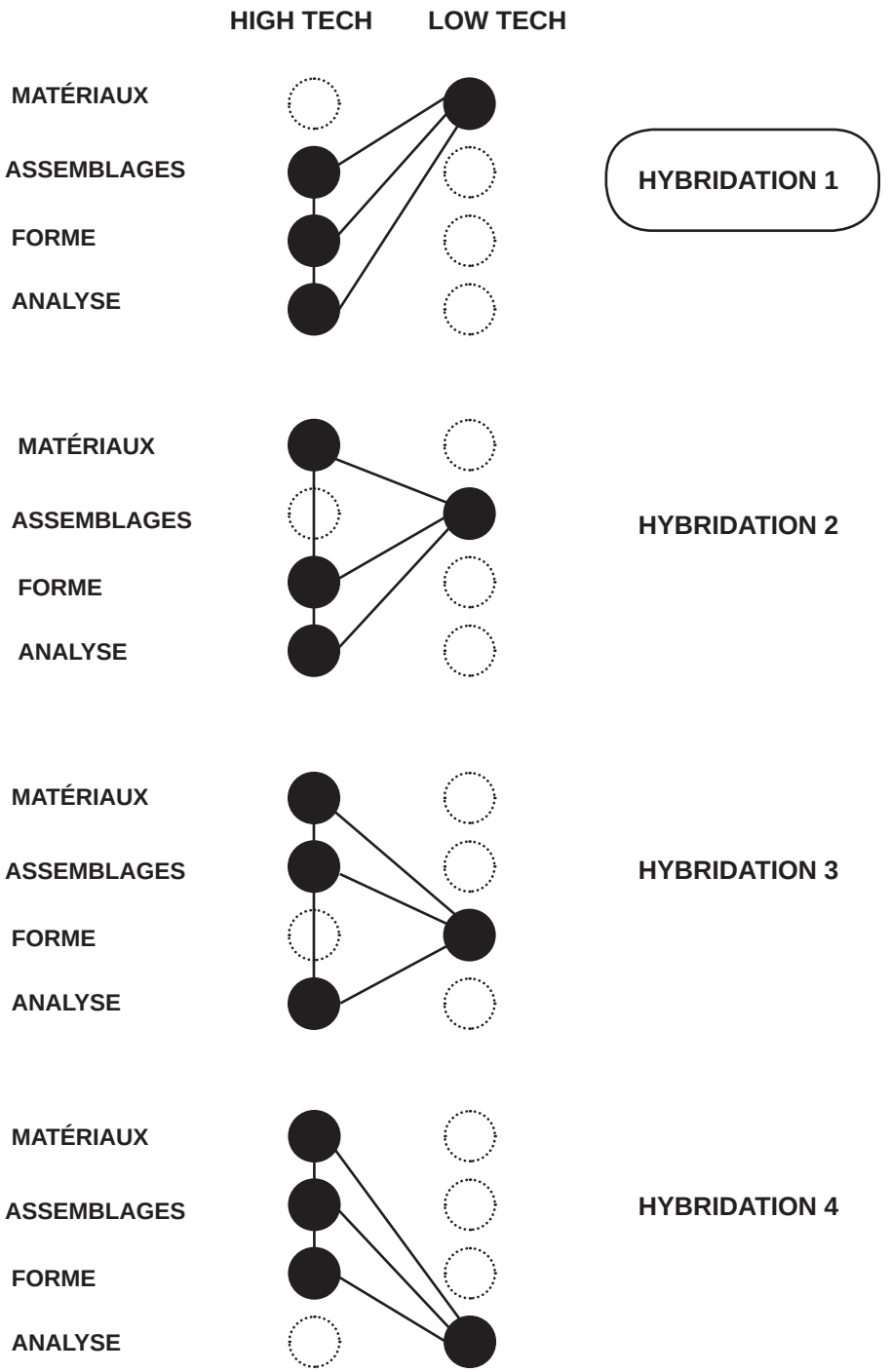

HIGH TECH
LOW TECH
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 1
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 2
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 3
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 4

Fig.8.

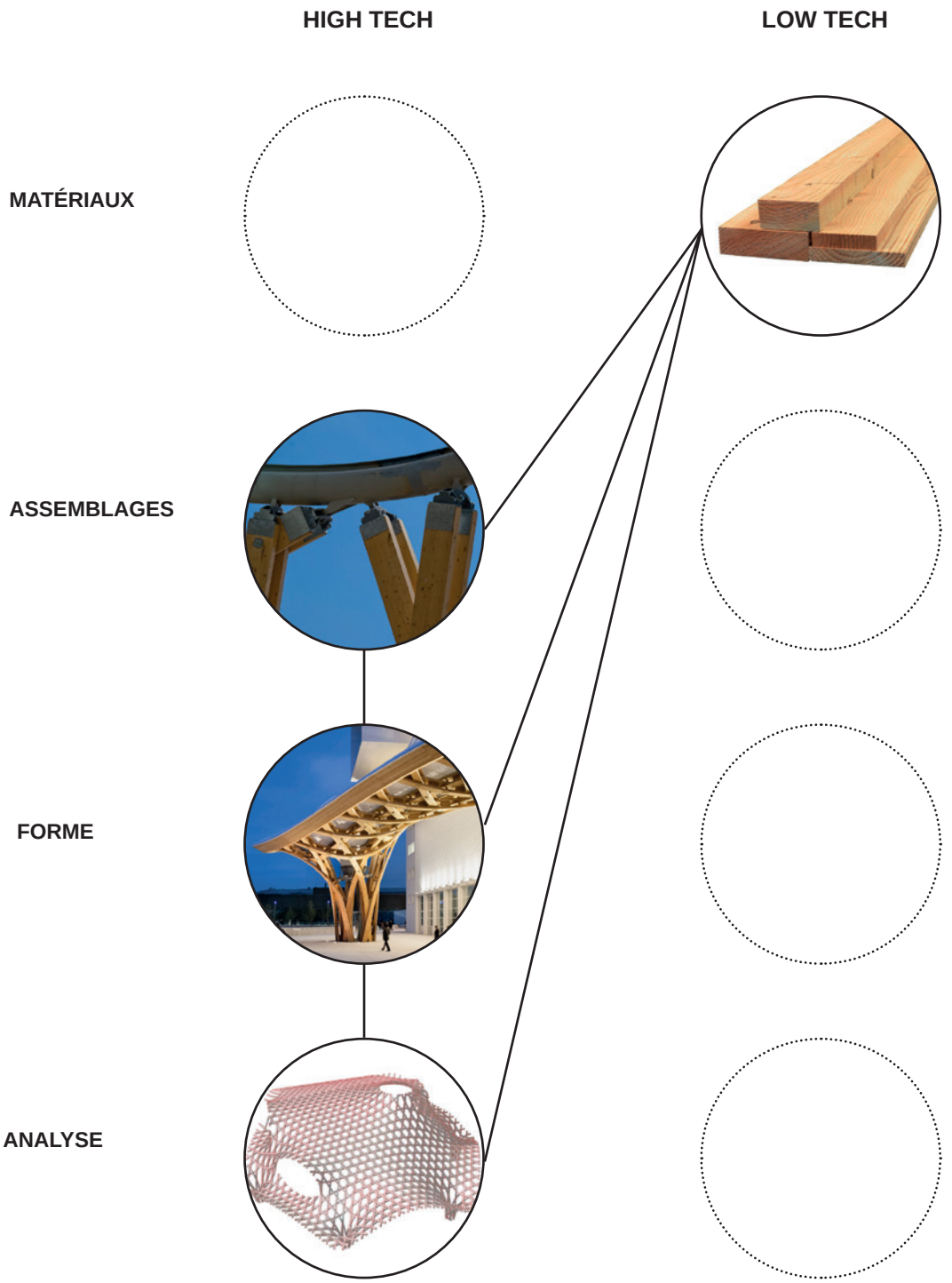


Fig.9.

▲ Fig.10.

▼ Fig.11.

5.2.4. Hybridité à équivalence.

L'hybridité à équivalence entre l'approche « *high tech* » et « *low tech* » signifie désormais que parmi les 4 critères d'évaluations choisis, 2 font partie chaque fois d'une même approche. Cette fois-ci 6 combinaisons sont possibles. L'hybridation qui représente au mieux cette équivalence est l'hybridation 2, où les assemblages et matériaux sont « *low tech* » mais la forme et l'analyse sont issues de l'approche « *high tech* » (Fig.12 et Fig.13).

Le « *ZCB Bamboo Pavilion* » réalisé par « *The Chinese University of Hong Kong School of Architecture* » à Hong Kong est un exemple marquant de ce type d'hybridation (Fig.10). Le projet réalisé est un espace événementiel public construit à l'occasion du « *Construction Industry Council's Zero Carbon Building* » qui a eu lieu durant l'été 2015 et récompensait le bâtiment avec la plus faible emprunte carbone. La forme de ce bâtiment est résolument paramétrique avec une structure « *gridshell* » courbe en bambou d'une largeur de 37m et d'une hauteur de 12m environ (Fig.11). L'espace couvert par cette structure est d'environ 350m^2, pouvant accueillir plus de 200 personnes avec seulement trois appuis au sol. Cette structure est composée de 475 cannes de bambou au diamètre important et dont la courbure directement faite sur le site, génère la forme. La structure en « *grishell* » forme, comme son nom l'indique, une sorte de coque évidée légère maintenue au sol par trois colonnes creuses. Sa forme a été directement pensée à travers Grasshopper tout comme son analyse structurelle à travers diverses simulations informatiques. A partir de ces trois appuis au sol, les cannes de bambou sont courbées et orientées d'un appui à l'autre pour créer le maillage structurel. L'utilisation d'un matériau « *low tech* » tel que le bambou très présent dans ces régions, permet d'avoir accès directement et en masse à la matière première du projet sans polluer l'environnement avec son transport et sa mise en œuvre. Le bambou utilisé est une espèce de bambou local appelé « *mao zhu* » et dont les cannes avaient une maturité d'environ 4 ans. Pour chacune d'elle, le diamètre était entre 12 et 15 cm pour une longueur moyenne de 7m. Les assemblages très simples et « *low tech* » sont constitués de plus de 3000 petites bandes métalliques. Celles-ci sont inspirées des savoirs-faire des ouvriers cantonais qui réalisent les échafaudages en bambou déjà présents dans l'architecture vernaculaire avec des simples cordes comme nous avons vu précédemment. Ces assemblages permettent la mise de bout en bout des cannes pour atteindre la longueur requise. Afin de préserver le bambou du sol, les appuis sont constitués d'une base circulaire en béton. Nous retrouvons là une approche digne de Simón Vélez, en utilisant majoritairement le bambou comme matériau de base «*low tech*», sans pour autant refuser l'utilisation minime et justifiée de matériaux plus industriels.

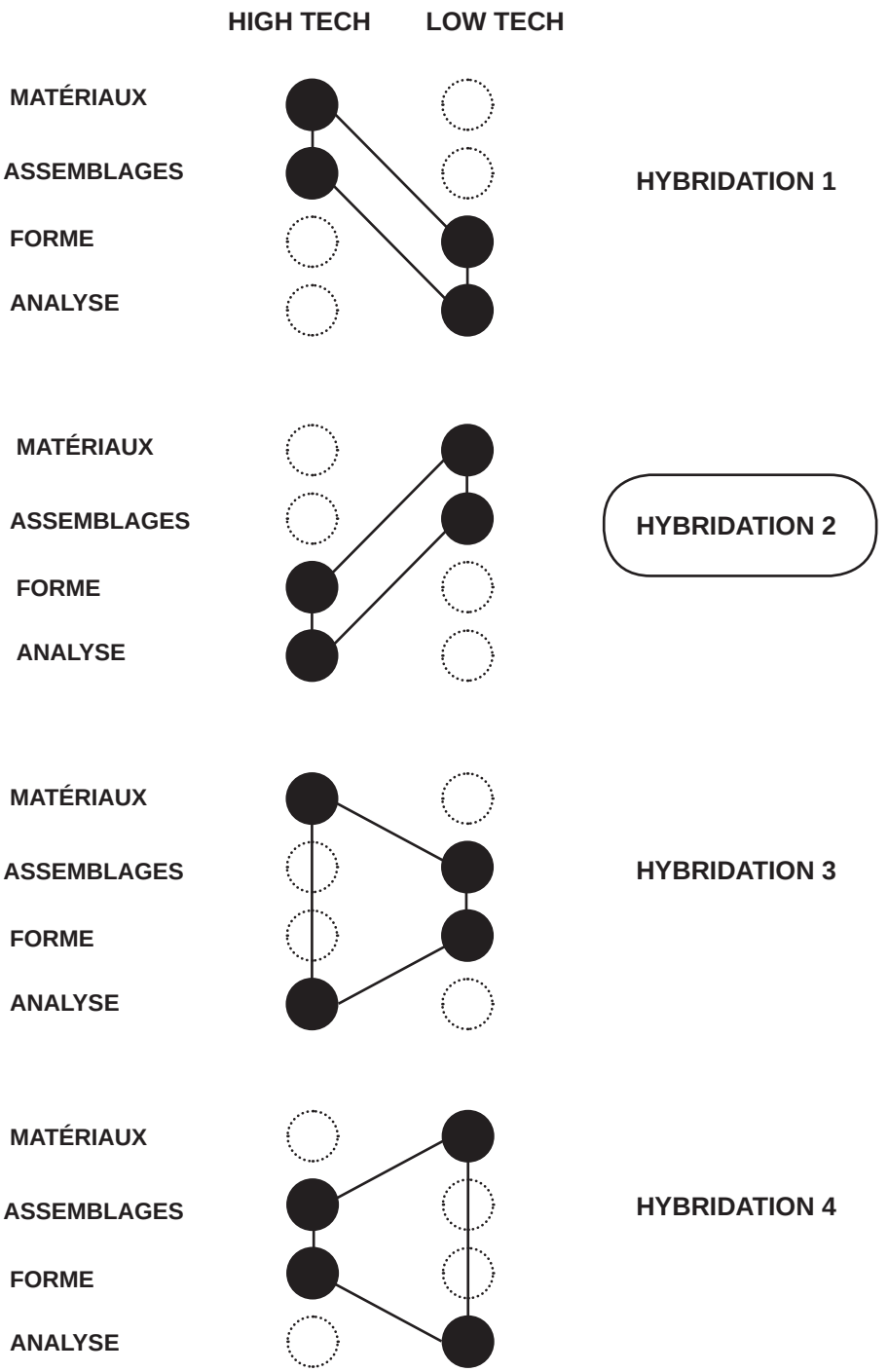

HIGH TECH
LOW TECH
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 1
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 2
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 3
MATÉRIAUX
ASSEMBLAGES
FORME
ANALYSE
HYBRIDATION 4

Fig.12.

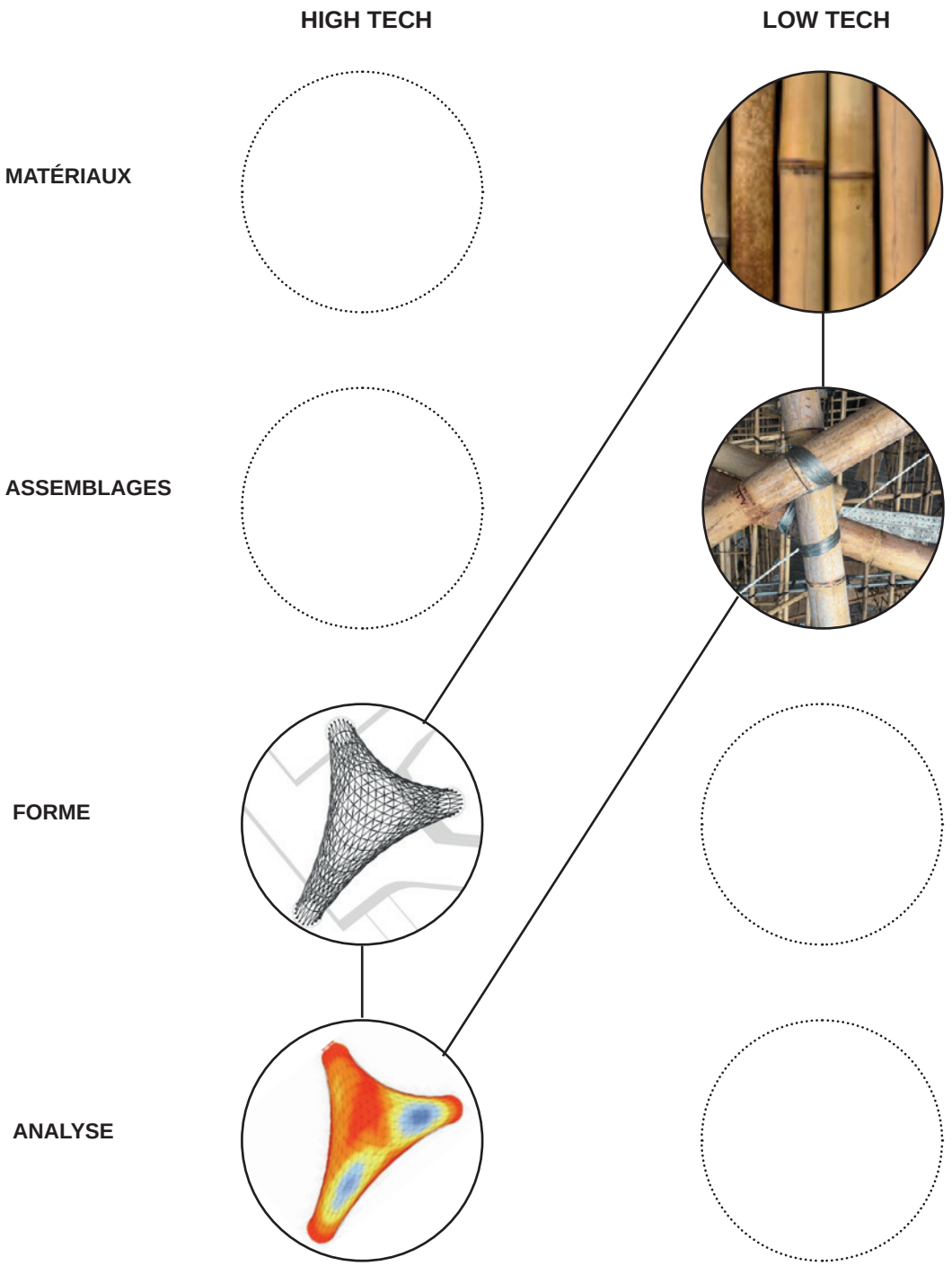
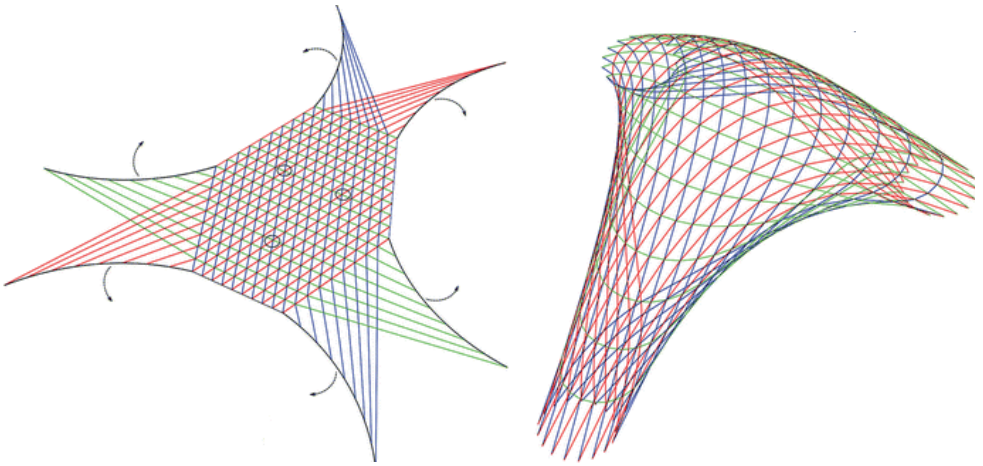
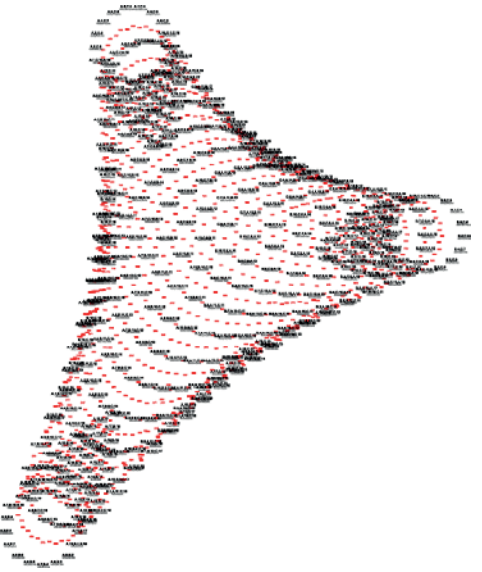


Fig.13.



▲ Fig.14.



▲ Fig.16.

▲ Fig.17.

▲ Fig.18.

▼ Fig.15.

Les assemblages sont loin d'être complexes, mais réinterprètent très simplement les liens par des cordes. Dans le cadre d'un respect plus grand de l'environnement, la membrane en traction protégeant la structure faite en plastique aurait aussi pu être pensée en tissu afin de renforcer l'aspect « low tech ».

Le but de ce bâtiment expérimental était d'investiguer pour savoir comment les outils informatiques et paramétriques de conception (Fig.14) pouvaient être stratégiquement combinés avec les méthodes de constructions existantes et issues des savoirs-faire du passé (Fig.15). L'approche paramétrique a notamment permis de référencer chaque coordonée des noeuds de la structure (Fig.16), les répertorier et les reporter sur les cannes de bambou (Fig.17) afin d'optimiser l'organisation sur le chantier et le temps de construction. L'efficacité de l'hybridité des approches a permis de réaliser le pavillon en moins de 90 jours[2]. L'espoir de cette hybridation était de permettre l'apparition d'un nouveau langage architectural innovant avec une emprunte carbone minimale respectueuse de l'environnement. Le moins que l'on puisse dire c'est que le résultat de cette recherche a été plus que convaincant. Cela montre à quel point l'engagement de savoirs-faire des ouvriers locaux sur place (Fig.18) peut être étendue à travers l'introduction de la recherche de forme paramétrique et l'analyse de la structure en temps réelle avec des outils de simulations physiques. Tous les moyens d'analyse ont été utilisés, de la maquette à diverses échelles, aux simulations FEA avec Grasshopper. Ce projet est le symbole d'une collaboration intense entre architectes, ingénieurs et ouvriers locaux en utilisant tous les divers modes de représentation possibles, que ce soit digital, en maquette ou bien sur place à échelle réelle. Il montre également à quel point une telle hybridation peut mener à un langage architectural alternatif pour la réalisation de programmes éphémères, tels que des théâtres urbains ou des structures de festivals religieux très présents à Hong-Kong. Le pavillon a été utilisé 8 mois avant d'être totalement recyclé[3]. Ce projet réalisable sans utiliser massivement des matériaux qui polluent l'environnement ni impacter violemment le territoire est une réponse efficace pour des programmes qui se veulent temporaires et donc amenés à disparaitre ou à se déplacer. C'est un projet axé sur l'éco-efficacité nécessaire dans les zones de fort développement urbain comme Hong-Kong. Dans ce cas de figure, la structure peut être facilement démontée et transportée, de même que les appuis hors-sol en béton.

Pour reprendre la question de Buckminster Fuller posée à Norman Foster, « *How much does your building weigh, Mr.Foster ?* », ici la réponse est claire.

---

[2] Kristof Crolla, Article «*Building indeterminacy modelling – the 'ZCB Bamboo Pavilion' as a case study on nonstandard construction from natural materials*», 21/07/2017

[3] Ibididem

« [...] *plus la médiation instrumentale est complexe, c'est-à-dire plus la technologie mise en œuvre est sophistiquée, moins l'auteur du projet le maîtrise et plus l'usager final de la chose bâtie est tenu à distance. Cette dématérialisation de l'architecture, fondée sur un allongement de la distance entre le dessein créateur et l'ouvrage bâti [...] Elle fragmente en effet les savoirs qu'elle structure en sous-ensembles […] Au fur et à mesure que s'étend son emprise, la possibilité des synthèses s'éloigne et la spécificité du rôle de l'architecte devient plus difficile à exercer, quand elle ne devient pas tout simplement impossible.* »[4]

[4] Pierre Frey, «*Simón Vélez Architecte // la maîtrise du bambou*», Actes Sud, 2013, p.60

La légèreté de la structure en bambou avec la membrane est impressionnante, seulement 6,8 tonnes. A titre de comparaison, seuls 3m^3 de béton atteindraient ce poids dans le cas d'une coque en béton. De plus, avec cette quantité réduite de matière, une coque de l'envergure du Pavillon ZCB serait tout simplement impossible à faire. La légèreté du bambou combiné à l'élancement incroyable de cette structure paramétrique démontre ainsi à quel point ce type hybridation peut constituer une nouvelle architecture hybride, légère et respectueuse des problématiques actuelles sur le climat et l'environnement.

5.2.5. La limite de l'hybridité.

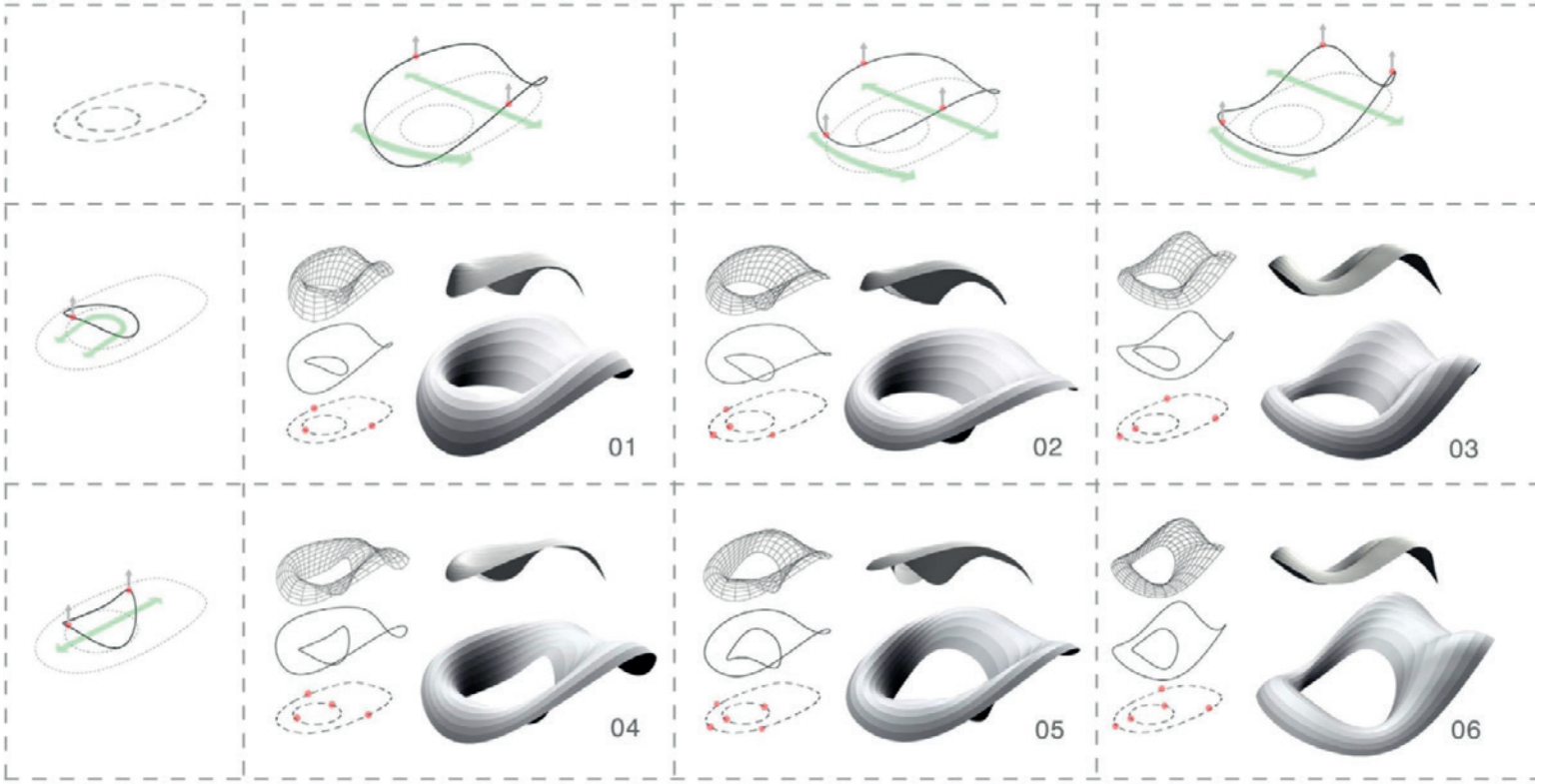
Après avoir vu les diverses possibilités d'hybridité, il est important de connaître la limite à ne pas franchir pour obtenir une combinaison valable du point de vue de la faisabilité. Le risque de l'approche paramétrique dans une hybridation telle que celle vue précèdemment, c'est le développement trop complexe d'une forme si bien qu'elle ne soit pas constructible avec les matériaux et assemblages « *low tech* ». Autrement dit, si le décalage entre l'approche « *high tech* » et l'approche « *low tech* » est trop important et trop décontextualisé, alors l'hybridation ne peut fonctionner. L'aspect «*trop complexe*» souvent reproché à l'architecture digitale et paramétrique a été largement présent ces dernières années, puisque ce type d'architecture était souvent vue comme difficilement réalisable ou du moins de façon économique et écologique. Pour Pierre Frey «*[...] sur le strict plan visuel, l'image à l'écran nous a donné le sentiment de dématérialiser l'architecture et de créer une distance infranchissable, comme irréelle, entre l'intention de son auteur et la réalité du terrain. On touche ici au vieux débat sur le rapport entre l'architecture et ses représentations.»*[5] De la même manière, Buckminster Fuller en 1969 parlait déjà des risques liés à une trop grande spécialisation des connaissances sans un certain partage ou compromis; et de l'usage trop dominant de l'informatique qui « *rendra l'homme désuet en tant que spécialiste de la gestion et de la production matérielle* »[6].

Pour cette même raison, le rôle de l'architecte et des ouvriers locaux dans l'approche hybride est de s'assurer que la stratégie de conception, d'optimisation et de réalisation puissent entrer en corrélation avec les deux approches. C'est le processus décisionnel que nous avons mentionné depuis le début de cet écrit qui est déterminant et juge de la faisabilité d'un projet architectural. Dans le cas où cette limite n'est pas franchie, interressons nous plus précisement à l'hybridité choisie comme nouveau langage architectural tourné vers le futur.

---

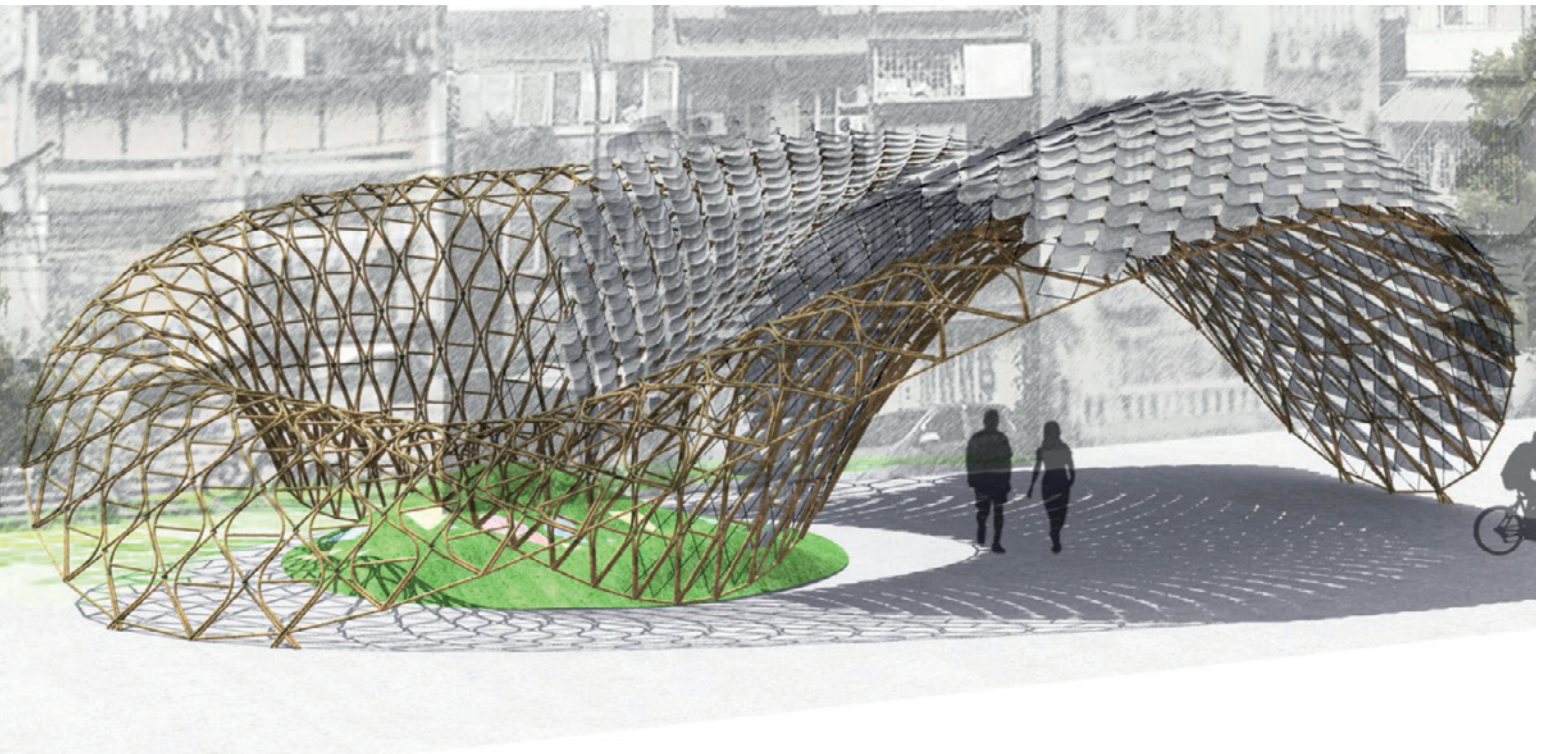
[5] Pierre Frey, *«Simón Vélez Architecte // la maîtrise du bambou»*, Actes Sud, 2013, p.59

[6] Pierre Frey, *«Learning from Vernacular»*, Actes Sud, 2010, p.35



▲ Fig.19.

▼ Fig.20.



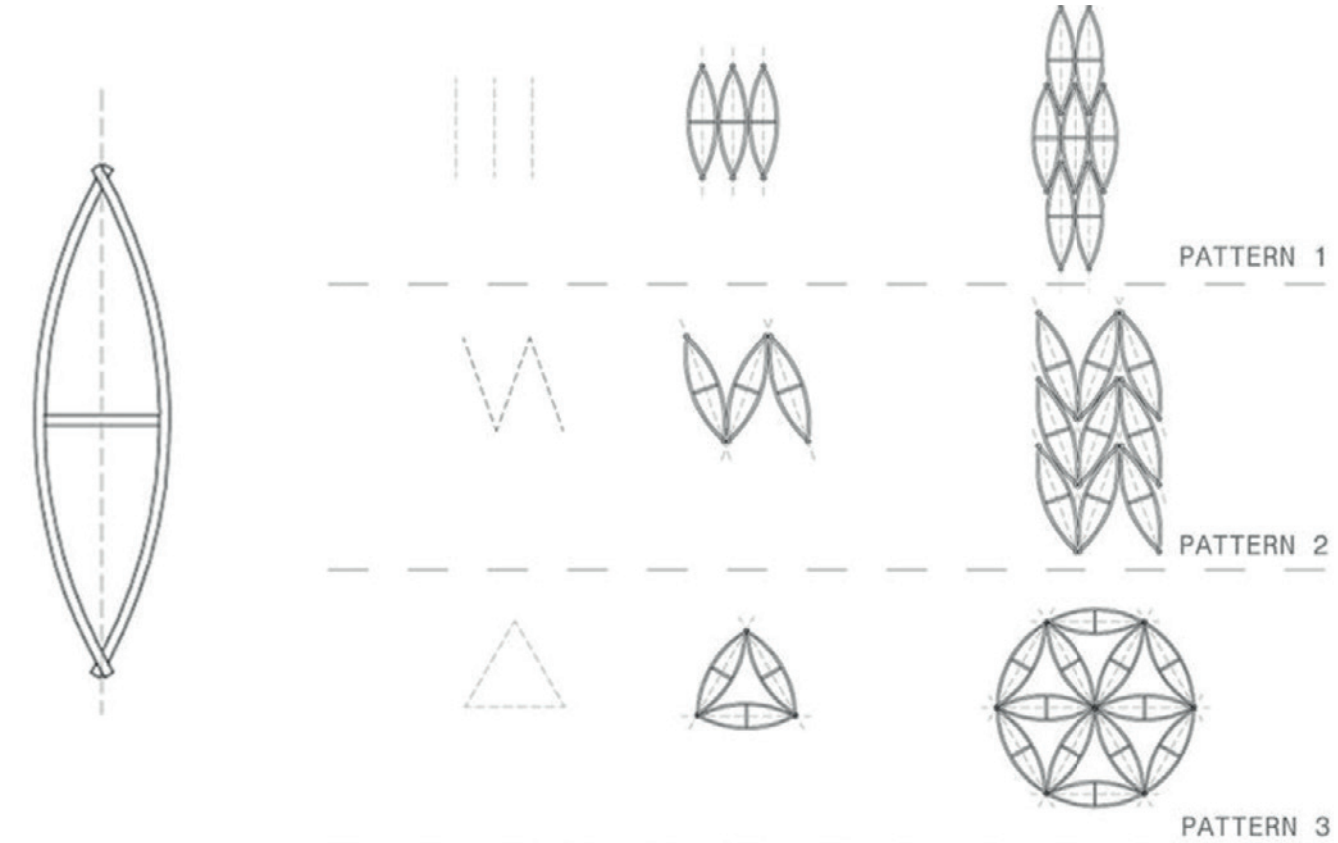
5.3. L'approche hybride choisie pour le projet architectural.

L'hybridation choisie pour le développement futur d'un projet architectural est l'hybridation par équivalence vue précèdemment. Nous rappelons que dans ce cas de figure, les matériaux et les assemblages seront issus d'une approche vernaculaire simple et «*low tech*» tout en s'alliant avec une forme et une analyse architecturale issues d'outils informatiques et paramétriques « *high tech* ». Alors que nous énoncions au début de cet écrit, les 5 principes fondateurs de la «*légèreté économique*» comme nouvelle base architecturale pour le futur, nous allons désormais voir comment cette hybridation parvient à les respecter tous à travers l'analyse d'un projet type qui résume bien le schéma de pensée mis en place depuis le début. Ce projet se nomme « *Bamboo 2.0* », il a été imaginé par l'architecte Dao Truong au Vietnam et a gagné en 2015, le prestigieux « *WA award* » décerné par la « *World Architecture Community* » fondée en 2006 . Le but était de mettre en lumière les projets remarquables et inspirants pour l'architecture de demain. Le projet est basé sur une recherche autour du bambou et comment le développement de ce matériau peut être mis au service des outils paramétriques de conception. Le concept d'associer les méthodes vernaculaires d'assemblages du bambou avec la création d'une « *forme libre* » paramétrique s'insère pleinement dans l'approche hybride mise en place et les principes de la «*légèreté économique.*»

5.3.1. Le respect du principe de la libération du sol

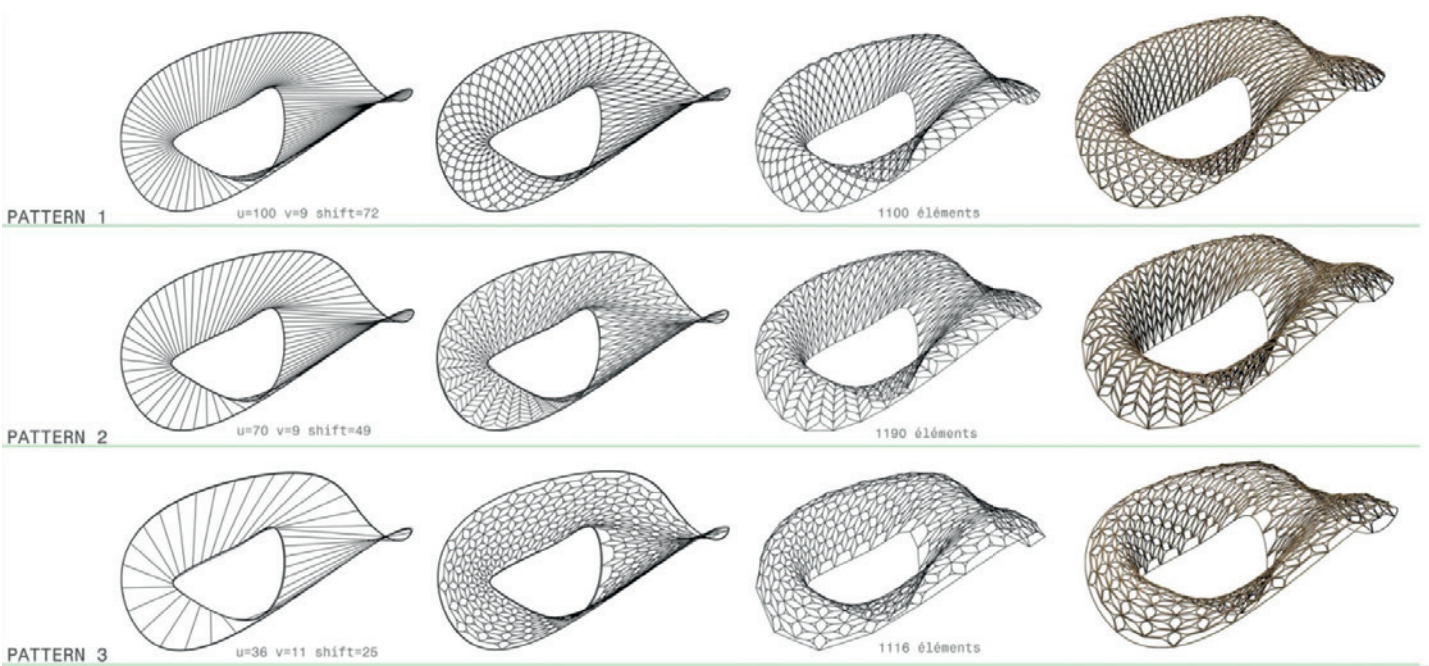
Le principe de la libération du sol est respecté dans ce projet dans la mesure où les appuis au sol restent limités. A la différence du pavillon ZCB vu précèdemment, la conception paramétrique a permis de générer une forme de projet et de structure en grishell détachée directement du sol et qui n'utilise pas de piliers. La forme du projet constitue directement des appuis stables et succincts sans établir un linéaire de murs contraignants. De la même manière, le projet semble être posé au sol et non pas ancré profondement avec des fondations de béton, ou même des appuis hors sol. Ainsi, dans le cadre d'un programme public temporaire en plein Hanoï, cette libération du sol et son faible impact dessus, renforce la notion de mobilité et d'effacement du projet sur le long terme. Désormais l'architecture ne contraint plus l'environnement, mais s'adapte à lui (Fig.19).

La «*Due Diligence Matrix*» du projet (Fig.20) nous montre les diverses itérations faites pour trouver la forme la plus adaptée afin de garantir un détachement optimal du sol. En fonction de chaque appui au sol définis, la forme évolue, devient plus ou moins complexe mais surtout elle sort du champs de l'intuition de base pour ouvrir de nouveaux horizons formels et créatifs. Cette forme est clairement issue du processus de « *form finding* » vu précédemment et dont le but


PATTERN 1
PATTERN 2
PATTERN 3

▲ Fig.21.

▼ Fig.22.


PATTERN 1
u=100 v=9 shift=72
1100 éléments
PATTERN 2
u=70 v=9 shift=49
1190 éléments
PATTERN 3
u=36 v=11 shift=25
1116 éléments

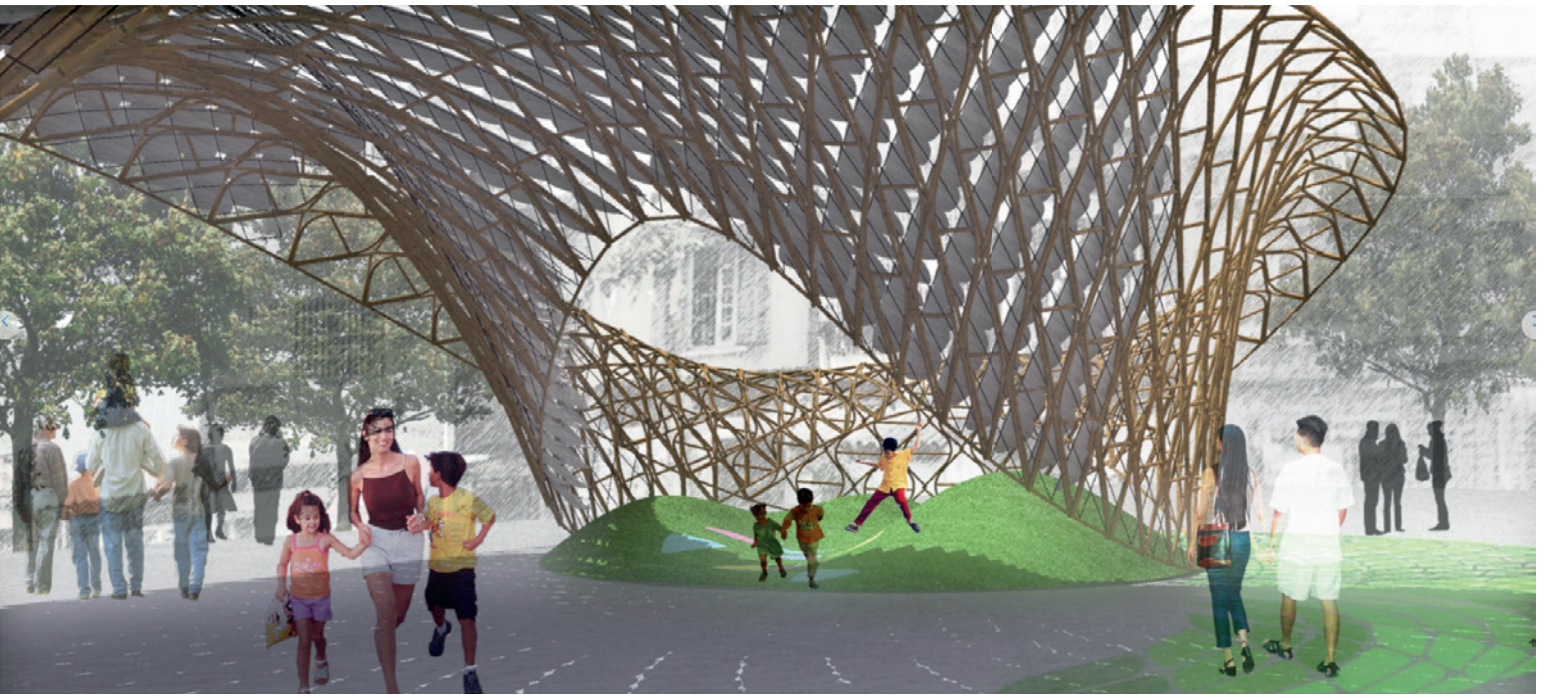
est de trouver une forme structurelle optimale et nouvelle en utilisant la gravité. Cette démarche avait déjà été expérimentée dans le passé, plus intuitivement et manuellement avec Antonio Gaudi et Frei Otto, et s'insère pleinement dans la représentation de la légèreté dans l'architecture. Comme l'architecte Dao Truong l'énonce « *In terms of architecture design, this project follows the form-finding method in using gravity, which was realized and developed for the first time by Antonio Gaudí, and then Frei Otto, to research an optimal structural form as well as the ambiance qualities in order to adapt to old and new uses of inhabitants.* »[7]

5.3.2. Le respect du principe de l'économie des moyens et d'énergie maximale mis en œuvre.

Dans ce projet, l'architecte a aussi utilisé principalement le bambou avec des assemblages directement empruntés des savoirs-faire ancestraux notamment avec des liens en corde. L'architecte en question a développé des motifs structuraux d'assemblages de petites tailles (Fig.21) pouvant être combinés ensemble au préalable sur le site puis érigés pour former l'entière structure du pavillon (Fig.22). Pour l'architecte « *Working on bamboo gives me an idea to create the structural patterns in bamboo in small size that can be assembled together for the whole structure of pavilion. These patterns are easy to fabricate (even by industrial production) and to transport to the site, which enables to construct at a low cost*»[8]. Ainsi cette localité des matériaux permet une économie majeure des moyens mis en oeuvre et de l'énergie qui en découle. Il est possible de réduire considérablement les coûts d'achats de la matière première sachant que ce matériau est présent en masse au Vietnam, tout comme les coûts de transports et de mise en oeuvre étant donné les faibles distances qui séparent par exemple le chantier à Hanoï des lieux de culture du bambou. Ce matériau étant intrinsèquement léger comme nous l'avons vu, son transport est d'autant plus facile, sans avoir besoin d'utiliser des moyens mécaniques importants. De la même manière, sa mise en oeuvre est possible directement après son traitement, ce qui permet une économie d'énergie importante pour les ouvriers sur le chantier. Les motifs inventés ici sont simples et faciles à réaliser par un artisanat local et la structure facilement remplaçable en cas de dommage, ou refaisable dans le cas d'une architecture temporaire. En prônant le «*low tech*» et le naturel dans cette architecture hybride, nous permettrions de remédier à la pollution du secteur du bâtiment en échappant au mieux à la pression de l'industrie de construction dont les activités peuvent causer des dégâts considérables sur l'environnement et le climat. Il ne s'agit pas de refuter toute approche industrielle, mais de la limiter quand cela est possible notamment pour

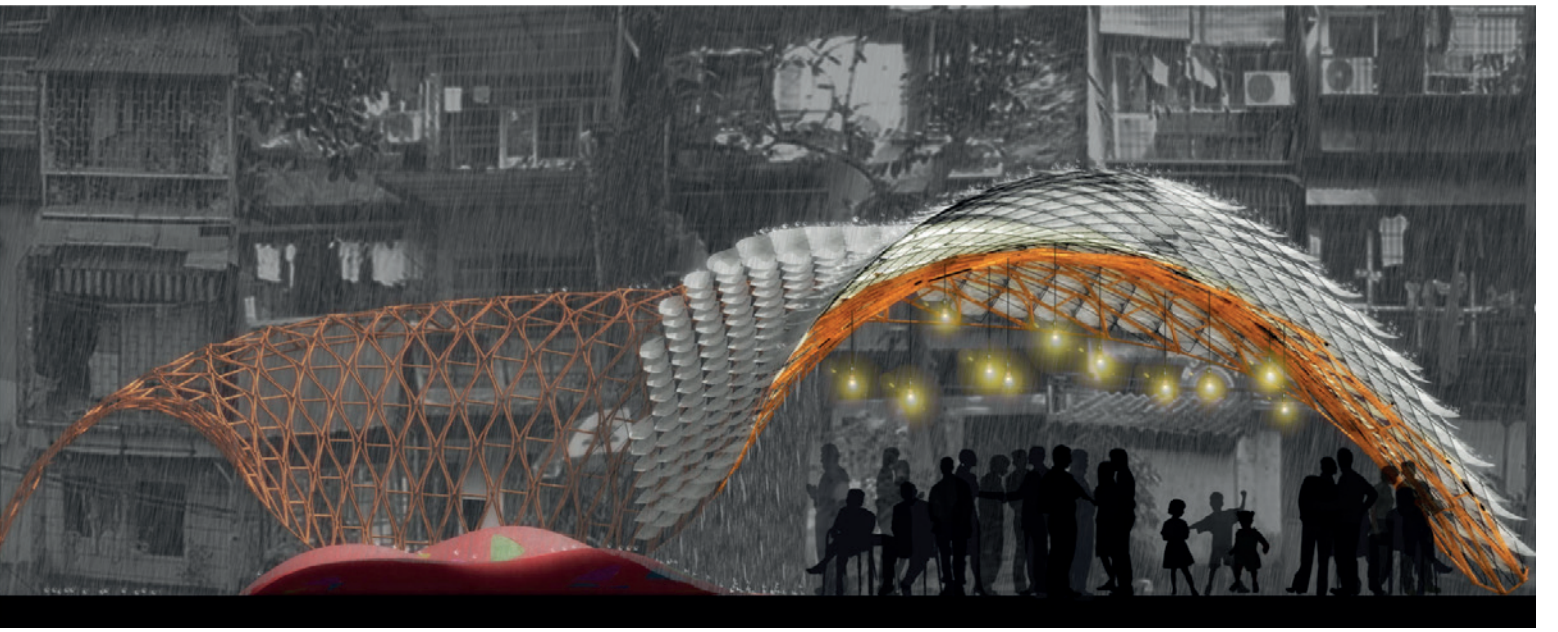
[7] Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org

[8] Ibidem



▲ Fig.23.

▼ Fig.24.



des programmes à caractère temporaire. Pour Simón Vélez, « *l'industrie de la construction est la plus grande consommatrice de ressources naturelles ; et c'est probablement dans ce domaine que des impulsions environnementales peuvent avoir le plus grand impact.* »[9].Toutes les économies successives permettraient à terme un faible coût du projet et surtout un recyclage quasi total avec presque aucun rejet de CO_2.

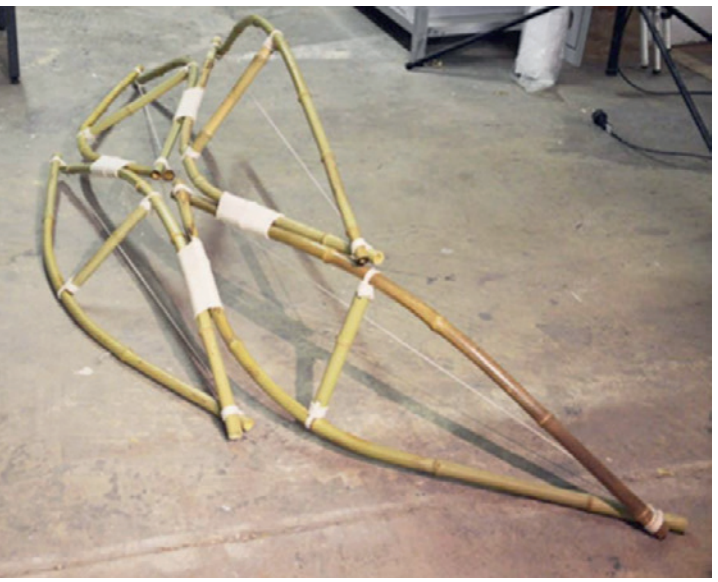
5.3.3. Le respect du principe de l'appropriation architecturale.

En développant un programme public tel qu'un pavillon en plein Hanoï avec ce type d'hybridité, alors le potentiel du bambou au sein d'un nouveau langage architectural est clairement vanté. Le projet très flexible permet aux habitants d'utiliser cet espace comme ils le souhaitent en journée comme en soirée. C'est un abri public, un espace d'exposition, un lieu alternatif de rencontre sans aucune contrainte d'utilisation (Fig.23 et Fig.24). De même, le bambou reflète la culture des habitants de Hanoï, et favorise encore plus l'appropriation architecturale.
Dans le cadre d'une architecture hybride et légère en bambou, une séparation est à éviter à tout prix. Cette séparation est celle entre d'une part des architectes et techniciens hautement qualifiés pour l'élaboration d'un projet, et d'autre part des ouvriers exerçant des tâches subalternes sans pouvoir exprimer leur savoir-faire sur le chantier. L'hybridation mise en avant dans cet écrit possède une véritable dimension sociale, intensifiant la synergie des savoirs de chaque approche et de chaque acteur d'un projet architectural. Le partage des savoirs fondé au sein d'une collectivité devient « *l'expression de la créativité humaine* » où il faut « *englober les systèmes employés à travers les cultures et les âges pour produire la connaissance [...]* » si l'on reprend les mots de Vandana Shiva. Dans l'architecture vernaculaire, le chantier était un véritable lieu de synergie des savoirs sur place. Le but de l'hybridation proposée est de retrouver ce caractère intense du chantier qui n'est plus un simple lieu d'assemblage mais aussi un lieu de discussion et de compromis. L'utilisation de matériaux locaux et des assemblages issus des pratiques vernaculaires permet aux ouvriers impliqués de se reconnaître dans le projet et se l'approprier, car cela reflète une partie de leur culture constructive. Le savoir acquis jusque là peut alors perdurer et être magnifié par des innovations mesurées et contrôlées. Comme l'énonce Pierre Frey « l*a production du bâti par cette force de travail impliquée dans la finalité sociale de l'édifice en construction rétablit les liens qui favorisent deux processus chez ses habitants : ils peuvent s'y reconnaître et se l'approprier […] Le chantier retrouve sa primauté sur le projet [...]* »[10], «*la connexion de ces savoirs ancestraux et des connaissances scientifiques*

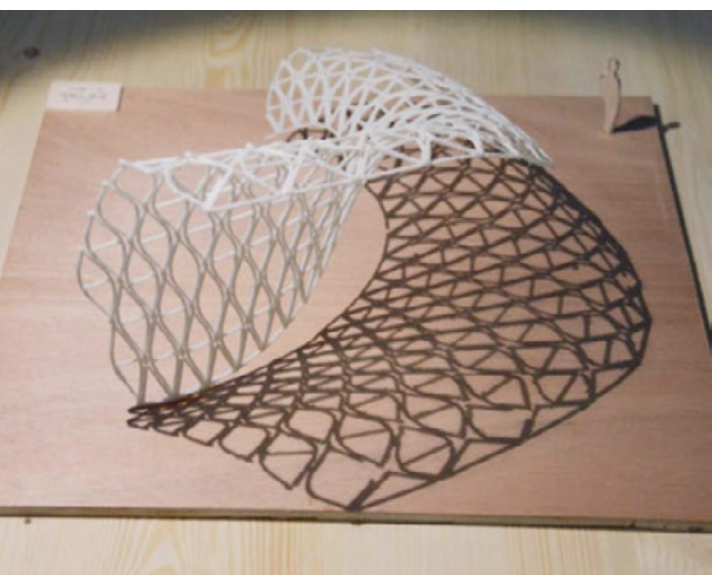
[9] Pierre Frey, «*Simón Vélez Architecte // la maîtrise du bambou*», Actes Sud, 2013, p.92

[10] Pierre Frey, «*Learning from Vernacular*», Actes Sud, 2010, p.51

ORDINAIRE...



▲ Fig.25. ▼ Fig.27. ▲ Fig.26. ▼ Fig.28.



...EXTRA

modernes ne devrait pas être pensée comme les termes d'une alternative. Celles-ci comme ceux-là devraient être complémentaires. »[11].

5.3.4. Le respect du principe de la contingence du lieu et de la notion «d'ordinaire extra».

L'hybridation choisie et le projet «*Bamboo 2.0*» par exemple, répond tout à fait à la notion d'ordinaire extra développée précédemment dans le cadre de la légèreté économique. Le projet hybride figure comme une équivalence ou un compromis entre le caractère extraordinaire d'une forme paramétrique séduisante et efficace en terme d'équilibre statique sous la gravité (Fig.27,Fig.28), et un caractère ordinaire conféré par les matériaux naturels et les assemblages basiques (Fig.25,Fig.26).

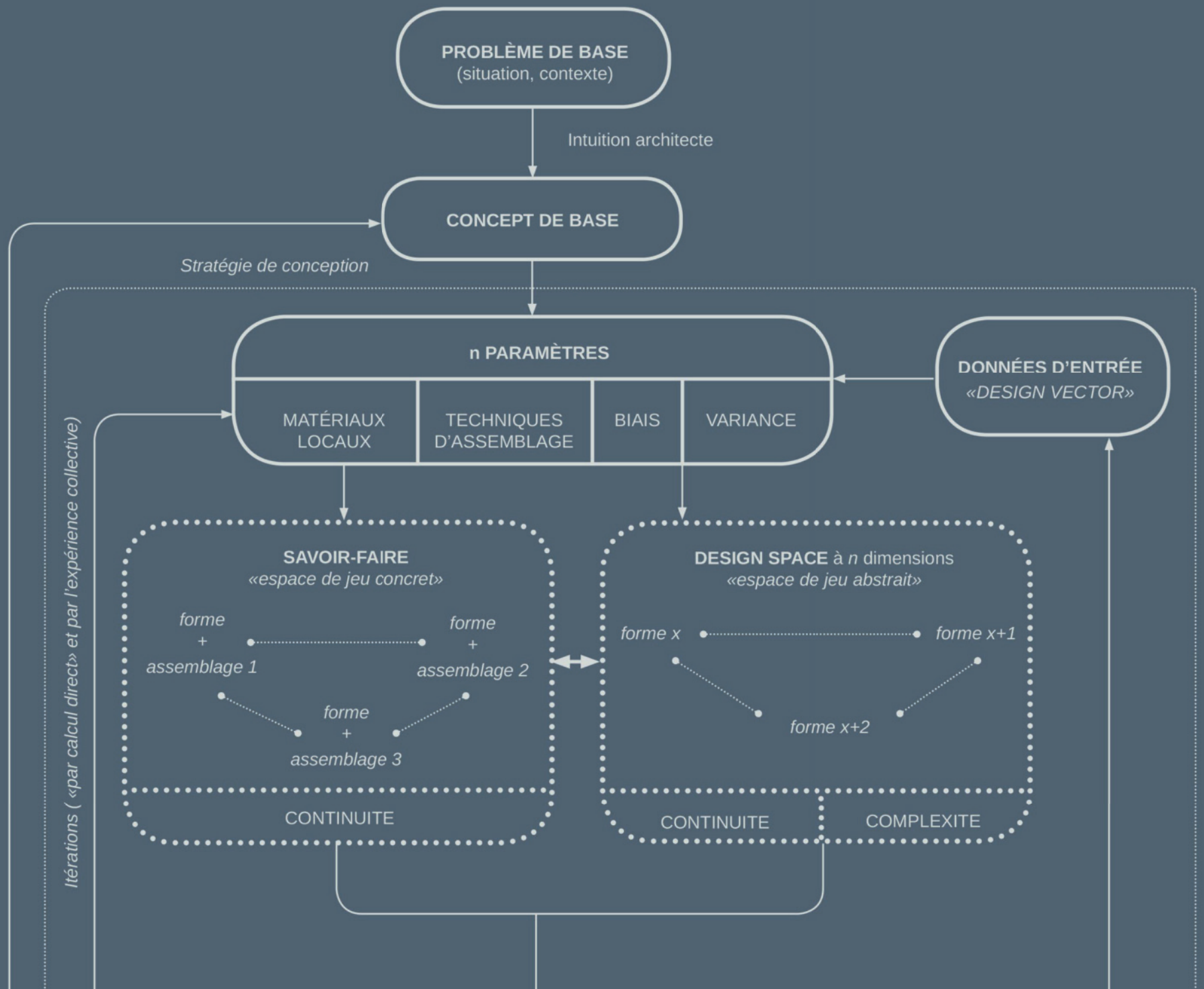
L'enjeu d'une telle hybridation est donc de ne pas chercher à faire une forme uniquement esthétique, comme une sorte d'architecture spectacle discriminante qui s'émancipe des principes vernaculaires, mais plûtot une démonstration efficace et écologique. La matérialité, les assemblages, les motifs structuraux parfois emprunts d'objets du quotidien vernaculaire, tout cela rattache le projet à une certaine contingence du lieu, ici en l'occurence le Viêtnam. Même si le bâtiment étonne par sa forme, Jean-Louis Nicolas Durand énoncait que le but principal de l'architecture «*est de plaire aux yeux et par là d'exciter en nous des sensations agréables*»[12]. Dans notre cas, il parvient à plaire tout en pouvant se fondre dans son milieu et dans le quotidien des habitants. Ainsi cette approche hybride à travers l'exemple de ce projet montre véritablement comment l'architecture hybride utilisant le bambou peut dépasser les espérances en terme de forme, de structure et de matérialité, tout en apportant une réponse aux problématiques environnementales actuelles. Le bambou résistant aux sismicités est également un gage de sureté pour le programme public dans des zones à risques. Le développement de formes créatives nouvelles permet de faire évoluer l'architecture contemporaine tout en sensibilisant les habitants des pays en voie développement au langage paramétrique. Comme son architecte l'énonce « *Bamboo 2.0 show us how the bamboo overcome the limit of its shape and avail its own ability to bend for creating the structures adapted to the new forms in contemporary architecture. And also the intention of this project is to give inhabitants in the developing countries a family approach to a new type of contemporary architecture: parametric architecture*. »[13]

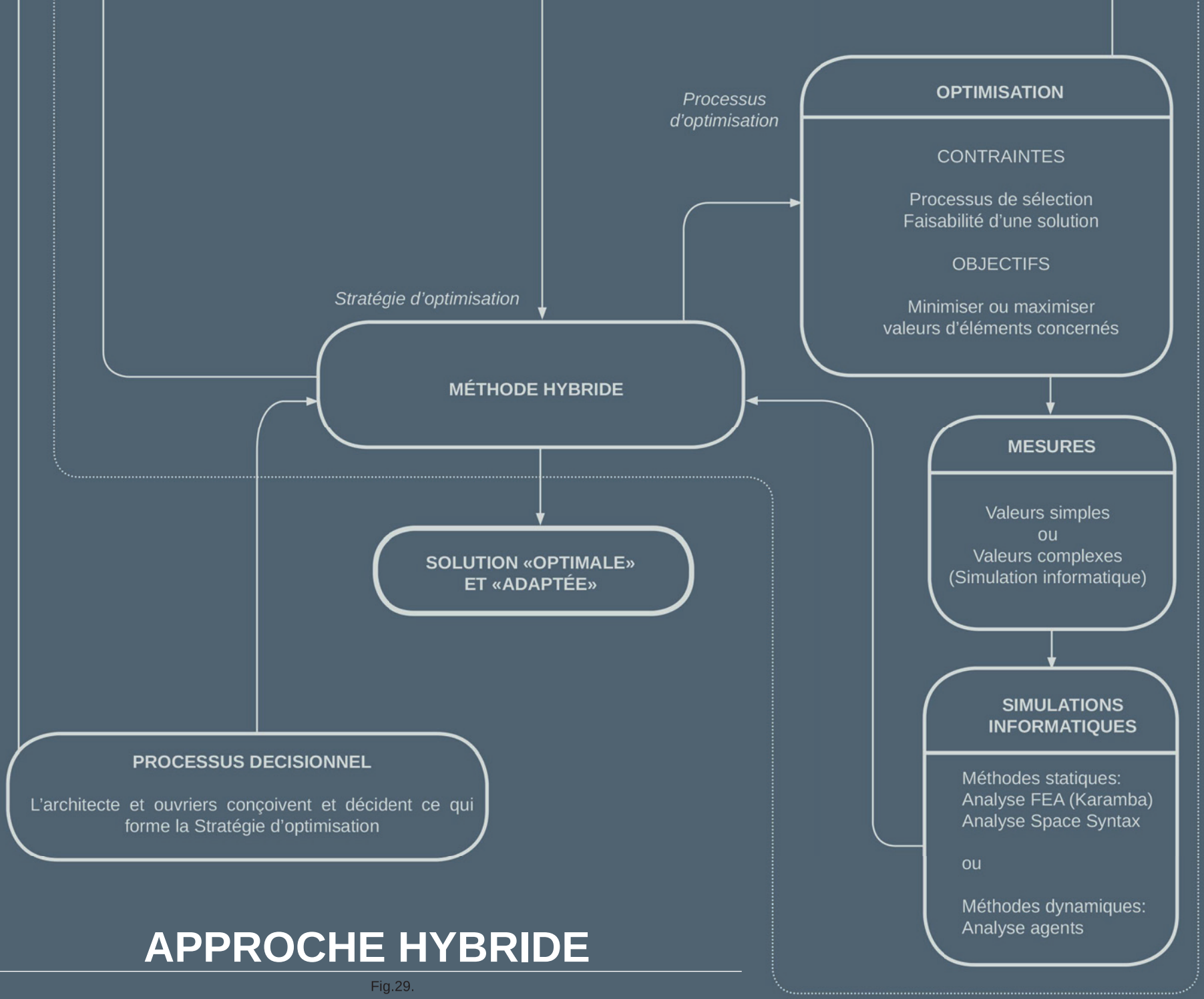
---

[11] Pierre Frey, «*Learning from Vernacular*», Actes Sud, 2010, p.41

[12] Jean Louis Nicolas Durand, «Précis des leçons d'architecture données à l'école royale polytechnique»,1825, p.9

[13] Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org


PROBLÈME DE BASE
(situation, contexte)
Intuition architecte
CONCEPT DE BASE
Stratégie de conception
n PARAMÈTRES
MATÉRIAUX LOCAUX
TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE
BIAIS
VARIANCE
DONNÉES D'ENTRÉE
«DESIGN VECTOR»
Itérations («par calcul direct» et par l'expérience collective)
SAVOIR-FAIRE
«espace de jeu concret»
forme + assemblage 1
forme + assemblage 2
forme + assemblage 3
CONTINUITE
DESIGN SPACE à n dimensions
«espace de jeu abstrait»
forme x
forme x+1
forme x+2
CONTINUITE
COMPLEXITE



APPROCHE HYBRIDE

Fig.29.

Liste des figures

Fig.1 p. 111: http://archidaily.com
Fig.2 p. 112: http://pinterest.com et https://thenounproject.com
Fig.3 p. 114: https://www.montanstahl.com / http://www.dbz.de / http://pinterest.com / https://static1.squarespace.com / https://image.freepik.com / An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.65 / http://1.bp.blogspot.com / http://www.earth-auroville.com
Fig.4 p. 117: http://1.bp.blogspot.com
Fig.6 p. 119: https://image.freepik.com / An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010, p.65 / http://1.bp.blogspot.com / http://www.earth-auroville.com / http://karamba.com
Fig.7 p. 121: https://i.pinimg.com
Fig.9 p. 123: https://www.laboutiquedubois.com / https://c1.staticflickr.com / https://i.pinimg.com / https://www.bauenmitholz.de
Fig.10 p. 124: https://www.archdaily.com
Fig.11 p. 124: https://www.archdaily.com
Fig.13 p. 127: https://image.freepik.com / https://www.archdaily.com / https://viejournal.springeropen.com
Fig.14 p. 128: https://viejournal.springeropen.com
Fig.15 p. 128: https://www.archdaily.com
Fig.16 p. 128: https://viejournal.springeropen.com
Fig.17 p. 128: https://www.archdaily.com
Fig.18 p. 128: https://www.archdaily.com
Fig.19 p. 132: Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org
Fig.20 p. 132: Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org
Fig.21 p. 134: Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org
Fig.22 p. 134: Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org
Fig.23 p. 136: Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org
Fig.24 p. 136: Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org
Fig.25 p. 138: Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org
Fig.26 p. 138: Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org
Fig.27 p. 138: Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org
Fig.28 p. 138: Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org

6. Conclusion

Après avoir vu comment la légèreté a été un véritable leitmotiv architectural, et comment cette notion a su transparaitre à la fois dans l'approche paramétrique et dans l'approche vernaculaire, nous comprenons tout l'enjeu de développer une architecture hybride et légère en bambou. Les nombreux avantages de ce matériau nous ont permis de conférer une matérialité efficace à cette architecture aux formes libres mais contextuelles, tout en respectant la question de l'écologie. En extrayant les meilleures qualités de chaque approche, l'hybridation a permis de donner naissance à une nouvelle génération d'architecture contemporaine plus efficace, plus adaptée et plus sociale. Cette approche s'apparente sur certains points à l'idée de « *nouvelle architecture vernaculaire* » développée par Pierre Frey. En effet, il parle également de cette notion de « *tirer parti des cultures et des matériaux traditionnels dans l'art de bâtir et à les féconder par l'apport des compétences et de la créativité des très nombreux professionnels formés dans les écoles d'architecture et d'ingénieurs du monde entier [...]*»[14]

Selon un contexte et des paramètres définis, les possibilités de création et d'analyse de la conception paramétrique permettent à l'architecte de développer un projet qui réponde à son environnement. L'évolution en temps réel de ce projet permet à chaque instant de s'assurer de sa viabilité, de ses performances mais surtout de son respect face à des contraintes et objectifs fixés. Si son utilisation est mesurée, cette production visuelle peut se matérialiser simplement avec l'artisanat local et le savoir-faire de ses ouvriers. L'architecture hybride en bambou représente un changement de regard sur le monde avec une logique et des méthodes nouvelles de perception. Elle marque un véritable changement dans cette philosophie du « *doing more with less* » et du «*Thinking Globally, acting locally*». Son caractère à la fois ordinaire et extraordinaire en font une architecture d'un nouveau genre. Elle vante les techniques constructives simples du passé pour les mettre au service d'un langage qui renouvelle l'architecture. Par sa matérialité forte et identifiable, elle rompt avec la normalisation esthétique et impersonnelle de l'architecture contemporaine actuelle sans pour autant tomber dans une architecture trop personnelle du «star system». L'apparence asceptisée et lisse de la structure laisse place à une apparence plus brute mais au combien plus belle et appropriable par les habitants locaux. En développant ce type d'architecture, nous assisterions à une poursuite du thème réunificateur « *Homme, Nature, et Technologie : Un nouveau monde est né.*» énoncé devant plus de 190 nations au Sommet de Rio en 1992. A terme, ce raisonnement conduit à d'incroyables projets comme le pavillon ZCB et le pavillon Bamboo 2.0 où nous retrouvons ce mouvement de

[14] Pierre Frey, «*Simón Vélez Architecte // la maîtrise du bambou*», Actes Sud, 2013, p.46

rationalisation et d'«*ephemeralization* » énoncé par Antoine Picon. Ces projets hybrides et légers s'assimilent alors à ce «*processus d'abstraction qui voit l'esprit contrôler de mieux en mieux la matière*»[15], au sein d'une architecture que l'on peut qualifier de «*cultivable*» et de recyclable.

Les possibilités de projets sont nombreuses sur les principes de la «*légèreté économique*», de «*l'hybridité équivalente*» en bambou et de «*l'éco-efficacité*». D'une manière générale, cette architecture peut se développer partout où le bambou est massivement présent. Cependant, des zones urbaines denses telles que Hô Chi Minh au Vietnam sont le symbole d'une certaine forme d'hybridité et du renouveau. En effet, ce pôle économique mélange à la fois les traditions du passé et les nouvelles technologies du futur dans une ville en plein essort économique, mais aussi marquée par la pollution et les enjeux climatiques. Ainsi, dans ce bouillonement culturel où les programmes temporaires voient le jour fréquemment, comme à Hong Kong, des projets hybrides et légers en bambou peuvent être développés dans des espaces publics. Ils seraient alors des espaces au service des habitants, témoins d'une alliance entre le passé et le futur.

Finalement nous pouvons affirmer que « *combining the simple solutions of nature with highly advanced technology results in an architecture of the future.*»[16]

---

[15] Antoine Picon, «*Une utopie américaine, Le monde de Buckminster Fuller*» , *Les Cahiers de la Recherche Architecturale, 1997, p.101-112*

[16] Alexander von Vegesack, Simón Vélez, «*Grow your own house*», Vitra Design Museum , 2000, p.243

7. Annexe

Interview de Clemens Preisinger, créateur de Karamba.
Rolex Learning Center, Skype du 16/11/2017.
Interviewer : Charles LEGRAND

What is the future that you imagine for Karamba, for example do you imagine that it could be apply in developping countries with vernacular materials, to design efficient structures ?

Yes, it could be. I mean the main aspect of Karamba is to give a knowledge of calculating structure to people who usually do not do this like architects. So to make the structural analysis accessible to an non structural engeneer so to say... This is one idea. The other thing is to have a tool which can be use for learning and calculating multiple structures with different conditions. These are the two main objectives... I mean you are talking about developing countries but usually they do not have such complex buildings there.

When do you start to use Karamba in a project, is it at the first beginning ?

Usually we get the geometry from an architectural office and most of the time we start with helping them, tell them how fit the membranes should be. It is used to make the structure looks believable. We use Karamba to optimize the geometry, to have different alternative checks and so on, and parametrical options.

Do you think that Karamba could be used to calculate a complex structure that contains vernacular connections ? Take the example of your White pavilion and imagine it in bamboo ?

There are a lot of people who use Karamba for accessing bamboo structures. I mean at the moment we focus more on steel structures as it is an ideal material, the connections are easier to make but it could be something that we have to develop more. You can analyze a lot of complex structures, it is always a matter whether it is necessary doing some additionnal efforts. Sometimes it is enough to have some estimations about how the global structure works.

Do you think that the visual aspect of Karamba is an important point to raise awareness among other countries where the parametric softwares are not so developped ?

Karamba built upon this parametric approach. It fosters another way of thinking about structures so it does not stick to cultural aspects. For example, in South America they also use Karamba but the problem is most of the students doesn't understand english very well.
The parametric approach of the software is a common language worldwide and also this computational thinking divided tasks into sub tasks. Architect students are thinking more in comprehensive term and understand the top down features. It is a tool really useful for architects.

In my thesis I talk about lightweight architecture as the main aspect of the future architecture. With all the optimisations that you can acheve with Karamba, can it really help to develop such architecture ?

With karamba the two professions (architects and engineer) can meet. Of course Karamba could help for the lightweight architecture thanks to the optimization.

What would you tell to the people who are saying that before Karamba the structural analyzis was already good to build great buildings ?

I would say that it is possible with Karamba to increase the complexity of the structures.It is possible to analyze alternative versions of the structure. Complex structures have been made to the past and now we can reduce the material to do such structures and reduce the risk of errors.

Nowadays bamboo is considered as the material of the future that could compete with steel. Do you think that Karamba can increase the potentiality of the bamboo structures ?

Could be possible. For now we will focus more on structures made of wood. Bamboo is a major concern in south america or asia and the connections with bamboos are more difficult to model but it is a really interesting area for sustainable structures.

8. Bibliographie

LIVRES

Gernot Minke, «*Building with bamboo*», Birkhäuser, Basel, 2012
Alexander von Vegesack, Simón Vélez, «*Grow your own house*», Vitra Design Museum , 2000
Bernard Rudofsky, « *Architecture sans architectes* », traduction Sté Nlle des éditions du Chêne, 1980
An.nonymous, «*Bambooklet*»,2010
Eduard Broto, «*Le bambou : architecture et design : manuel pratique et 59 projets*», Barcelone : Links, 2014
Pierre Frey, «*Simón Vélez Architecte // la maîtrise du bambou*», Actes Sud, 2013
Italo Calvino, «*Six Memos for the Next Millennium*», Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1988. «Lightness», pp.3-30
Jacques Lucan*, «Composition, non-composition : architecture et théories, XIXe-XXe siècles» [*Architecture*],* Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2010.
Eugène Viollet-le-Duc*, «Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle»,* Volume 4*,* 1869*,* article *«Construction»,* Morel, Paris*.*
Buckminster Fuller, « *The Buckminster Fuller Reader* », James Meller, 1970, pp.169-171
Terence Riley, «*Light Construction*», Abrams, New York, 1995
Ivan Illich, «*Le Genre vernaculaire*», Seuil, Paris, 1983, traduit de l'anglais (1982)
Ronald Brunskil*, «An Illustrated Handbook of Vernacular Architecture*», Faber & Faber, Londres, 2000, pp.27-28

ARTICLES ET SITES WEB

Patrick Lynch, «*Yona Friedman on Empowering People with Adaptable Architecture*», 28/08/2017, http://archidaily.com
AD Editorial Team, «*The Humanitarian Works of Shigeru Ban*», 24/03/2014, http://archidaily.com
Antoine Picon, «*Une utopie américaine, Le monde de Buckminster Fuller*», Les Cahiers de la Recherche Architecturale, 1997
Bruno Marchand, «*Alvar Aalto et l'humanisme de l'architecture*», Cours Théorie de l'Architecture V, 2014-2015, EPFL
UNEP, «*Towards zero-emission efficient and resilient buildings*», Global Status Report, 2016
David Nagyl, «*The problem of learning*», Generative Design, 23/01/2017, https://medium.com
David Nagyl, «*The design space»,* Generative Design*,* 24/01/2017, https://medium.com
David Nagyl, «*Design optimization»,* Generative Design, 20/04/2017, https://medium.com
David Nagyl, «*Designing Measures»,* Generative Design*,* 24/01/2017, https://medium.com
David Nagyl, «*Computational Design with Grasshopper»,* Generative Design*,* 03/02/2017, https://medium.com
David Nagyl, «*Structural analysis with Karamba»,*Generative Design*,* 19/02/2017, https://medium.com
Clemens Preisinger et Moritz Heimrath, *« Karamba a toolkit for parametric structural design », 2014*
Marcus Fairs, «*Bamboo «will replace other materials in architecture says Vo Trong Nghia»,*16/07/2014, http://deezen.com
«*Diamond Island Community Center / Vo Trong Nghia Architects*», 03/12/15, http://archidaily.com
«*Bamboo Wing / VTN Architects*», 27/03/12, http://archidaily.com
Rory Stott, «*Vo Trong Nghia Wins ARCASIA Building of the Year*», 29/06/2014, http://archidaily.com
Patrick Lynch «*Castaway Island Resort / VTN Architects*», 10/03/2017, http://archidaily.com
«*Kontum Indochine Café / Vo Trong Nghia Architects*», 27/06/2013, http://archidaily.com
Yves Demarly, Georges Barski, Simone Gilgenkrantz, « *Hybridation* », Encyclopædia Universalis, https://www.universalis.fr
Kristof Crolla, Article «*Building indeterminacy modelling – the 'ZCB Bamboo Pavilion' as a case study on nonstandard construction from natural materials*», 21/07/2017, https://viejournal.springeropen.com
Dao Truong, «*Bamboo 2.0*», https://worldarchitecture.org
«*ZCB Bamboo Pavilion / The Chinese University of Hong Kong School of Architecture*», 09/12/2016, http://archidaily.com
H. Leibundgut, M.Shukuya, M.Meggers, «*Reduce CO2 - With technology to zero emissions*», 02/2012, http://researchgate.net
Xiaobing Yu, «*Bamboo: Structure and Culture*», 14/05/2007
Omar Elnagar, «*Gridshell structures in laminated bamboo*» University of Bath, 09/2017, http://researchgate.net
Maria Constanza, Mejia Schuster, «*Le Bambou : Du savoir-faire vernaculaire à l'architecture d'aujourd'hui*», 02/09/2014, https://issuu.com
Jules J.A. Janssen, «*Designing and Building with Bamboo*», http://humanitarianlibrary.org
J. Janssen ,«*Bamboo in building structures*», 01/01/1981, https://pure.tue.nl
http://www.anma.fr/fr/themes/legerete-economique/

https://actu.epfl.ch/news/a-la-decouverte-de-l-architecte-du-bambou/
https://www.bamboo-earth-architecture-construction.com
http://www.swama.net
http://www.lecourrierdelarchitecte.com
http://plansarchi.com
https://www.lachronique.be/article/le-bambou-contre-le-changement-climatique, 18/12/2015
https://hal.archives-ouvertes.fr

FILMS ET VIDÉOS

C.Carcas, N. López Amado, film biographique «*How Much Does Your Building Weigh, Mr Foster?*», 2010, 78min.
David Trujillo, «*Bamboo: 21st century steel*», Conférence TEDx Coventry University, 20/02/2016, 13min, http://youtube.com
Elora Hardy, «*Magical houses, made of bamboo*», Conférence TED Talks, 12/05/2015, 10min, http://youtube.com
Green World, «*L'école en bambou de Bali*», reportage ARTE, 15/10/2017, 25min, http://youtube.com
Julian Lienhard, «A dialogue of form and force», Conférence Archizoom EPFL, 20/11/2017 + projection du film «Frei Otto Spanning the Future».