

Architecture vivante :
Concevoir, construire, habiter

Architecture Vivante : concevoir, construire, habiter

Chloé Joly-Pottuz

Enoncé théorique de Master

EPFL - Architecture

Janvier 2018

Imprimé sur du papier recyclé.

Sommaire

Introduction	9
Thème et motivations	11
Chapitre 1. Motivations : Pourquoi construire une architecture vivante ?	13
L'architecture vivante, une architecture sensible ?	13
Vivifier l'architecture	14
Une nouvelle approche du matériau « bois ».....	14
Ecologie urbaine	15
Vers une transition de nos modes de vie	15
L'architecture comme pratique interdisciplinaire	16
Chapitre 2. Aperçu culturel et technologique de constructions avec des plantes vivantes	17
Constructions vertes (recouvertes de végétaux).....	17
Architecture vivante : imaginaire, rêve, poésie	20
Architecture vivante : projets réalisés	27
Chapitre 3. Autres éléments architecturaux vivants ou générés par le vivant	37
Visions.....	37
Réalizations	38
La plante, un matériau de construction vivant	43
Chapitre 4. Principes botaniques élémentaires	45
Principes de base	45
Dans la nature : conquête spatiale	46
L'exemple du figuier étrangleur	46
Chapitre 5. Production de plantes en tant que matériau de construction : paramètres de modification de la croissance	49
Modifications génétiques	49
Modifications hormonales.....	50
Modification des facteurs environnementaux	51
Chapitre 6. La plante vivante en tant que matériau de construction	53
Technologies de construction vivante : structure, enveloppe, détail	55
Chapitre 7. De nature à structure : techniques d'assemblage de la structure vivante	57
Adhérences naturelles.....	57
Sélection végétale : techniques horticoles.....	58

Adhérences structurelles	59
Chapitre 8. L'enveloppe vivante	63
L'enveloppe en architecture : rappels de physique du bâtiment	63
Etat des lieux et fonctionnement des enveloppes vivantes	63
Chapitre 9. Hybridation avec d'autres matériaux : vers le détail de construction	69
Détails de connexion entre structure vivante et construction traditionnelle	69
Cultiver des éléments de construction ?	70
La conception architecturale d'un projet vivant	73
<hr/>	
Chapitre 10. L'importance du processus	75
La question du temps	75
Une dimension aléatoire.....	76
Prévisions et scénarios	76
Considérations budgétaires	77
Chapitre 11. Une nouvelle représentation ?	79
La question du temps	79
Une dimension aléatoire	79
Prévisions et scénarios	79
Sensibilité	80
Chapitre 12. Le projet vivant	83
Variation saisonnière et sur le long terme	83
Entretien.....	83
Ouverture : vers un projet d'architecture	85
<hr/>	
Chapitre 13. Projet	87
Chapitre 14. Site	88
Chapitre 15. Programme	88
Chapitre 16. Conclusion	93
Remerciements	97
Bibliographie	98
Bibliographie : pour aller plus loin	101
Crédits des illustrations	102

Introduction

Abstract

L'objectif de cet énoncé théorique est de faire découvrir une pratique émergente, alternative et pour l'instant expérimentale de la construction : l'architecture vivante, ou le fait de concevoir et construire l'architecture avec des organismes vivants (plantes, algues, champignons...), en tant que structure et/ou composants de l'enveloppe. Cette réflexion se structure en trois grandes parties.

Dans la première partie, il s'agit d'exposer le thème de l'architecture vivante et les motivations du choix de ce sujet. Un aperçu culturel et technologique de cette pratique complète l'introduction du thème.

La seconde partie explore le matériau « plante vivante » et ses qualités et possibilités structurelles et architecturales, ainsi que les solutions constructives vivantes pour l'enveloppe du bâtiment. Elle énonce aussi une réflexion sur la pratique architecturale du projet vivant (conception, représentation, projet vivant).

La troisième partie est constituée des bases d'un projet d'architecture vivante qui sera développé au semestre de printemps.

Groupe de suivi

Yves Weinand, Directeur pédagogique et Professeur du projet de master, architecte et ingénieur civil

Alexandre Buttler, 2nd Professeur du projet de master, ingénieur en environnement

Sacha Favre, maître EPFL, architecte

Remarques sur la recherche

L'architecture vivante étant une pratique peu développée, la recherche de littérature a été plutôt difficile au début de ce travail. Les auteurs traitant du sujet sont peu nombreux, et se retrouvent impliqués dans la plupart des quelques publications sur le sujet. Contrairement à des thèmes pour lesquels les publications abondantes imposent une sélection des sources via différents filtres, la difficulté d'accès à l'information m'a amenée à sélectionner un maximum de données. Seules quelques-unes des références bibliographiques sont en français, la majeure partie de la littérature utilisée est rédigée en allemand. Le reste est en anglais. Par conséquent, certaines citations présentes dans ce travail sont des traductions libres effectuées par mes soins, et un grand travail de traduction a été nécessaire pour la compréhension de la matière, ralentissant la progression de l'étude bibliographique.

De plus, s'agissant d'un énoncé théorique sur l'architecture vivante, j'ai dû me familiariser avec des termes et des processus biologiques afin de comprendre la faisabilité d'une telle architecture. Pour ce faire, j'ai pu bénéficier de l'expertise de M. Buttler, mais aussi de celles de M. Bernard Messerli (paysagiste et collaborateur scientifique au château de Prangins) et de M. Schweingruber (botaniste à l'Institut Fédéral de recherches sur la Forêt, la Neige et le Paysage WSL) qui m'a conseillé de contacter l'Insitut Thünen de Recherche sur le bois, à Hambourg, où j'ai pu atteindre le Dr Welling (Directeur). Sur conseil du Professeur Alexandre Buttler, j'ai pris contact avec M. Yves Lachavanne (architecte paysagiste FSAP et Chef du bureau d'études et projets pour la ville de Lausanne au service des parcs et domaines) afin de voir s'il peut m'aider à me procurer de très jeunes plants pour construire une maquette vivante au semestre prochain. Dans le même but, M. Messerli a approché la pépinière Genolier. Enfin, certaines des figures ont été réalisées par mes soins afin de transmettre des données récoltées.

Thème et motivations

Chapitre 1

Motivations : Pourquoi construire une architecture vivante ?

L'architecture vivante, une architecture sensible ?

« Le mouvement vivant des arbres dans le vent contraste avec la sévérité géométrique de la pierre inerte. »¹

L'homme, avec les ordres classiques et les proportions, a cherché en architecture à approcher une harmonie qu'il ne trouve que dans la nature. Mais la nature et l'art (le travail de l'homme) entretiennent des rapports complexes, presque antithétiques. L'abolition de cette dualité nature/art semble surnaturelle, séduisante. C'est pourquoi le rapprochement nature/architecture provoque des émotions intenses et variées chez l'être humain.

La dimension fantastique de la fusion de la nature et de l'architecture est évoquée par les mythes, les contes de fée ou les récits de science-fiction. L'arbre maison des Na'vis, dans le film Avatar de James Cameron par exemple, émerveille et intrigue le public. Cette fascination captivante provient peut-être du fait que le rapprochement de la nature et de l'architecture établit une sorte de monumentalité indéniable, l'arbre étant la plus grande plante que nous connaissions.

Le fait d'utiliser la nature en architecture peut suggérer des relations variées entre l'homme et le monde qui l'entoure. Si la nature sert l'architecture en lui étant subordonnée, elle semble dominée par l'homme qui exerce son pouvoir de contrôle. Cependant, une architecture vivante peut aussi traduire une existence en harmonie avec la nature et suggérer une conscience évoluée : ce sont les Na'vis qui vivent dans des architectures végétales fantastiques, pas les humains...

Le pouvoir émotionnel de la nature provient aussi de sa dimension symbolique (dans les mythologies et les religions), et de son aspect culturel, comme le toko-bashira dans la maison japonaise.

L'architecture vivante comme une architecture capable de provoquer des émotions est l'une des motivations de cette recherche théorique.

Vivifier l'architecture

Si le chemin de l'architecture a croisé celui du vivant, c'est plutôt par analogie de forme ou d'image. A la fin du 19^{ème} siècle, l'art nouveau suggère des formes végétales et organiques.¹ L'architecture des métabolistes japonais du 20^{ème} siècle évoque des figures et processus du vivant par la construction traditionnelle, alors que les façades de Louis Sullivan ou Otto Wagner s'ornent de végétaux (Guarantee Building et Majolikahaus). Ces dernières années, le mouvement de la « Blob Architecture » (architecture biomorphique) poursuit cette évocation du vivant par la forme. Néanmoins, ces différents courants de pensée n'ont pas proposé de solutions biologiques pour répondre à des considérations structurelles et constructives.²

Cet énoncé théorique propose d'explorer les possibilités constructives permises par le vivant, à la fois structurelles et constitutives de l'enveloppe.

Une nouvelle approche du matériau « bois »

« Le bois est un matériau versatile, renouvelable, avec des applications variées en tant qu'élément de construction dans nos sociétés modernes (par exemple poutres, planches, placages), en tant que ressource vivante pour des polymères et monomères (par exemple la cellulose pour le papier, ou des produits chimiques dérivés de la lignine), et en tant que source d'énergie. »³

Le bois est un matériau d'ingénierie reconnu. Il a de bonnes performances mécaniques et une faible densité. Cependant, c'est aussi un matériau biologique aux nombreuses propriétés.

La construction avec des plantes vivantes (c'est-à-dire leur croissance), utilise la lumière, de l'eau et des nutriments pour produire de l'oxygène, de l'eau et du glucose. Les plantes vivantes s'ancrent dans le sol par leurs racines et ne nécessitent pas de fondations traditionnelles. Elles peuvent croître dans des terrains difficiles et sont une intervention minimale dans le milieu naturel.² Le bois vivant se protège des agressions extérieures comme les infections et les parasites sans protection chimique (peinture, vernis...). Il sait aussi se régénérer pour réparer ses blessures, et sa croissance s'adapte aux contraintes extérieures : c'est le matériau structurellement efficace par excellence⁴. Néanmoins, son développement est très lent.

Sensibiliser au bois en tant que matériau biologique et ouvrir la réflexion sur son utilisation en architecture est un autre but poursuivi par cette recherche.

Ecologie urbaine

Les espaces verts confèrent aux villes des qualités aujourd'hui recherchées. Esthétiques, ceux-ci permettent la flânerie et sont appréciés des habitants. Ils jouent un rôle social, permettant les rencontres, le déroulement de certains événements ou se situant à proximité d'institutions culturelles comme des musées ou des sites d'importance. Mais les plantes vivantes ont aussi l'avantage écologique de générer des microclimats en abaissant la température par ombrage et en produisant de l'humidité. La qualité de l'air environnant est aussi améliorée par le rôle filtrant des arbres. En effet, des turbulences d'air se créent dans la couronne. La vitesse de l'air diminue et les particules fines se posent alors sur les feuilles. Elles sont ensuite lavées lors des averses. Ainsi, le nombre de particules en suspension dans l'air est plus faible à proximité des arbres. Dans une moindre mesure, la photosynthèse contribue à un air plus pur : les arbres stockent le dioxyde de carbone tout en rejetant de l'oxygène. Même si la nuit le processus s'inverse, le bilan reste favorable, la quantité d'O₂ produite restant supérieure à la quantité de CO₂ rejetée, (discussion avec M. Buttler).

Les plantes vivantes peuvent également filtrer l'eau et fournissent un habitat aux insectes, oiseaux, rongeurs... Enfin, la végétation peut diminuer les nuisances sonores (de -2 dB à -12 dB selon les espèces, d'après discussion avec M. Messerli).

L'un des intérêts de la pratique de l'architecture vivante est qu'elle peut être une solution pour rapprocher les volontés coexistantes et apparemment opposées de densification et d'intégration de la nature en ville, tout en générant des microclimats.

Vers une transition de nos modes de vie

Alors que les limites de la société industrielles commencent à se faire sentir, nous devons chercher des solutions durables, « low tech ». Les ressources disponibles s'épuisent, les sols s'appauvrissent, la biodiversité est menacée. L'architecture vivante apparaît comme une proposition de transition de nos modes de vie, en nous rendant plus attentifs à notre environnement et en agissant à petite échelle sur des écosystèmes fragilisés.⁵

L'architecture comme pratique interdisciplinaire

Finalement, c'est l'aspect interdisciplinaire de cette thématique qui a motivé le choix de ce sujet. Etudiante à l'EPFL, j'ai eu la chance au cours de mes études de rencontrer des personnes qui étudiaient d'autres domaines que l'architecture et j'ai beaucoup apprécié ces échanges. La variété des pratiques de l'architecture et son ouverture à d'autres sujets (art, histoire, environnement, sciences, matériaux...) avaient motivé mon choix pour cette pratique. L'énoncé théorique et le projet de master sont alors en excellente position pour explorer cette interdisciplinarité, vecteur d'inspiration et d'innovation, tout en profitant du fait d'être sur un campus polytechnique. La composition de l'équipe de suivi de ce travail de master reflète d'ailleurs cette position.

Chapitre 2

Aperçu culturel et technologique de constructions avec des plantes vivantes

La partie précédente explicite les motivations du choix du sujet de l'architecture vivante. Si les thèmes évoqués sont parlants aujourd'hui, à l'heure de la prise de conscience de l'inéluctabilité du réchauffement climatique, ils sont aussi liés au besoin de l'homme du contact avec la nature. De nombreux penseurs, architectes, paysagistes, ou botanistes ont cherché des solutions pour rapprocher nature et architecture au fil du temps. Cet aperçu culturel et technologique de la construction vivante recense certaines de ces réflexions. Sont d'abord évoquées des constructions vertes (recouvertes de végétaux), puis des visions utopiques de constructions vivantes. Des projets vivants réalisés sont ensuite présentés, avant de conclure avec d'autres types d'objets architecturaux vivants ou générés par le vivant, pensés ou réalisés.

Constructions vertes (recouvertes de végétaux)

Il est important de distinguer les structures vivantes des constructions qualifiées de « vertes » car recouvertes de végétaux, comme les pergolas, les jardins suspendus, les jardins sur les toits ou les façades végétalisées.² Elles sont abordées ici afin d'illustrer la fascination pour les hommes de vivre au plus près du monde végétal à travers les siècles, et ce avec les techniques de leur temps, mais ne constituent pas le sujet principal de cet énoncé théorique.

Prémisses

Des prémisses de végétalisation de structures se retrouvent dans d'anciennes cultures rurales. Déjà dans l'ancienne Egypte, environ 4000 ans avant JC, des vignes tressées fournissaient des lieux ombragés. On retrouve des arcades recouvertes de roses dans la Rome antique, ou dans les monastères et châteaux du moyen-âge.²

Jardins sur le toit et jardins suspendus

L'association de la densification et de la volonté de proximité de la nature a poussé les constructeurs à imaginer des jardins sur les toits et terrasses des villes. Certains sont même appelés « jardins suspendus ».

« On ne peut vraiment parler de jardin suspendu à moins que la structure et la plantation contribuent de manière plus ou moins égale, en proportion et en effet esthétique, à l'impression totale. »¹ Un exemple célèbre de jardins suspendus est celui des jardins suspendus de Babylone. Constitués de multiples terrasses superposées recouvertes d'une grande épaisseur de terre, de grands arbres peuvent s'y enraciner. Fréquents dans la Rome antique et au Moyen-Âge, ce type de jardin réapparaît à la Renaissance après une période d'oubli. Cependant, les défis techniques sont très importants pour ces différentes époques : la grande quantité de terre nécessaire pour le développement des racines provoque une charge supplémentaire indéniable, le sol doit être hermétique pour éviter que l'humidité ou les racines n'affaiblissent la construction et la conception doit assurer un drainage et un apport en nutriments efficaces. Ces contraintes coûteuses étaient alors signe de richesse et affirmaient le pouvoir de l'homme sur la nature.²

Jardins sur le toit aux 19^{ème} et 20^{ème} siècles

La révolution industrielle apporte de nouvelles solutions techniques aux exigences des jardins sur les toits, à la fois structurelles et constructives. En 1867, le maître maçon royal de Berlin, Carl Rabitz, recommande l'utilisation de toits plats en tant que jardins, dans sa brochure « *Toits naturels en ciment volcanique* ». A partir de 1900, Hennebique utilise le potentiel du béton armé avec sa maison de Bourg-la-Reine, pour construire des terrasses-jardins.⁶ En 1927, Le Corbusier théorise le toit-terrace avec la publication *Les 5 points d'une architecture nouvelle*. Le premier point, le toit-jardin, est ainsi décrit « *le béton armé apporte le toit plat et révolutionne l'usage de la maison.* »⁷

Constructions vertes aujourd'hui

Aujourd'hui, les constructions vertes sont nombreuses. Les jardins envahissent les toitures et les terrasses, comme au Gutman Visitor Center, centre de recherche de la Société de Protection de la Nature à Jerusalem. Le bâtiment s'intègre au maximum dans son environnement forestier, en offrant à la nature la possibilité de s'épanouir entre les pavillons de petite taille et sur les toits. Ainsi, ce lieu d'escale des oiseaux migrateurs d'Europe leur offre la possibilité de nicher dans des crevasses et cavités spécialement étudiées dans les parois des pavillons, alors que la plupart des étapes de leur migration situées au Moyen-Orient sont de plus en plus urbanisées.⁸ Les tours Bosco Verticale et Les Terrasses des Cèdres du studio Boeri à Milan et à Chavannes-près-Renens sont d'autres exemples de végétalisation de surfaces horizontales, cette fois-ci en milieu urbains. Finalement, le MFO Park à Zürich propose une structure légère envahie de plantes, une « *tonnelle végétalisée* » servant de parc urbain sur un site industriel désaffecté.⁹

Conclusion

Bien que cette popularité croissante de l'association nature/architecture traduise une volonté de villes plus vertes, ainsi que l'intérêt des hommes pour une plus grande proximité de l'architecture et de la nature, ces réalisations ne prennent toutefois pas en compte l'apport du vivant comme solution structurelle et/ou constructive innovante. Des organismes vivants y sont simplement surajoutés.

Architecture vivante : imaginaire, rêve, poésie

Cette partie regroupe des visions architecturales et urbaines imaginaires ou utopiques qui traduisent la fascination de l'homme pour l'architecture vivante, en particulier végétale, à travers les époques.

Récits de l'origine de l'architecture : Laugier, Viollet-le-Duc

Les récits de l'origine de l'architecture varient, mais rapportent un événement commun : le recherche d'un abri contre les aléas climatiques et les animaux. Deux récits de l'origine de l'architecture s'appuyant sur l'ossature comme élément architectural premier évoquent des arbres vivants : ceux de Marc Antoine Laugier et d'Eugène Viollet-le-Duc. Avec sa « *cabane primitive* », Laugier suggère que des éléments linéaires posés à l'horizontale sur des troncs d'arbres établissent la première ossature de la cabane primitive, origine de l'architecture. Sur le frontispice de son « *Essai sur l'architecture* »¹⁰, une toiture à pans inclinés faite de branchages s'appuie en effet sur quatre arbres vivants, enracinés et couverts de feuilles. Son interprétation est que cette cabane primitive est le modèle du temple grec en bois, puis en pierre. Eugène Viollet-le-Duc, quant à lui, suggère que le premier abri est celui que l'on trouve sous un arbre. Cette solution étant néanmoins très limitée, elle évolue ensuite en « *hutte primitive* » faite d'arbres vivants plantés en cercle et tressés entre eux à leurs sommets. Cette ossature, qui pourra ensuite être recouverte d'une clôture, évoque une ogive gothique.

A gauche :
Marc-Antoine
Laugier, la «cabane»
primitive, 1755.

A droite :
Eugène Viollet-
le-Duc, la «hutte»
primitive, 1875.



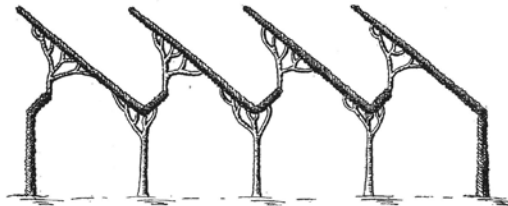
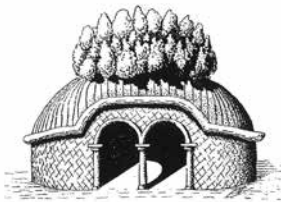
Arthur Wiechula

Arthur Wiechula est un paysagiste allemand qui publie en 1925 « Lebende Häuser aus wachsenden Bäumen entstehend » (Construire des maisons vivantes à partir d'arbres en croissance).¹¹ A travers de nombreux croquis et schémas explicatifs, il propose de réaliser des bâtiments résidentiels et agricoles vivants, « non pas en donnant forme au feuillage, mais en faisant pousser le bois lui-même en une structure fermée équipée de murs solides, de portes et fenêtres, et qui protégerait l'habitant de la neige, de la pluie, du vent froid ou de la chaleur, comme toute autre maison. »

Selon lui, les seules limites à cette méthode de construction sont celles de l'espace et des arbres disponibles. Son idée est de planter des arbres à distance proche, puis de les assembler en treillis en connectant les points de croisement. Avec la croissance, ces nœuds s'épaississent et le treillis se ferme progressivement.

Arthur Wiechula estime plus logique de construire des bâtiments avec des arbres vivants que de faire le détour d'abattre les arbres, puis de les débiter en matériaux de construction avant de les réassembler. Il ajoute que les coûts sont réduits car les biens créés sont durables. Néanmoins, il précise qu'il faut « recouvrir les murs avec du bois ou du plâtre pour ne pas offenser l'œil civilisé (...) avec l'écorce des murs vivants. »

Arthur Wiechula ne construira jamais un tel bâtiment, et son entreprise de construction naturelle fait faillite en 1929. Ses dessins illustrent son manque de connaissances des lois de la botanique. En effet, bien que le bois soit constitué principalement de cellules mortes, des cellules vivantes nécessitent de l'énergie pour leur autoconservation. La photosynthèse produisant cette énergie disponible est limitée, tout comme le volume de bois qui peut survivre sur une zone donnée.² Sa vision reste toutefois une source d'inspiration poétique pour d'autres visionnaires.



Arthur Wiechula,
exemples
d'architecture
vivante, 1926.

A gauche :
Ecurie sur un
paddock.

A droite :
Lieu de travail avec
puits de lumière.

Page de droite :
Hundertwasser,
Baummieter (l'arbre
locataire), 1976.

Rudolf Doernach : Biotektur

Architecte allemand, Rudolf Doernach travaille sur la conception de structures issues de la croissance végétale qu'il appelle « *Biotektur* », ainsi que sur des visions urbaines. Le bâtiment idéal de la Biotektur s'affranchit de la technologie supportant la croissance des plantes (structures en bois par exemple). Il produit de l'oxygène, des fleurs et des fruits, et réduit la poussière, l'émission de CO₂ et le bruit. Dans la Biopolis, qui ressemble à une forêt, se trouvent des bâtiments publics à plusieurs étages : marchés, lieux de rencontres, places de jeu, salles de concert... « *La Biopolis n'est pas adaptée aux automobiles et ne convient qu'à des plantes et des gens sympathiques.* »¹²

Hundertwasser

Pour la triennale de Milan de 1973, Hundertwasser met en place des « arbres locataires » dans les étages d'un immeuble d'Alserbachstrasse à Vienne. L'idée est de faire pousser des arbres à travers des ouvertures sans vitrage, les racines restant à l'intérieur, le tronc traversant l'ouverture et la couronne se développant à l'extérieur. « *Pourquoi un peuple ne vivrait-il pas dans un arbre plutôt que dans un appartement si l'oxygène se fait rare ? Tout ce dont on a besoin c'est d'une fenêtre avec un peu d'espace derrière.* »

La pièce de vie de l'arbre-locataire doit être étanchéifiée, puis remplie de terreau. Les arbres sont apportés par des grues depuis l'extérieur, et les éléments naturels (air, pluie, chaleur, froid, vent, neige) peuvent pénétrer la pièce où se trouvent les racines par l'absence de vitrage. Cette pièce est entièrement isolée du reste de la maison, et l'eau de pluie récupérée du toit est filtrée et introduite par un premier tuyau, un second drainant l'excès à l'extérieur.

« *Les voitures ont poussé les arbres dans les étages. Les murs verticaux stériles des vallées créées par les façades d'immeubles sous lesquels nous souffrons tous les jours, seront comme des vallées vertes où l'homme pourra respirer librement. L'arbre-locataire paie son loyer avec l'oxygène produit, grâce à sa capacité d'absorber de la poussière, comme machine anti-bruit (...), par le nettoyage des eaux de pluie contaminées, comme producteur de bonheur et de santé, apportant des papillons, de la beauté, et encore tant d'autres valeurs. Tout cela peut être changé en argent et est plus que ce qu'un locataire humain peut payer avec un chèque.* »

En plaçant les arbres en façade, Hundertwasser les rend visibles de loin. Il déplore en effet l'invisibilité depuis la rue des jardins sur les toits. Il ajoute que ces arbres améliorent le climat urbain en atténuant les contrastes sec/humide et chaud/froid. Un sentiment d'intimité et de sécurité est généré par ces nouvelles façades, qui perdent de plus leur caractère de « vallées lisses » générant de l'écho.

UNTENDED
WILD FOREST
ON ROOF

FLAT ROOTING TREES

HOME MADE HUMUS
PUMICE OR LIGHT STONES

RAIN WATER ALREADY FILTERED



MAN
TENANT

MAN TENANT

← AERATION



HUMUS
TOILET



GREEN
LEAVES

FIXATION

NO WINDOW PANE
ALWAYS OPEN

ISOLATION

TREE TENANT

HUMUS

PUMICE OR LECA HOLDS WATER

WATERPROOF

SPONGE SHEET
OVER FLOW



MAN TENANT

SUPPORTING
PILLAR



PURE WATER

EARTH

TREE TENANT PAYS IN OXYGEN
SURVIVAL AND OTHER CURRENCY

En 1981, il déplore néanmoins la réalisation de son idée dans une lettre adressée au paysagiste en charge du projet. En effet, l'espèce choisie, l'Olivier de Bohême, ne correspond pas du tout à l'idée de l'arbre-locataire d'Hundertwasser. Avec ses feuilles étroites, il ne donne pas assez d'ombre ni d'humidité. Il ne paie donc pas son loyer. Peu adapté au climat de Vienne, il se retrouve dans une « *unité de soins intensifs, connecté à des tuyaux, des tubes avec de l'eau, des nutriments et des produits chimiques liquides, nourri artificiellement. (...) Un chef-d'œuvre de technologie très couteux veille sur sa santé. La technocratie prend une fois de plus le dessus sur la nature.* »

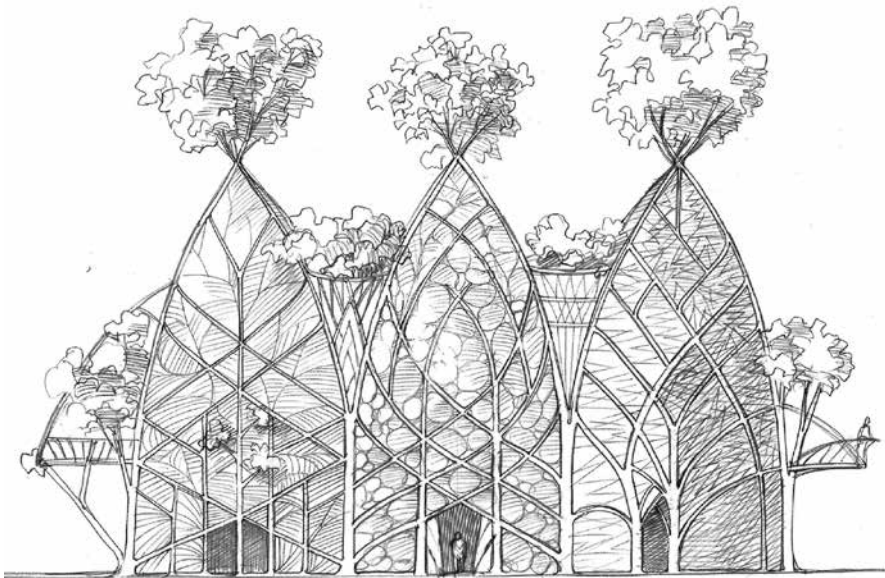
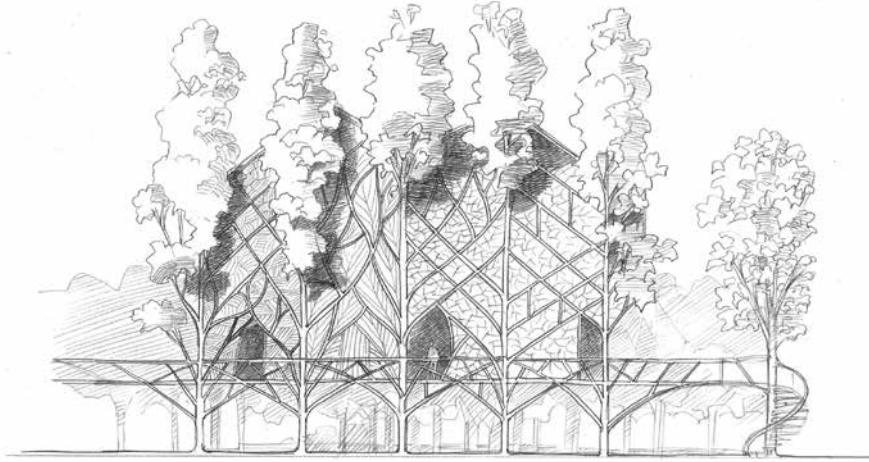
Puisque le locataire de l'arbre devrait être un « donneur » d'humidité, d'ombre, d'oxygène et de beauté, Hundertwasser suggère de réparer cette erreur en utilisant des espèces plus locales, comme l'érable, le hêtre, le sureau, le charme, le tilleul. « *Les arbres-locataires devraient être un exemple facilement viable de boisement des villes.* »¹³

Si ce projet n'utilise pas le vivant comme solution structurelle ou constructive, il est mentionné ici pour sa réflexion visionnaire sur nos modes de vie.

Luc Schuiten

Architecte, Luc Schuiten imagine à travers ses dessins fantastiques des villes résilientes, construites en collaboration avec la nature. Dans le projet Première Graine, il s'affranchit des contraintes constructives pour laisser libre cours à son imagination. Il dessine en détail plusieurs projets de *cités archiborescentes*, comme la Cité des Vagues, la cité des Habitarbres, la Cité Tressée, la Cité Lotus... Il propose aussi des visions, « La Ville de demain », pour des villes comme Metz, Bruxelles, Genève, Louvain-la-Neuve... Toutes ses visions questionnent le rapport entre architecture et organismes vivants. Au-delà de son univers poétique, Luc Schuiten travaille aussi sur des réalisations et s'intéresse aux matériaux générés par le vivant et aux problématiques de transport.¹⁴

En 2012, Luc Schuiten a installé des tipis végétaux à Arte Sella, une exposition internationale d'art contemporain fondée en plein air dans les champs et les bois de Val di Sella, dans la province de Trento. C'est un musée de Land Art qui explore le lien entre la créativité et la nature. Les tipis végétaux sont issus des considérations de l'architecte pour des cités végétales. Ils sont constitués d'arbres plantés en cercles et entrelacés. Les tipis sont reliés par une passerelle et sont accessibles par un escalier hélicoïdal et une plate-forme suspendue. En croissance, ils font l'objet d'un entretien régulier.¹⁵ A Arte Sella, on peut aussi admirer la Catterdale Vegetale de Giuliano Mauri, un autre exemple de construction vivante réalisée.



Fab Tree Hab

Le Fab Tree Hab propose de faire pousser un logement à partir d'arbres vivants. Une structure en croissance est greffée à un support en contreplaqué réutilisable paramétré numériquement pour prendre la forme désirée. Sa réalisation repose sur une technique horticole de tressage de branches entre elles, le plessage, afin qu'elles forment des arcades ou des treillis en continuant à pousser.

La structure porteuse est formée de troncs ayant la capacité de s'auto-greffer (processus détaillé dans la partie Technologies de construction vivante : Adhérences naturelles). Les branches fournissent un treillis pour les murs et le toit. Un écosystème prend place dans le treillis de la façade. A l'intérieur, un composite d'argile et de paille isole et bloque l'humidité, et une couche d'argile de finition assure le revêtement intérieur. Les fenêtres sont en bioplastique et peuvent s'adapter à la croissance de la maison. Il faut environ 5 ans pour que le logement soit habitable, ce qui est plus long que pour une construction traditionnelle. Cependant, sa durabilité est bien supérieure, et il nécessite en grande partie des matériaux bon marché. Malgré son apparente volonté de faisabilité, cette idée reste à l'état de concept.⁸

Joachim Mitchell,
processus de
développement
du Fab Tree Hab,
1997-2008.



Conclusion

Si ces projets non réalisés peuvent sembler fantaisistes, ils ouvrent néanmoins la voie à de nouvelles réflexions architecturales, plus proches de la nature. Et si ces considérations poétiques et imaginaires devenaient une nouvelle manière de construire ?

Architecture vivante : projets réalisés

Dans cette partie sont abordées des constructions, aménagements, architectures et design vivants réalisés, démontrant une faisabilité de la pratique constructive avec des plantes vivantes.

Ponts vivants du Meghalaya

Au nord de l'Inde, dans l'état du Meghalaya, le climat est très humide. Les importantes précipitations de la région fournissent aux plantes l'eau dont elles ont besoin pour se développer, mais grossissent aussi de nombreuses rivières aux courants rapides. Pour les traverser, les populations locales ont eu l'idée d'utiliser les racines de ficus elastica (arbre à caoutchouc) comme matériau de construction de leurs ponts. Jeunes, ces racines sont souples et malléables. Après avoir été guidées en ligne droite au-dessus de la rivière dans des demi troncs évidés d'arbres à noix de bétel, elles sont replantées dans la terre sur la rive opposée. Ce processus, répété plusieurs fois avec différents arbres, permet alors aux habitants de traverser les rivières sur des ponts vivants, robustes et imputrescibles dans ce climat humide. Certains de ces ponts mesurent plus de trente mètres de long. La plupart ont plus de 500 ans d'existence, et d'autres sont même à plusieurs niveaux. Malheureusement, ces ponts sont aujourd'hui menacés par la pollution de certaines rivières provenant de l'exploitation de mines illégales.⁸ Ces ponts constituent un exemple ancien et durable de construction vivante.



Pont vivant à 2 niveaux au-dessus de la rivière Umshiang.

Tanzlinden

Au Moyen-Âge se répand la pratique de guider la croissance d'arbres, notamment de tilleuls, pour aménager de grandes pièces ombragées à la base de leurs troncs. Leurs branches sont guidées pour former une couverture dense et horizontale. Cette configuration ne leur étant pas naturelle, elles perdent leur capacité autoportante et sont soutenues par des structures en bois posées sur un mur en pierres périphérique, de forme ronde ou octogonale.

Certains ont une couronne de forme plate, d'autres présentent une ou plusieurs nappes de branches, s'élevant en différents niveaux de diamètres de plus en plus réduits. Au-delà, la couronne est soit autorisée à pousser naturellement, soit taillée en forme arrondie.

Quelques-uns de ces tilleuls sont également pourvus d'une plateforme dans leur couronne. Le premier niveau de branches horizontales est alors recouvert de planches constituant le sol, et la nappe de branches supérieures forme le toit. Des escaliers mènent à cette plateforme où peuvent se produire des musiciens et des danseurs. Ces tilleuls demandent des soins spécifiques sur de très longues périodes.

«Tanzlinden» à Hilgershausen.



Les premiers exemples de ces tilleuls apparaissent autour de 1200. Leur répartition plutôt homogène dans de nombreuses régions germaniques semble attester qu'ils étaient une pratique courante de l'époque. Leur position correspond à des points focaux de la vie rurale : places de rencontre, lieux de justice, et célébrations de Mai. Bien qu'il soit difficile de les dater précisément et d'affirmer les raisons de leur développement, il se peut que ces tilleuls aient à l'origine une signification de culte ou symbolique. Les plateformes dans les couronnes semblent être plus récentes. Dans la poésie médiévale, 2 raisons sont évoquées qui pourraient expliquer la prolifération de ces tilleuls particuliers : améliorer et mettre en valeur la forme de l'ombre produite par l'arbre, ou le mettre en valeur et lui attirer attention et admiration par des actes d'affection et des soins. La conception ne doit cependant pas être arbitraire, au contraire du symbolique, ce qui explique que de nombreux arbres ont été façonnés avec 7 ou 12 branches. Ils deviennent populaires en Suisse aux 15 et 16ème siècles. Ces tilleuls sont un autre exemple de constructions habitables utilisant le vivant comme solution structurelle.^{1 2}

L'art topiaire

Un bâtiment entièrement végétal est décrit au début du 14ème siècle par Pietro de Crescenzi. Cet agronome italien imagine « *un palais entièrement fait d'arbres, où le roi, la reine, les chevaliers et les demoiselles pourraient demeurer lors des saisons sans pluie. Tout devrait être mesuré, et au lieu de murs, on devrait planter des arbres fruitiers à croissance rapide.* » Ses réflexions servent non seulement la spatialité du jardin, mais se veulent aussi être des structures viables, accessibles. Ses considérations atteignent un point culminant au Baroque, où la maison et le jardin forment une unité dont l'architecture doit être travaillée jusqu'au moindre détail. On ne trouve plus d'éléments architecturaux isolés dans le jardin, le jardin entier est un palais de verdure.¹

Les travaux d'Olivier de Serres au dix-septième siècle s'enthousiasment pour l'art topiaire (du latin *ars topiaria*, « art du paysage »), qui consiste à tailler les arbres et arbustes de jardin dans un but décoratif pour former des haies, des massifs ou des sujets de formes très variées : géométriques, personnages, animaux... Il mentionne également la pratique des espaliers, permettant un développement favorable aux arbres fruitiers, alors abrités des intempéries et bénéficiant de la chaleur emmagasinée par le mur contre lequel ils s'appuient. « *Les arbres peuvent avoir la forme que l'on souhaite (droits, courbes, formes géométriques...) et sont changeants : fleurs au printemps, ornés de fruits et de feuillages en été et en automne... En hiver même les formes des branches entrelacées sont belles.* »²

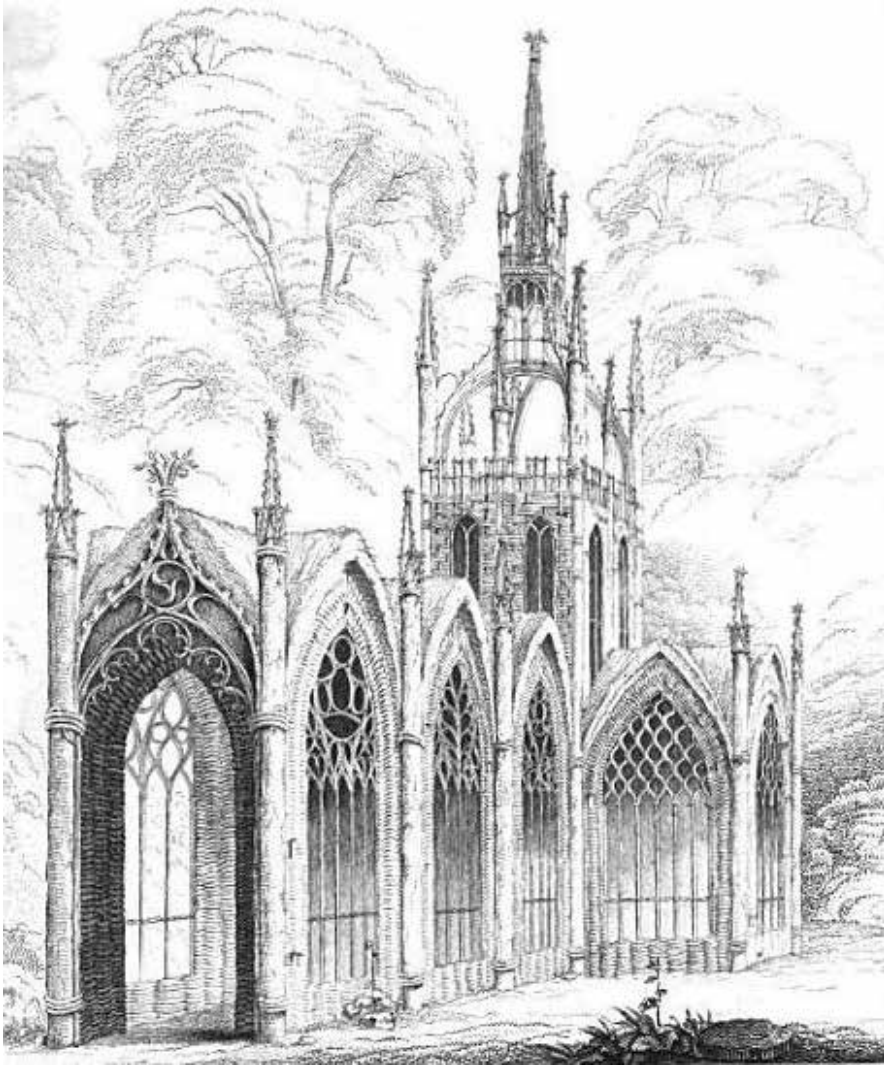
Les techniques agricoles

En 1716, Friedrich Kuffner publie *Neu-Erfundene Bau-Kunst zu Lebendigen Baum-Gebäuden*, qui regroupe des techniques de treillis et de greffes. Dans ses croquis, il propose de réaliser du mobilier vivant, comme des tonnelles d'arbres fruitiers ou des cadrans solaires. Néanmoins, la pratique de la culture en treillis et la mise en forme d'arbres fruitiers prospèrent après le baroque. En 1859, Eduard Lucas fonde un collège privé pour l'horticulture et la culture de fruits. Le *Manuel Lucas pour la culture de fruits* deviendra un standard de la pratique. Lors de l'exposition universelle de 1900, Nicolas Gaucher présente un verger de formes, après avoir expérimenté la mise en forme et la productivité dans des serres et jardins expérimentaux.²

Notons que chaque période a sa définition du jardin comme zone de transition entre l'intérieur et l'extérieur. Le jardin doit être plus naturel que la maison et plus artificiel que la nature. Si l'on considère les périodes avant le siècle des lumières, le jardin doit être plus artificiel que la campagne cultivée, qui constitue la nature. « *Si les colonnes de pierres imitent des troncs d'arbres, alors ces troncs ont plus de valeur que leurs copies de pierres. Ainsi, les arbres taillés témoignent du dieu créateur, pas du jardinier.* » Au siècle des Lumières, alors que l'on prend en compte la nature sauvage, le jardin doit refléter la campagne entretenue par les hommes. L'arbre taillé n'est plus vu comme la création de Dieu, et son artificialité doit être évidente.¹

Par topiaire, l'utilisation de plantes vivantes comme structures, architectures ou mobiliers devient un art. Néanmoins, une fois ses règles établies et en l'absence de raisons pour sa poursuite, s'établit une pensée qui condamne la pratique de la taille des arbres. C'est la naissance du jardin à l'anglaise.

On constate que la taille des arbres fruitiers constitue un art développé aux règles établies, permettant la mise en forme de plantes vivantes. Cependant, sa pratique requiert des connaissances précises et demande une grande maîtrise.



Sir James Hall,
Cathédrale de
saule, 1794.

Origine de l'architecture gothique ?

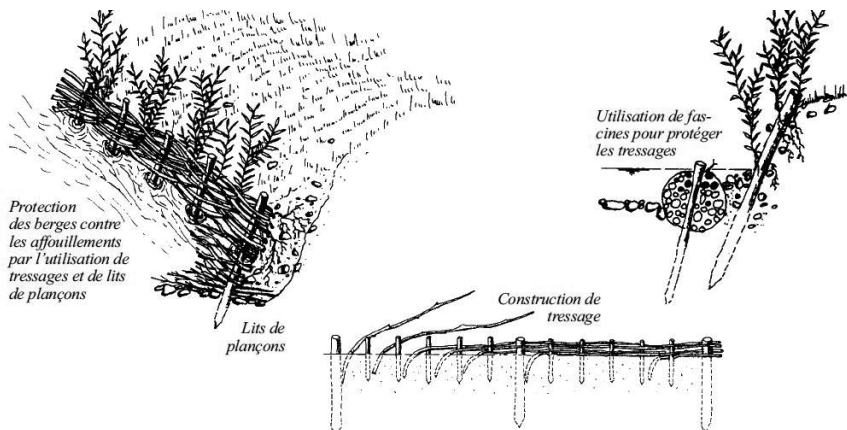
Sir James Hall, dans son *Essay on the origin, history, and principles, of Gothic architecture*¹⁶, explicite quels sont selon lui les principes constitutifs de l'architecture gothique et leur origine. Remarquant l'unité stylistique des bâtiments gothiques de l'ouest de la France, il imagine que ces constructions imitent une structure réelle ou imaginaire, faite de matériaux ayant une forme caractéristique. C'est en voyant des paysans transporter des tiges leur servant de tuteurs pour les vignes qu'il s'imagine des habitations rustiques construites à partir de ces tiges, ressemblant à des ouvrages gothiques et desquelles les formes particulières de ce style (notamment l'ogive) seraient dérivées. Pour appuyer sa théorie,

il réalise dans son jardin une *cathédrale de saule*, faite de poteaux de frêne et de tiges de saule flexibles et vivantes. Là encore, il s'agit d'une architecture vivante, mêlant structure de saule et remplissage en tressage d'osier. Il prouve ainsi selon lui l'origine de l'architecture gothique en pierre, imitant des structures rustiques de tiges de saule et de tressage d'osier. Il mentionne d'ailleurs la théorie du Dr Warburton, pour qui l'origine de l'architecture gothique serait une allée d'arbres vivants, les branches vivantes se croisant au-dessus de nos têtes dans la forme de la voûte en ogive et d'autres branches entrelacées évoquant les portes gothiques. Toutefois, il précise que cette théorie n'apporte pas d'explication pour tous les éléments du style, comme les flèches, clochers, pinacles...

Bio-ingénierie

L'utilisation de plantes vivantes en ingénierie est maîtrisée et poursuit l'objectif technique de stabilisation des berges et talus, et de prévention de l'érosion. Elle est aussi utilisée pour la régénération des sols. Cette pratique possède différentes appellations : bio-ingénierie, génie écologique, génie biologique... Elle constitue une alternative douce aux techniques traditionnelles lourdes de génie civil. Le saule est une espèce fréquemment utilisée pour sa capacité à se multiplier à partir d'une branche coupée mise en contact avec de la terre.¹⁷ Les interventions traditionnelles de stabilisation des sols ont tendance à s'altérer une fois en place. La bio-ingénierie est toujours en développement et s'adapte à l'évolutions des conditions extérieures. Cependant, l'utilisation de matériaux vivants pour stabiliser les pentes naturelles et artificielles est bien inférieure à l'utilisation de matériaux plus traditionnels comme le béton et l'acier, plus efficaces et plus rapides à mettre en œuvre. Mais ces derniers rendent la surface du terrain étanche, ce qui provoque à la longue des inondations ou des glissements de terrain.² La bio-ingénierie constitue donc un exemple établi d'utilisation de plantes vivantes à des fins constructives ou d'aménagements.

Aqua Terra Solutions,
Techniques de génie végétal par tressage de saule.



Arborsculpture

En Californie, Axel Erlandsson développe sa propre méthode de mise en forme d'arbres entre 1920 et 1940. Autodidacte, il parvient néanmoins à produire des formes précises sans que les arbres ne perdent de leur vitalité. Il affirme « *parler aux arbres* » et garde ses techniques secrètes, s'entourant de mystère et provoquant l'enthousiasme des californiens. Il fonde le Tree Circus, où l'on peut admirer des arbres de toutes formes : nœuds, cœurs, anneaux... Cependant, on y trouve peu de formes architecturales exceptés un portail et une sculpture en forme de tour.

Reames Richards propose quant à lui de « *récolter* » des objets du quotidien que l'on cultiverait, comme des chaises par exemple. Il met en avant les avantages écologiques de cette méthode.¹⁸

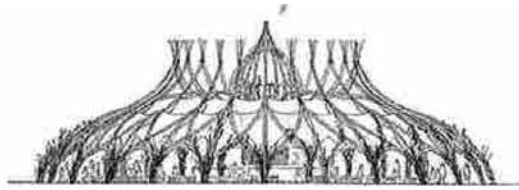
Konstantin Kirsch - Hermann Block

Dans les années 1980, Konstantin Kirsch, alors étudiant en architecture, s'associe à Hermann Block, jardinier, pour essayer de produire les architectures décrites par Arthur Wiechula. Ils suivent de près ses instructions, puis dessinent une série de bâtiments basés sur ses brevets. Ils développent aussi leurs propres techniques. On peut voir leurs réalisations dans un parc près de Nentershausen en Allemagne. Ils utilisent du frêne, de l'érable ou du hêtre. Dans de nombreuses réalisations, les plantes sont désormais si grandes que les murs ne sont plus les seules surfaces vivantes. Des pans de toit sont aussi formés grâce à des techniques horticoles.¹⁹

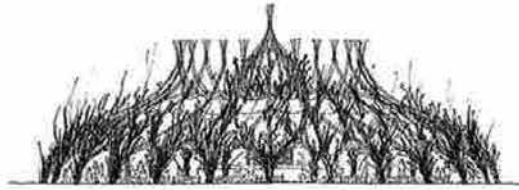
Marcel Kalberer

A la fin des années 1980 Marcel Kalberer et son atelier *Sanfte Strukturen* mettent au point une technique d'architecture végétale en assemblant des tiges de saules vivants. Le groupe compte depuis de nombreuses réalisations, diverses cabanes et huttes, des tunnels, des arcades, des ponts et même des tours ! Leur plus grande réalisation est le palais de saule, de 25m de diamètre avec des portées de 8m. Ces structures sont « habitables » : on peut s'y promener, les escalader, y jouer... Certaines ont été recouvertes de toile, ou aménagées en scènes de spectacles... Cette production prolifique illustre la faisabilité de structures vivantes variées.²⁰

Marcel Kalberer,
processus de
croissance du Palais
de Saule, 1998.



1998



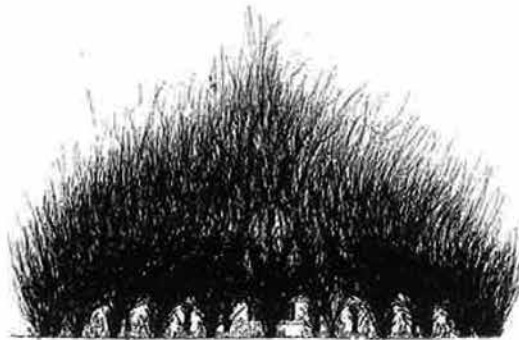
2001



2003



2007



2010

Baubotanik

Le groupe de recherche interdisciplinaire Baubotanik a été fondé en 2007 à l'IGMA de l'Université de Stuttgart. Il met en collaboration des scientifiques, ingénieurs, et des architectes pour mener des recherches sur les aspects botaniques, constructifs et théoriques de la construction avec des plantes vivantes. Plusieurs projets ont déjà été réalisés. Construite en 2005, la passerelle Baubotanik est une passerelle surélevée dont la structure est composée de saules vivants (*salix viminalis*). La tour Baubotanik, réalisée en 2009, transpose le savoir acquis avec la passerelle pour construire une petite tour de 3 étages, avec une empreinte au sol de 8m². Sa structure est aussi faite d'arbres vivants, cette fois-ci de saules blancs (*salix alba*). Le cube de platanes de Nagold (*platanus acerifolia*) est réalisé pour l'exposition horticole de 2012. Dans un contexte urbain, il offre 3 niveaux de passerelles accessibles au public par des escaliers.

« *Le contraste entre les tuyaux, régulateurs, senseurs et valves d'un côté, et l'abondance de feuilles vertes et de pousses d'un autre, crée une atmosphère unique à l'intérieur du cube.* » Le bâtiment est resté en place après l'exposition pour offrir un parc vertical aux habitants des environs et poursuivre l'observation de son évolution.

Ces 3 réalisations utilisent la technique de l'addition des plantes (décrite en détail dans la section Technologies de construction vivante : adhérences structurelles), en faisant croître ensemble sur une structure temporaire de jeunes plants mis en forme pour constituer la structure botanique souhaitée. Une fois la structure botanique viable et assez forte pour reprendre les charges, l'échafaudage temporaire peut être retiré.

Le groupe Baubotanik se distingue des exemples cités jusqu'ici par sa volonté de fonder une discipline d'architecture vivante en comprenant les mécanismes de croissance des plantes.^{21 22}

Conclusion

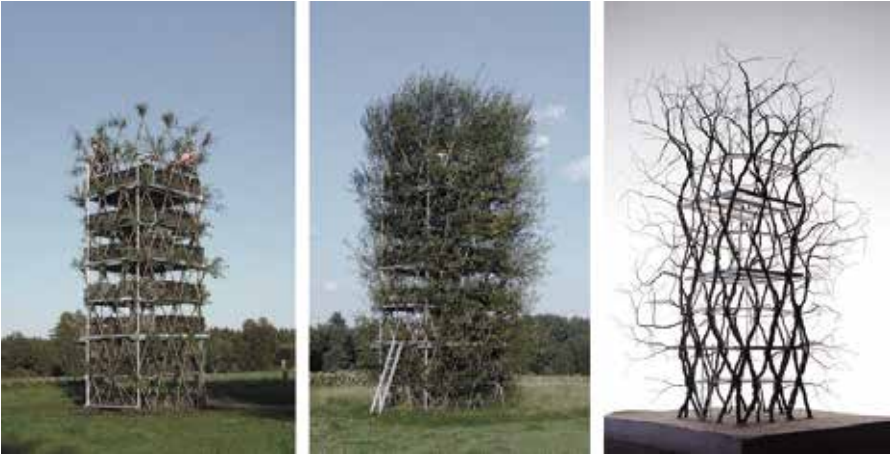
On remarque à travers cet aperçu que l'idée d'un rapprochement entre nature et architecture existe depuis longtemps, évoquant parfois même l'origine de l'architecture. Certaines idées manquent toutefois de bases botaniques pour être réalisables, alors que d'autres expériences ont déjà été menées avec succès. Seul le groupe Baubotanik cherche à établir une discipline architecturale en étudiant les principes botaniques. Leurs recherches sont approfondies dans les sections suivantes, elles constituent en effet à ce jour les seules bases théoriques et scientifiques pour une architecture vivante (structure de plantes vivantes), ayant une esthétique et une logique constructive spécifiques.

Thème et motivations

Ferdinand Ludwig,
Daniel Schönle.
Cube de platane, Nagold.
Visualisations après
installation (gauche),
en période de
croissance (milieu)
et après 15 ans
(droite). 2011.



Ferdinand
Ludwig, Cornelius
Hackenbracht.
Baubotanik tower
après réalisation
(gauche), en
croissance (milieu),
et maquette
de la structure
autoportante
(droite). 2009.



Ferdinand Ludwig,
Oliver Storz.,
Baubotanischer
Steg, 2005.



Chapitre 3

Autres éléments architecturaux vivants ou générés par le vivant

Note sur la distinction structure/enveloppe

Les visions, projets et réalisations évoqués jusqu'ici se caractérisent pour la plupart par l'usage de plantes vivantes en tant que structures. Néanmoins, les recherches sur l'apport du vivant en architecture peuvent s'élargir à d'autres organismes vivants, ainsi qu'à l'enveloppe du bâtiment. La partie suivante cite quelques-unes de ces réflexions, les séparant en « Visions » et « Réalisations », certains étant restés à l'état de concepts alors que d'autres ont été développés en tant que prototypes ou même réalisés.

Visions

Oyster-techture

Ce projet pour la baie de Red Hook à Brooklyn, propose « *une armature de pieux sous-marins connectés par un maillage de corde qui fournit une structure servant de support pour l'élevage d'huîtres* ». Prospères dans la région jusqu'au début du vingtième siècle, elles ont été décimées par un élevage intensif et la pollution de l'eau. En utilisant des récifs d'huîtres comme élément de construction, l'Oyster-techture veut réaménager le paysage marin de la baie en canaux de navigation, lieux de plongées et promenades. De plus, la capacité de filtration de l'eau des huîtres permet une amélioration de la qualité de l'eau, tout en stimulant l'activité et les échanges dans cette zone de Brooklyn. Ce nouveau récif est « *largement destiné à protéger le port de New-York des tempêtes et montées des eaux attendues dans les prochaines décennies.* » Si l'idée est séduisante, elle reste à l'état de concept, commissionnée en 2009 pour une exposition au MOMA visant à élaborer des stratégies d'adaptation face aux changements climatiques et l'élévation du niveau marin pour la ville de New York.⁸

Eclairage urbain

Certains organismes vivants sont bioluminescents, c'est-à-dire qu'ils produisent de la lumière en convertissant une énergie chimique en énergie lumineuse. Cette capacité à émettre de la lumière naturellement pourrait être exploitée pour l'éclairage urbain, en tant qu'éclairage d'ambiance, signalisation, balisage, panneaux d'affichages, afin d'éclairer sans électricité, sans installations lourdes et sans émissions polluantes. L'idée du concept Bioluminescent Devices for Zero-Electricity Lighting est d'utiliser les bactéries *Vibrio fischeri* qui émettent une lueur de couleur vert pâle, ainsi que des algues *Pyrocystis fusiformis* qui émettent une lumière bleue lorsqu'elles sont en mouvement. Ces microorganismes peuvent être cultivés dans un milieu nutritif et continuent à se multiplier tant que des nutriments sont présents. Bien que des tests aient été réalisés en laboratoire, ce concept n'a pas encore d'application développée. Certaines méduses possèdent aussi un gène bioluminescent, que le projet Genetic Barcelona propose d'intégrer à des arbres vivants pour qu'ils deviennent des sources d'éclairage public.⁸ Cela soulève alors la question de la manipulation génétique.

Albert Pope : Carbon 2065

Albert Pope propose une vision de développement pour la ville de Houston, Carbon 2065. Dont l'objectif est une ville au fonctionnement neutre en carbone. Carbon 2065 repose sur le principe de hautes constructions en bois comme méthode idéale pour répondre à l'urbanisation croissante ainsi qu'aux considérations écologiques de notre temps. Des forêts gérées correctement alliées à l'utilisation du bois dans la construction peuvent avoir un impact significatif sur la lutte contre le réchauffement climatique en constituant de grands stocks de CO₂. Son projet est mentionné ici pour sa volonté de durabilité incluant une gestion des plantes vivantes même si leur utilisation constructive reste traditionnelle (non vivante).²³

Réalisations

Bâtiments algues

Le potentiel des algues n'est pas seulement celui de la bioluminescence. Elles sont aussi capables de générer de la biomasse utilisable pour la production de chaleur tout en consommant du CO₂ pour se reproduire. Deux exemples de façades utilisant des algues vivantes comme source d'énergie pour le bâtiment sont détaillés dans la section *Etat des lieux et fonctionnement des enveloppes vivantes*.

Bio matériaux : brique, béton, plastique

L'apport du vivant peut aussi changer la conception d'éléments de construction traditionnels, comme la brique, le béton ou le plastique. A l'ETH, le Future Cities Laboratory s'intéresse à des matériaux de construction composites générés par la croissance de mycélium. Non toxique, il se développe facilement dans la forme souhaitée, en utilisant très peu d'énergie.²⁴ Des briques peuvent aussi être formées à partir de sable, d'une solution de chlorure de calcium, d'urée et de bactéries (*Sporosarcina pasteurii*), les bactéries soudant les grains de sable pour former un composé rigide et résistant. Cette même bactérie peut être ajoutée à du béton pour lui conférer des propriétés d'autoréparation diminuant les coûts de maintenance et augmentant la durabilité du béton dans le temps. Les fissures apparaissant au fil du temps dans le béton sont en effet comblées par du calcaire produit par les bactéries présentes dans le mélange. Enfin, un prototype de bioplastique est développé aux Etats-Unis, en recyclant les eaux usées. Riches en matières organiques, elles contiennent des bactéries et microorganismes capables de produire du plastique PHA (Polyhydroxyalcanoate) biodégradable.⁸ Celui-ci se distingue du plastique agrosourcé (issu de matières premières renouvelables comme le maïs, la patate douce, la canne à sucre ou l'huile de ricin).²⁵ Enfin, signalons la pratique des graffitis végétaux ou des fresques végétales, objets d'ornement vivants et en croissance.

Ingo Burgert

Finalement, je vais mentionner ici les travaux de l'équipe d'Ingo Burgert, Professeur et Docteur à l'Institut für Baustoffe (Institut pour les matériaux de construction) à l'ETHZ. Leurs recherches analysent et transfèrent des principes et mécanismes qui peuvent être trouvés dans la nature à des applications techniques (biomimétiques, matériaux bio-inspirés).

En particulier, l'un des thèmes de recherche de ce département concerne la modification de la surface du bois pour le protéger contre les éléments extérieurs, tout en préservant son aspect sans utiliser de vernis ni de peintures. Ils y sont parvenus en faisant croître des cristaux d'oxyde de zinc dans les aspérités de la surface du bois grâce à un dépôt par bain chimique. Il est possible de guider la croissance de ces cristaux par des « agents d'orientation » chimiques différents, pour obtenir des structures en réseaux de nano-tiges rugueux ou des films denses. Ce procédé assure une protection efficace de la surface du bois contre les UV, les intempéries et même les attaques biologiques. Avec le développement en film dense, la protection se lie mieux au bois et est plus durable, pour une protection identique à celle de la structure en nano-tiges. De plus, le film dense est quasiment transparent, ce qui préserve l'apparence naturelle du bois. Ce procédé est actuellement testé sur le bâtiment « House of the Natural Resources » de l'ETH.²⁶ Bien que les cristaux ne soient pas des organismes vivants, un processus de croissance est utilisé ici afin de donner aux bois de nouvelles propriétés, dans un souci de durabilité et de respect de l'environnement.

Conclusion

L'apport du vivant en architecture ne se limite donc pas aux plantes ou à la structure. De nouveaux matériaux émergent, vivants ou générés par des organismes vivants, utilisables comme éléments de construction. Des visions proposent des solutions énergétiques (éclairage bioluminescent) ou des scénarios pour des villes qui stockent le CO₂ au lieu d'en émettre. Je recommande vivement la lecture du livre *Bio Design* de William Myers, d'où sont tirés plusieurs exemples énoncés dans ce travail, pour approfondir le sujet de la conception architecturale et du design à partir du vivant.

La plante, un matériau de construction vivant

Chapitre 4

Principes botaniques élémentaires

« Si les arbres vivants sont l'objet de la conception architecturale et de la construction, alors les modèles de base et les conditions de la croissance des plantes doivent être considérés comme des paramètres de conception essentiels. Alors seulement les bâtiments vivants peuvent éviter une mort prématurée, croître vigoureusement, et se développer en accord avec les intentions de l'architecte. »²⁷

Cette partie développe les principes botaniques élémentaires du fonctionnement et de la croissance des plantes vivantes, avant de chercher à comprendre comment elles peuvent devenir un matériau de construction vivant.

Principes de base

L'arbre est un système interagissant avec son environnement, capable de remplacer des organes blessés ou morts pour poursuivre sa croissance. La base botanique de cette capacité de régénération est le fait que chez les plantes toutes les cellules vivantes et divisibles peuvent produire toutes sortes d'organes, de sorte qu'en principe chaque cellule vivante peut régénérer un nouvel organisme complet. Les organes de l'arbres sont les feuilles, le tronc et les branches, et ils remplissent des fonctions spécifiques. Les racines et les feuilles lui servent à exploiter son environnement. L'arbre cherche à les répartir efficacement dans le plus grand espace possible : c'est le principe d'efficacité. La photosynthèse utilise l'énergie lumineuse pour produire des glucides : le CO₂ atmosphérique est couplé à de l'eau absorbée par les racines, et l'arbre vivant produit alors du glucose, de l'oxygène et de l'eau, éléments essentiels à son développement.

Le tronc sert donc d'axe structurel et d'axe de transport : il doit être capable de supporter le poids de l'arbre mais aussi des charges extérieures comme le vent ou la neige tout en assurant le transport d'éléments nutritifs entre les racines et les feuilles. Il existe une interdépendance entre le développement des différents organes de l'arbre vivant : si le rendement de la photosynthèse dépend de la surface de la feuille, l'absorption d'eau et de nutriments par les racines est aussi indispensable. Par conséquent, en l'absence d'un système racinaire suffisant, la croissance des feuilles sera interrompue jusqu'à ce que le système retrouve son équilibre.²⁸

Page de droite :
Luc Schuiten,
processus de
développement
d'arbres tressés
basé sur la
croissance du
figuier étrangleur.

Dans la nature : conquête spatiale

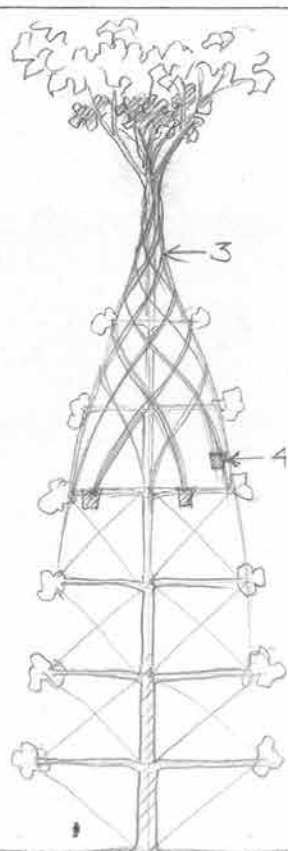
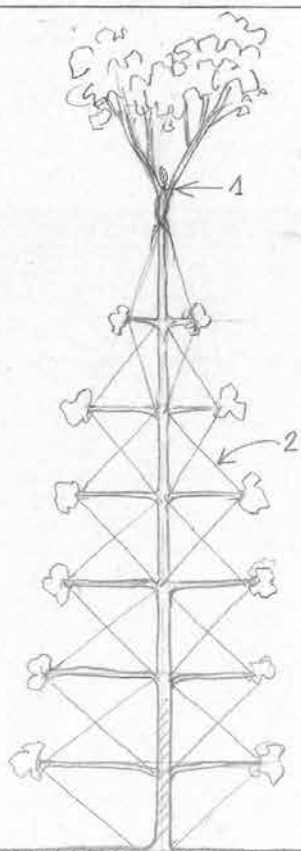
Dans la nature, on distingue les organismes autoportants, comme les arbres ou les buissons, et les épiphytes qui se développent en s'appuyant sur un autre organisme, comme des lianes. Pendant leur croissance, les arbres adaptent en continu leur forme extérieure et leur structure intérieure aux conditions environnementales. Les autoportants sont soumis à plus de stress que les épiphytes. Ils s'adaptent aux contraintes mécaniques du vent, de la neige, et aux pressions locales (comme le contact avec un élément de construction). Pour assurer leur stabilité mécanique, ils tendent vers une répartition homogène des forces sur toute la surface. Pour cela, suivant le principe d'efficacité, ils augmentent le volume de bois produit par une croissance en épaisseur plus importante là où les contraintes sont supérieures. Les branches et jeunes rameaux de la couronne restent quant à eux flexibles afin de réduire l'impact du vent sur l'ensemble de la structure. Les épiphytes en revanche n'ont pas besoin de se rigidifier autant, leur croissance secondaire (en épaisseur) est alors moins importante et ils restent beaucoup plus flexibles.²¹

L'exemple du figuier étrangleur

*« Fiquier étrangleur est le nom vernaculaire donné à certains arbres tropicaux (...), notamment des ficus, dont les racines aériennes ont des propriétés « étrangleuses » favorisant leur compétition avec d'autres arbres. »*²⁹

Ces arbres ont une stratégie de conquête spatiale tout à fait particulière. La germination se fait dans la couronne d'un arbre hôte, les graines y étant amenées par des animaux. Les racines se développent ensuite en direction du sol, très fines et très flexibles. Une fois le sol atteint, les racines se développent et le figuier étrangleur établit une structure enserrant l'arbre hôte. Alors que le figuier étrangleur commence sa vie terrestre et se rigidifie, l'arbre hôte pourrit et meurt. Le figuier étrangleur se retrouve autoportant. Cette stratégie se distingue par sa rapidité et son efficacité.²

PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DES ARBRES TRESSÉS.

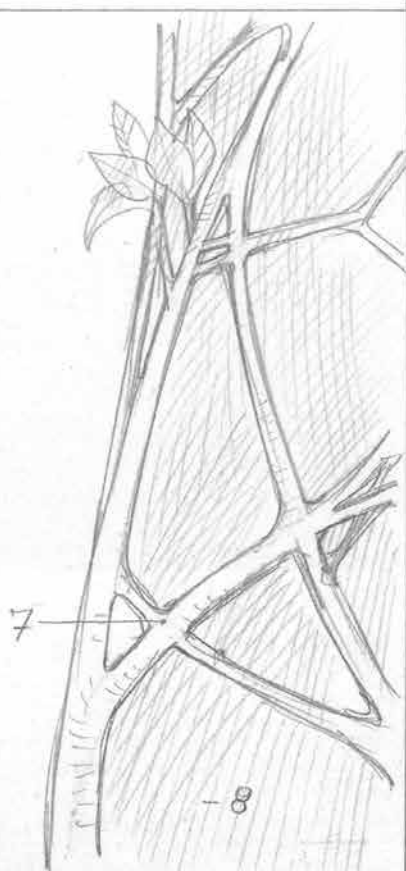
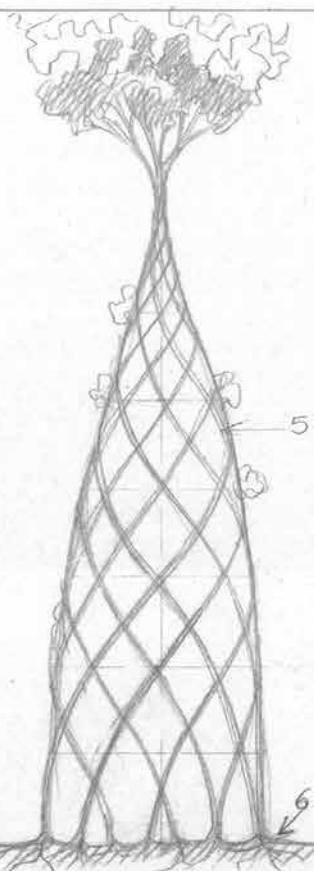


1 GERMINATION D'UNE GRAINE DE FIGIER ET RANGEUR (FICUS MYMPHAEIFOLIA) AU SOMMET DE L'ARBRE SUPPORT.

2 TENDEURS ET TUTEURS DE GUIDANCE DES BRANCHES POUR LA REALISATION DE LA STRUCTURE PORTANTE DES PLANCHERS.

3 ORIENTATION EN VRILLE DES RACINES DU FIGUS AU MOYEN DE CORDES TENDUES EN PERIPHERIE DE LA STRUCTURE.

4 PETITS SACS DE TERREAU SUSPENDUS SERVANT A L'ALIMENTATION PROVISOIRE DES RACINES DU FIGUS.



5 APRES EPUISEMENT DES SUBSTRATS, LES RACINES CONTINUENT LEUR PROGRESSION VERS D'AUTRES RESERVES PLUS BASSES ET PLUS IMPORTANTES.

6 LES RACINES ONT ATTEINT LE SOL ET LE FIGUS PEUT SE DEVELOPPER LIBREMENT SANS ET RANGEUR L'ARBRE SUPPORT.

7 LES RACINES DU FIGIER SE RAMIFIENT SE CROISENT, SE SOUDENT LES UNES AUX AUTRES EN FORMANT UN RESEAU PUISSANT ET RIGIDE.

8 FIXATION A L'INTERIEUR DES MAILLES DE LA NOUVELLE STRUCTURE D'UN BIO-TEXTILE CONSTITUANT LA PEAU EXTERIEURE DE L'HABITARBRE.

Luc Schmitz

Chapitre 5

Production de plantes en tant que matériau de construction : paramètres de modification de la croissance

En principe, il existe trois moyens d'influencer le système de la plante vivante :

- la modification génétique
- la modification des processus hormonaux
- le contrôle des facteurs environnementaux.²⁸

Ces trois approches sont décrites ici pour comprendre comment influencer la croissance de plantes vivantes afin de produire un matériau de construction vivant répondant à des attentes précises dans un laps de temps minimal. Ces attentes sont : une croissance rapide, ainsi que l'obtention de tiges longues sans ramifications, minces et flexibles afin de construire une structure vivante, d'après l'exemple du figuier étrangleur.

Modifications génétiques

Le bois est un matériau complexe qui croît naturellement. Sa composition, faite d'éléments chimiques aux propriétés différentes, influence fortement son comportement mécanique, qui dépend alors des conditions ambiantes (hygrothermie). « *Cette composition consiste en différents types de cellules et tissus, organisés en couches. Chimiquement, le bois sec a environ : 40-50% de cellulose, 15-35% de lignine, 25-40% d'hémicellulose.* » Néanmoins, cette composition peut varier, selon le développement de l'arbre ou les conditions environnementales.

Des techniques de sélection et de multiplication sont utilisées pour un grand nombre d'espèces, mais la modification génétique peut être attractive lorsque l'arbre possède un long cycle de régénération. La modification génétique est étudiée dans de nombreux pays : en Amérique du Nord (Canada et Etats-Unis), en Amérique latine (Uruguay, Chili), en Europe (Portugal, France, Angleterre), en Afrique du Sud, en Asie (Japon, Vietnam, Chine), en Nouvelle Zélande, malgré les positions diverses des pays face aux organismes génétiquement modifiés (liste des pays non exhaustive). L'étude porte sur des espèces très diverses, le peuplier, l'eucalyptus, l'épinette, des arbres fruitiers comme le papayer, pour ne citer qu'eux.³⁰

Les modifications génétiques peuvent être appliquées aux plantes vivantes pour « *optimiser le matériau produit pour des applications variées* ». Les paramètres généralement modifiés sont assez classiques : résistance contre les insectes et les nuisibles, les maladies, les herbicides, réduction de la lignine ou modification de la cellulose. La lignine est le composant qui confère au bois sa rigidité, son imperméabilité, le protège des agressions extérieures. Une teneur en lignine réduite est intéressante pour la production de bois et de pâte à papier, dont les processus de production sont alors simplifiés.⁴ En utilisant la technique de l'ARN anti-sens, des chercheurs ont inhibé l'expression du gène 4-coumarate:coenzyme A ligase (4CL). La lignine a été réduite de 45% et la cellulose augmentée de 15%, prouvant une interdépendance des proportions de lignine et de cellulose. L'augmentation de cellulose en réduisant la proportion de lignine n'est probablement pas la meilleure solution. Réduire la lignine peut en effet avoir d'autres conséquences pour l'arbre, puisqu'elle stabilise la structure de la plante. L'aptitude biologique peut aussi être altérée lorsque l'arbre est rendu à son environnement naturel : il est plus sensible aux attaques pathogènes.³⁰ La modification génétique peut également influencer les processus hormonaux, ce qui constitue le sujet du paragraphe suivant. Notons toutefois que la manipulation génétique dans les plantes ne garantit aucun résultat mais permet plutôt de nouvelles possibilités, et que la transgénèse reste une opération complexe, alors que l'arbre en croissance réagit fortement à des facteurs environnementaux. Pour approfondir le sujet de la modification génétique des arbres, je conseille vivement l'ouvrage *Tree Transgenesis* de Matthias Fladung.

Modifications hormonales

« *Les hormones sont impliquées dans la régulation de nombreuses fonctions au cours du développement de la plante, comme la croissance des racines ou la formation des fleurs.* » Pour influencer les processus hormonaux, on peut modifier des gènes codant des protéines qui régulent la synthèse et/ou à la signalisation de gibbérelline, une hormone impliquée dans les processus de croissance végétale. L'auxine est une autre hormone de croissance issue des apex, souvent utilisée en bouturage, d'après discussion avec M. Buttler. La surexpression de certains gènes peut amener à une plus grande synthèse ou un meilleur transport de ces hormones impliquées dans la croissance des arbres.³⁰

Modification des facteurs environnementaux

Finalement, la plante est très sensible aux variations des conditions de son environnement. Dans la nature, lorsqu'elle est en concurrence avec d'autres plantes (c'est-à-dire ombragée par celles-ci), elle croît d'abord en longueur et peu en épaisseur afin d'atteindre plus rapidement la lumière. Le groupe Baubotanik a eu l'idée de simuler cette situation de concurrence en modifiant de manière sélective la composition spectrale de la lumière reçue afin d'obtenir des plants longs, minces et flexibles en une saison de croissance. En effet, la plante ombragée par ses concurrentes ne reçoit qu'une fraction de la lumière, la majeure partie étant absorbée par les feuilles des plantes voisines. Alors que le rouge lointain (environ 735 nm) peut être reçu même en situation d'ombrage, la lumière rouge d'environ 660 nm de longueur d'onde est largement absorbée par les feuilles. Pour ce faire, ils ont placé des filtres absorbant la lumière rouge sur les troncs de plants de platanes (*Platanus acerifolia*) dans une serre de culture dédiée.²

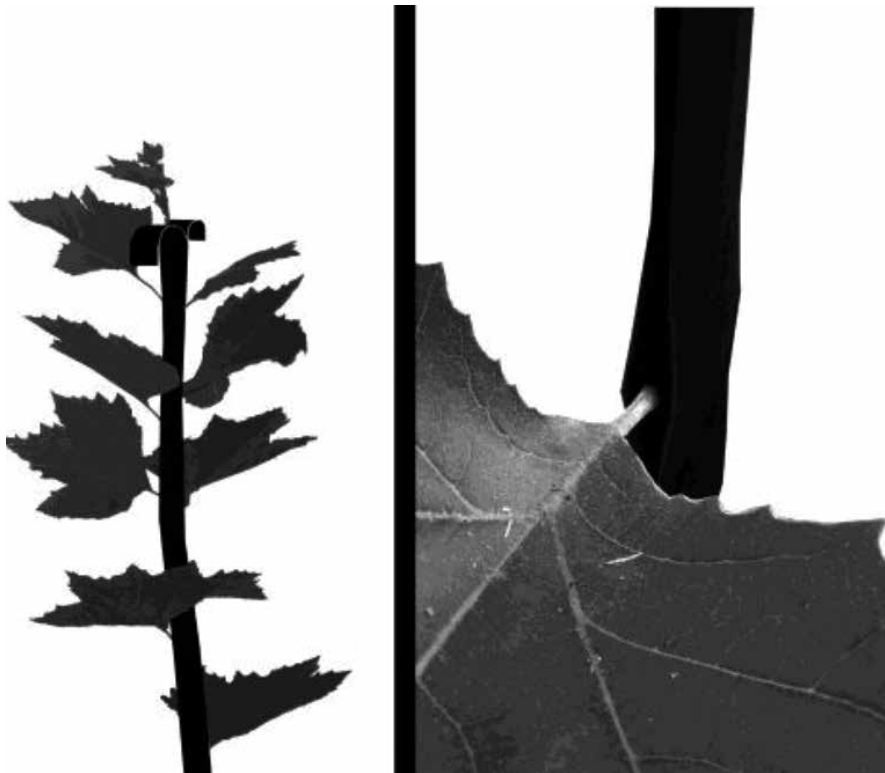
Matthias Fladung,
Surexpression
génétique et
hormonale et leurs
effets sur des arbres
transgéniques,
2006.

Hormones et « gènes hormonaux »	Espèces	Effets globaux	Effets sur les propriétés du bois	Références
Gibbérellines				
GA20 oxidase	Populus tremula x P. tremuloides	Distance entre les noeuds plus grande et amélioration de la biomasse	Fibres de cellulose plus longues	Eriksson et al. (2000); Fladung, non publié
GA2 oxidase	Populus tremula x P. alba	Plantes naines	-	Busov et al. (2003)
GA3 oxidase	Populus tremula x P. tremuloides	Modèle de croissance presque inchangé	-	Israelsson et al. (2004)
Cytokinines Ipt	Populus tremula x P. alba	Formation de bourgeons en l'absence de cytokinines exogènes, plants incapables de prendre racine	-	von Schwartzberg et al. (1994)
Auxines				
laaH, laaM	Populus tremula x P. tremuloides	Taux de croissance réduit	Modifications de caractéristiques anatomiques du bois comme la taille et la densité des vaisseaux.	Tuominen et al. (1995)
laaL	Populus tremula x P. tremuloides	Feuilles incomplètes	-	Fladung et Ahuja (1996)
gènes Rol	Betula pendula	Tendance à former un port buissonnant, feuilles plus petites	Fibres de xylème raccourcies	Piispanen et al. (2003)
	Populus tremula	Rupture de la tige, dominance apicale, longueur cumulative de la tige supérieure	-	Tzfira et al. (1999)

Chapitre 6

La plante vivante en tant que matériau de construction

« Avec 260 cm de croissance annuelle », la simulation de concurrence fonctionne moins bien qu'espéré pour la croissance. En revanche, « la réduction du diamètre est significative, l'élanement augmentant de 41% ($H/D=200$). Le module d'élasticité obtenu est de 3000MPa (contre 80000 MPa pour les plants témoins). La rigidité diminue d'environ 70%. La résistance à la flexion est bonne dans la base de la plante alors que les zones supérieures sont plus fragiles. Enfin, tous les plants cultivés ont un rayon de courbure très serré ($r < 5.5$ cm) alors que les exigences étaient de $r < 10$ cm. Les témoins cultivés en extérieur présentent des rayons de courbure $15 < r < 20$ ». Ainsi, le groupe Baubotanik a réussi à produire des plants aux propriétés adaptées à la construction d'une structure vivante.^{2 31}



Ferdinand Ludwig, Gerd de Bruyn, simulation de situation de concurrence par modification de la composition spectrale de la lumière reçue. Les troncs sont enveloppés de filtres, les feuilles reçoivent la lumière normalement. 2009.

Technologies de
construction vivante :
structure, enveloppe,
détail

Chapitre 7

De nature à structure : techniques d'assemblage de la structure vivante

Une fois les éléments de construction de la structure de plantes vivantes produits, il faut les assembler. Dans cette partie sont présentées les techniques d'adhérences naturelles et horticoles entre les plantes vivantes, afin de comprendre comment réussir une structure vivante viable.

Adhérences naturelles

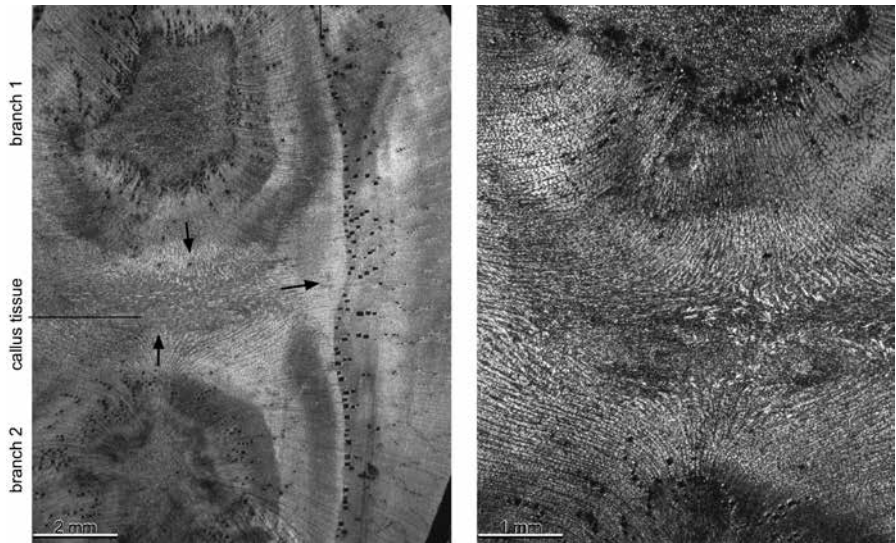
Lors d'une discussion avec M. Schweingruber, j'ai appris que dans la nature se produit fréquemment le phénomène d'anastomose. Il s'agit de la fusion physique et fonctionnelle des organes de deux végétaux, appartenant à la même espèce. Sous nos latitudes, celle-ci se produit plutôt dans les racines, même si elle peut tout à fait avoir lieu entre des branches ou des troncs. Ainsi, dans les années 60, il a été démontré que de nombreux arbres d'une forêt étaient connectés les uns aux autres par un réseau de racines fusionnées. Les avantages de ces adhérences racinaires pour les arbres vivants sont une meilleure stabilité face aux charges extérieures (comme le vent par exemple), et une technique de survie : l'arbre peut repousser après une coupe s'il est connecté par les racines à d'autres organismes capables de lui fournir l'eau et les nutriments nécessaires. Grâce à la compartimentation des plantes (qui leur permet d'isoler un tissu blessé ou malade du nouveau tissu produit), l'anastomose n'est pas un chemin pour les agents pathogènes.

Cette fusion se produit lorsque 2 cellules vivantes du bois (des cellules du tissu parenchymateux) entrent en contact, à la suite d'une blessure et d'un contact prolongé par exemple. Dès lors, elles se différencient en cellules du méristème, un tissu de croissance, et deviennent des cellules capables de se générer de nouveaux tissus. Ainsi, elles génèrent en premier lieu du cal, qui se forme pour protéger la plante après une blessure, puis se différencient en tissus nécessaires à la poursuite de la croissance de la plante. Ces adhérences peuvent se produire chez toutes les espèces, néanmoins une écorce fine et souple rend le processus plus facile.

Fritz Hans Schweingruber, Anastomose de 2 branches (*Castanea sativa*), 2008.

A gauche, on distingue les deux branches, le cal entre celles-ci et les nouvelles fibres périphériques après fusion des tissus.

A droite, on remarque le changement d'orientation des fibres après fusion des tissus.



Sélection végétale : techniques horticoles

M. Messerli m'a informée sur la pratique du greffage. En horticulture, des adhérences artificielles sont produites au moyen de greffes. Les objectifs poursuivis par les greffes sont variés : mise en forme particulière, soin d'arbres endommagés, ou modifications et/ou croisement de propriétés génétiques. Il existe de nombreuses techniques de greffe selon les buts poursuivis et les espèces impliquées. Cependant, toutes ces techniques ont pour point commun la section des deux parties de greffe et la mise en contact prolongé des tissus similaires, placés pour coïncider. Avec la section des parties de plante à mettre en contact, l'écorce n'entrave pas le processus d'adhérence comme c'est le cas dans la nature. Ce processus est d'ailleurs plus rapide que celui d'anastomose naturelle. Cependant, l'adhésion échoue si dans un laps de temps relativement court aucune connexion (notamment conductrice d'eau) ne se forme, car le greffon va sécher et mourir, étant incapable d'absorber de l'eau sans son propre système racinaire. Il faut donc réunir 4 conditions pour que la greffe réussisse :

- les 2 parties doivent être coupées et placées très précisément
- elles doivent être pressées fermement entre elles et de manière immobile
- le point de connexion doit être scellé hermétiquement pour être protégé contre les infections des agents pathogènes
- le greffon doit être protégé de la déshydratation.²

Adhérences structurelles

Afin de concevoir une structure de plantes vivantes viable, il faut provoquer artificiellement ce phénomène d'anastomose sur une structure conçue selon la technique de l'addition des plantes, développée par le groupe de recherche Baubotanik. Au niveau du sol, de jeunes plants, minces et flexibles, sont disposés selon la forme souhaitée (un treillis par exemple) et vissés entre eux. Afin de couvrir la hauteur nécessaire, le même processus est répété avec de jeunes plants en pot qui sont aussi vissés aux plants inférieurs. La structure peut ainsi être rallongée de la dimension voulue, sans nécessité d'attendre que les plants grandissent davantage. L'ensemble prend place sur une structure légère et temporaire, qui peut être en bois ou en acier, et qui assure un apport suffisant en eau et en nutriments aux plants en pots des étages supérieurs par des installations techniques. Les plants se trouvant au niveau du sol développent pleinement leur système racinaire. Lorsque les adhérences se produisent, l'ensemble forme un seul organisme physiologiquement viable. Les racines des plants supérieurs, à l'étroit dans les pots, peuvent alors être retirées sans dommage sur l'organisme constitué.

Il est possible de lier les plants entre eux de plusieurs manières, le succès de la connexion dépendant de l'espèce utilisée. On peut par exemple lier les plants avec des bandes élastiques qui les maintiennent fermement ensemble, ou par des câbles métalliques fins. Ce genre de connexion marche bien avec le saule, le charme, le hêtre, le bouleau ou l'aulne. En vissant les plants entre eux, une blessure met en contact leurs tissus et ils sont fermement maintenus. Ce type de connexion est très adaptée à l'espèce du platane. Les adhérences peuvent alors se développer. Elles jouent un rôle central pour la structure, car elles ont des « *significations constructives, physiologiques et esthétiques* » :

L'intérêt constructif est le développement de bois soudé, de grande résistance mécanique, assurant la pérennité de l'ouvrage. D'un point de vue physiologique, de nombreux plants isolés se connectent pour former un seul organisme vivant. Enfin, ces adhérences démontrent un choix esthétique puisque les connexions ne se produisent que si les plantes ont été techniquement connectées. L'adhérence est complète une fois que l'écorce et les tissus du bois ont fusionné, ce qui traduit une connexion mécaniquement stable et physiologiquement viable. Les réalisations de Richard Reames et d'Axel Erlandson constituent des exemples valables de structures vivantes auto-greffées.

Les conditions de concurrence entre les plants ont une grande influence sur le développement de la structure Baubotanik. En effet, les feuillages de la couronne diminuent la lumière reçue par les plants inférieurs. Alors que les plants situés dans les coins et en hauteur reçoivent plus de lumière et ont plus d'espace à disposition, les plants inférieurs risquent de mourir en raison de leurs conditions de croissance moins favorables. Pour éviter que la structure conçue ne disparaisse au fil du temps, certains plants prenant le dessus sur d'autres, une taille régulière doit être prévue.

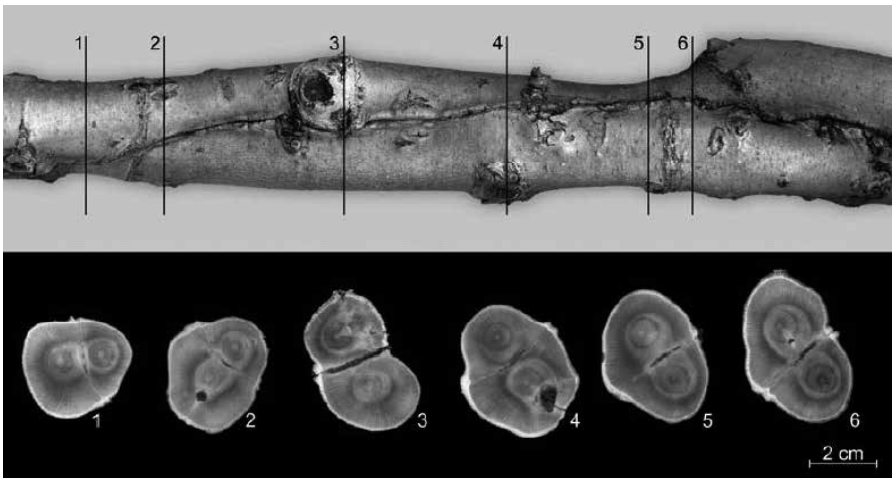
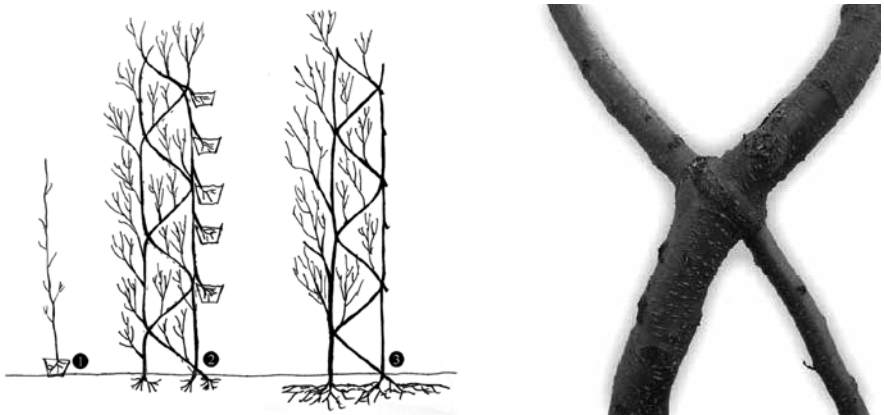
Enfin les réactions gravimorphes doivent elles aussi être prises en compte lors de la conception et de la mise en place de la structure vivante. En effet, celles-ci font que la croissance est modifiée lorsque les plants poussent inclinés et en flexion. Ils ont tendance à se développer à leur base plutôt qu'à leur extrémité. L'inclinaison par rapport à la verticale doit donc être la plus petite possible et les plants doivent être pliés de la manière la plus similaire possible. De cette manière un développement uniforme et une croissance en épaisseur homogène peuvent avoir lieu.²

Ferdinand Ludwig.

En haut à gauche : croquis explicatif initial de l'addition des plantes.

En haut à droite : bois soudé par anastomose (aulne).

En bas : Coupe à travers deux tiges assemblées en parallèle. Certaines parties ont bien fusionné, d'autres sont encore séparées par de l'écorce.



Chapitre 8

L'enveloppe vivante

L'enveloppe en architecture : rappels de physique du bâtiment

Un bâtiment est composé d'une structure, mais aussi d'une enveloppe. Le but de cette enveloppe est d'assurer le confort des occupants en les protégeant des agressions extérieures que sont les variations de température, les courants d'air, l'humidité ou la sécheresse, les intempéries, le feu, le bruit. Le confort de l'occupant nécessite aussi un apport suffisant de lumière naturelle. Ces propriétés lui sont conférées par les matériaux utilisés et sa composition.

D'un point de vue thermique, l'enveloppe isole l'occupant des variations de température. Elle assure aussi des stratégies de captage d'énergie solaire lorsqu'il fait froid ou d'ombrage lorsqu'il fait chaud.³²

Etat des lieux et fonctionnement des enveloppes vivantes

Avec une structure vivante, l'arbre de l'environnement proche du bâtiment se décale dans sa façade. En été les feuillages jouent le rôle de protection solaire en faisant de l'ombre, et assurent un climat frais par évaporation. En hiver la lumière peut passer entre les branches nues et l'énergie solaire peut être captée. On remarque toutefois l'émergence de réflexions sur divers types d'enveloppes vivantes. Par exemple, plusieurs projets cherchent à exploiter le potentiel des algues. La BIQ House à Hambourg possède une seconde peau de panneaux remplis d'algues qui génèrent de la biomasse et de la chaleur, pour les utiliser comme sources d'énergie renouvelable. Ces algues protègent aussi le bâtiment du bruit et du soleil. Celui-ci offre au regard une façade changeante, intrigante. Un circuit fermé transporte la chaleur générée en façade dans un local de gestion énergétique du bâtiment. La biomasse est récoltée par flottaison, et la chaleur par un échangeur. La chaleur peut être utilisée pour le chauffage et l'eau chaude ou stockée pour une utilisation ultérieure. La conversion de la radiation solaire reçue en énergie par cette seconde peau atteint les 48%, contre 12 à 15% pour les panneaux solaires.³³ Elle produit de la chaleur pour 5 des 15 appartements du bâtiment.³⁴

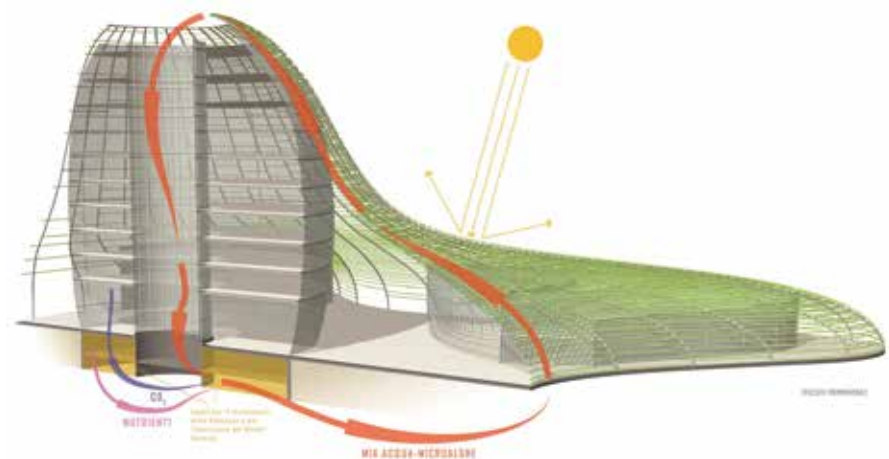
Cette recherche sur l'intégration d'algues comme organismes vivants actifs de l'enveloppe du bâtiment a aussi été menée par Gianluca Santosuosso lors d'un projet (non réalisé) en collaboration avec le studio Londonien ecoLogic (spécialisé en design environnemental, autonomie urbaine et nature intégrée à la construction). Ils ont imaginé un « photobioréacteur », c'est-à-dire un conteneur transparent dans lequel se trouve un mélange d'eau, de nutriments (comme du CO₂) et des micro-algues. Exposés au rayonnement solaire, les micros organismes favorisent la production organique par photosynthèse. Cette réaction permet la production de biocarburant, tout en nécessitant une grande quantité de CO₂ pour la reproduction des organismes. Ils ont ensuite cherché à intégrer dans un bâtiment, un projet de centre de recherche sur les énergies renouvelables à Venaria Reale, dans la région de Turin en Italie. Le système lie entre eux les espaces publics et les espaces de recherche. La densité de la membrane bioénergétique est répartie selon le rayonnement solaire reçu.

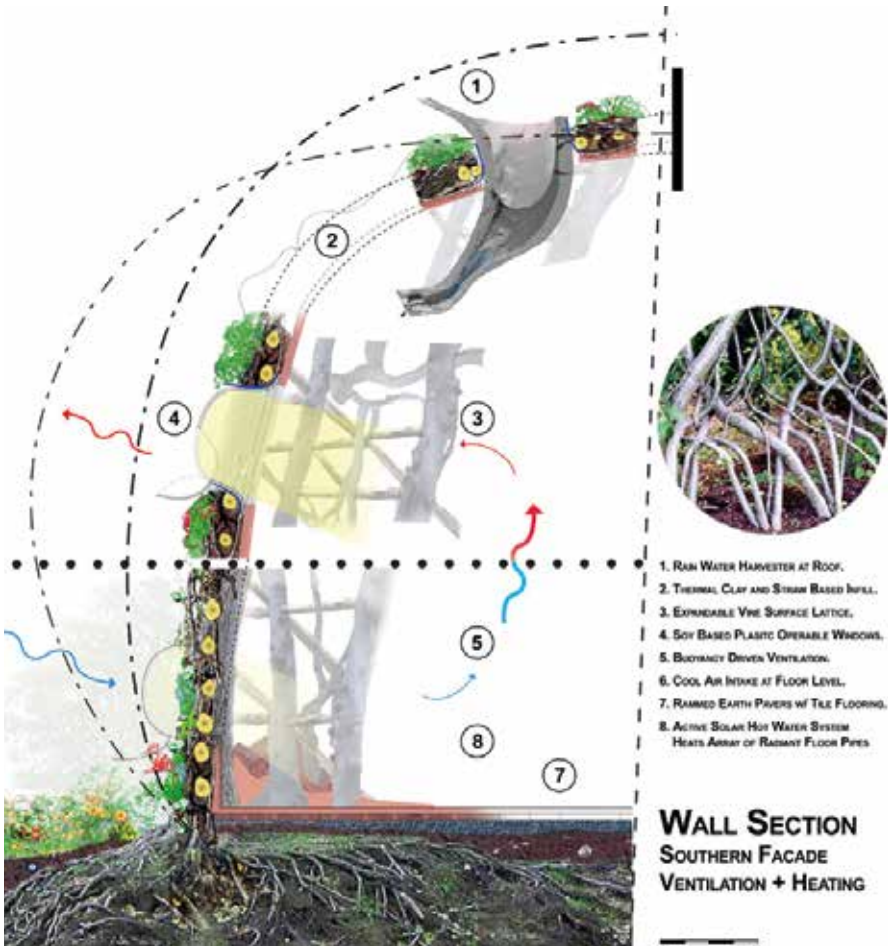
« Je pense que le développement d'une telle typologie architectonique innovante est un bel exemple de relation étroite entre les aspects architectonique et énergétique d'un bâtiment. Ici, la technologie n'est pas le but final de l'architecture, mais simplement un moyen de contrôler les processus naturels qui permettent au bâtiment d'être une « machine vivante » strictement liée aux variables environnementales. Comme une feuille ou un arbre ne sont pas des éléments isolés car ils dépendent du milieu environnant pour s'alimenter à travers la lumière et les substances présentes dans l'atmosphère, la membrane bioénergétique, à travers les micro algues, devient la principale source de production énergétique du bâtiment. Comme l'organisme végétal redonne à l'environnement ce qu'il a pris auparavant sous forme d'alimentation (oxygène, etc.), la membrane photoréactive utilise une partie des substances nocives produites par l'organisme architectonique (dioxyde de carbone) pour produire de l'énergie pour elle-même. »³⁵

Page de gauche :
Gianluca
Santosuosso,
ALGAEbuilding
research.

Page de droite,
en haut :
Joachim Mitchell,
coupe constructive
du Fab Tree Hab.

Page de droite,
en bas :
Splitterwerk,
Façade algue de
la BIQ House,
Hamburg, 2013.

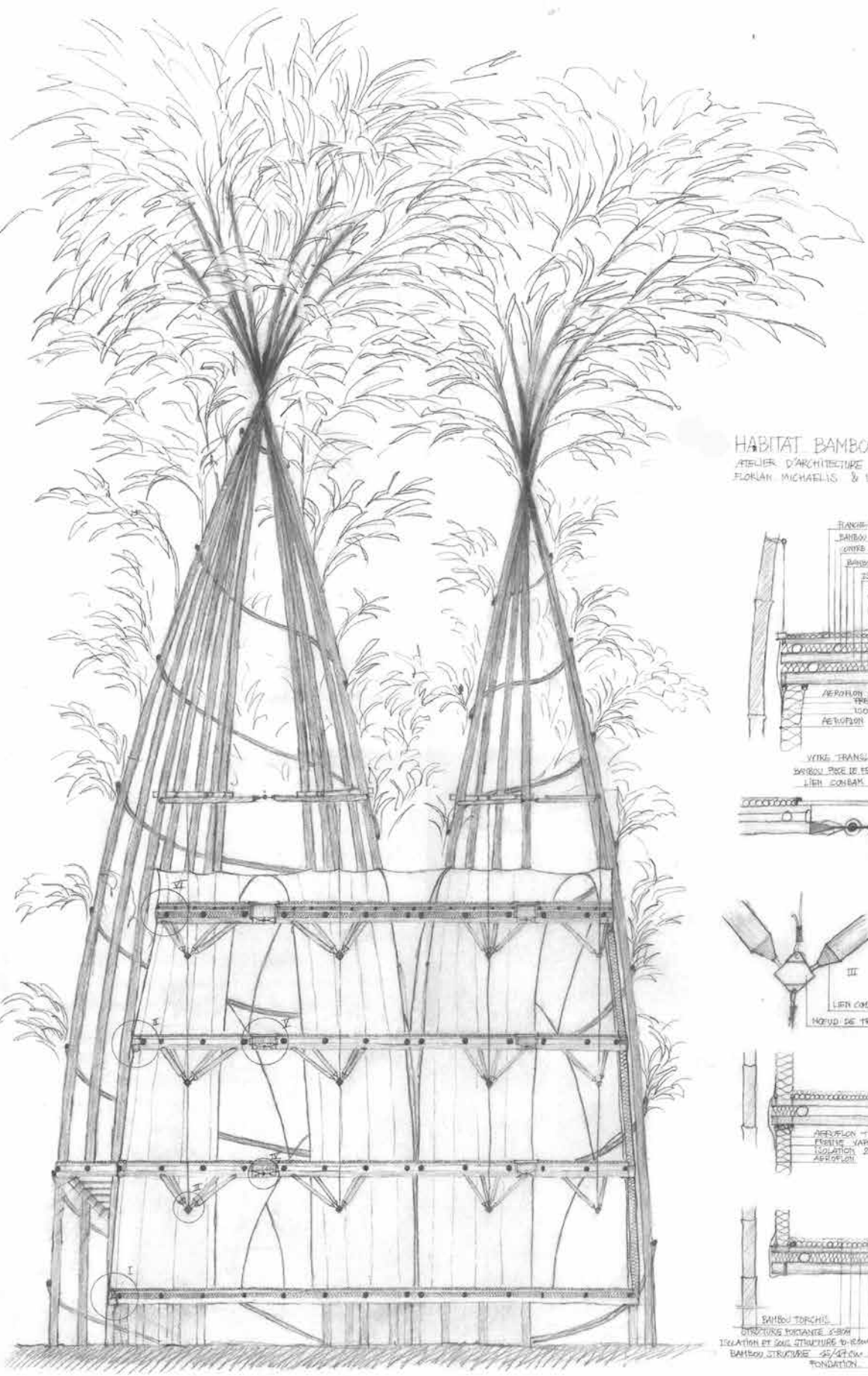




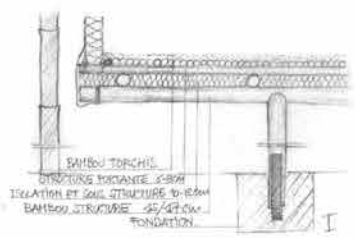
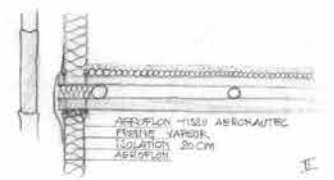
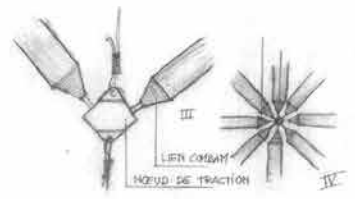
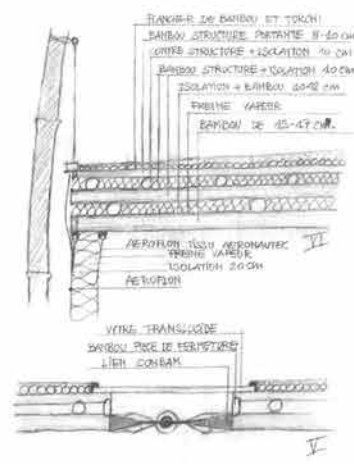
Page de droite :
Luc Schuiten,
coupe constructive
pour l'habitat
bambou.

Evoqué précédemment, Luc Schuiten propose pour ses architectures oniriques des parois extérieures en bio-textile, « comparables à la substance des cocons des vers à soie ou à celle des toiles d'araignées. Ces matériaux semi-transparents peuvent également capter l'énergie solaire pour fournir l'énergie nécessaire au chauffage et à l'électricité. »³⁶ Dans son projet pour le Fab Tree Hab, Joachim Mitchell détaille également le fonctionnement de son enveloppe.

Finalement, c'est l'émergence de nouveaux « bio-matériaux » générés par le vivant qui nous donne les composants de l'enveloppe vivante. Ainsi peuvent être utilisés le bio-béton, la bio-brique, le bio-plastique, le bio-verre, ou le bois protégé par des cristaux d'oxyde de zinc. Tous ont en commun une volonté de durabilité, d'un impact environnemental réduit, et de conférer à l'enveloppe une auto-réparation ou au bâtiment un apport d'énergie plus propre que les moyens actuellement utilisés.



HABITAT BAMBOU
 ATELIER D'ARCHITECTURE SCHUITEN,
 FLOKAR MICHAELIS & LUC SCHUITEN.



Chapitre 9

Hybridation avec d'autres matériaux : vers le détail de construction

Détails de connexion entre structure vivante et construction traditionnelle

Dans une structure vivante, les plantes sont liées entre elles mais doivent aussi se raccorder à des éléments techniques du bâtiment. Pour résoudre ces joints entre 2 systèmes, la croissance secondaire est exploitée. Lorsqu'un arbre se trouve en contact avec un autre matériau, il produit plus de matière pour réduire la tension au point de contact. Au niveau macroscopique, l'arbre développe une connexion exactement ajustée à l'élément de construction, ce qui la rend plus stable. Les composants techniques avec une section réduite sont intégrés plus rapidement par la plante que les composants avec une section plus grande. Au niveau microscopique, les fibres du bois s'alignent avec le flux des forces au sein de l'arbre. Comme toutes les fibres sont orientées perpendiculairement à la surface de contact, la forme et la surface du composant technique à intégrer déterminent les propriétés des nouvelles fibres produites. Les forces de cisaillement dans le bois sont alors réduites, et un verrouillage s'opère entre le bois et l'élément de construction.²¹ Dans ses projets, Luc Schuiten imagine des détails constructifs inventifs, adaptés à ses constructions vivantes.¹⁴

Une recherche est en cours à l'ITKE (Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Stuttgart), menée par Oliver Storz et Jan Knippers afin de mieux comprendre ces mécanismes et d'établir des règles de construction avec des plantes vivantes. Notons aussi que la flexibilité des plants utilisés permet de les mettre en forme selon la configuration souhaitée autour d'éléments de construction.

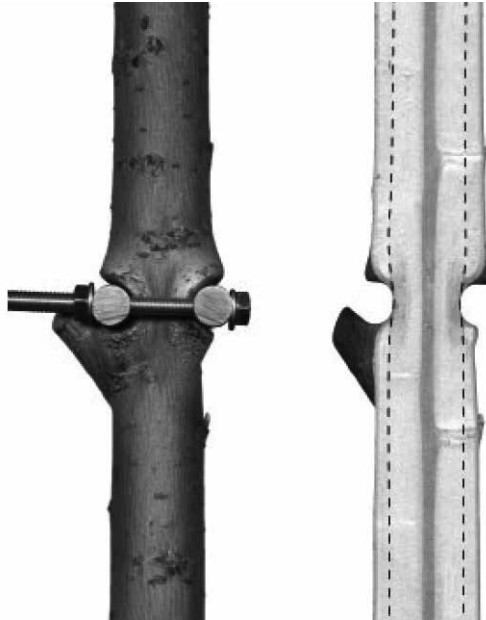


Ferdinand Ludwig, Développement des détails de connexion de la main courante du Baubotanischer Steg.

De gauche à droite : printemps 2005, été 2005, été 2010.

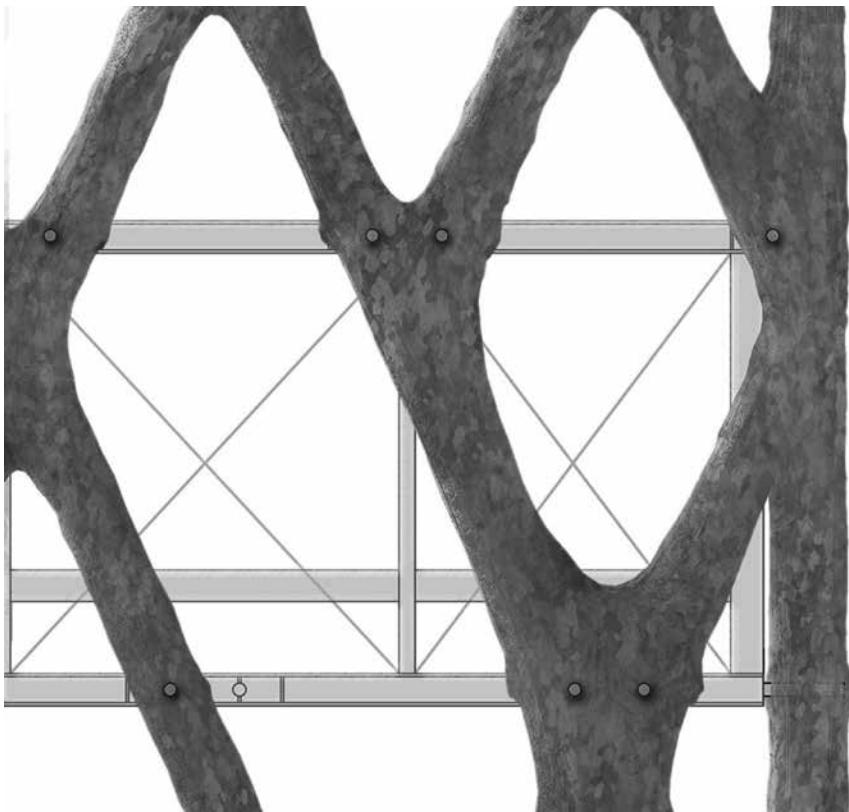
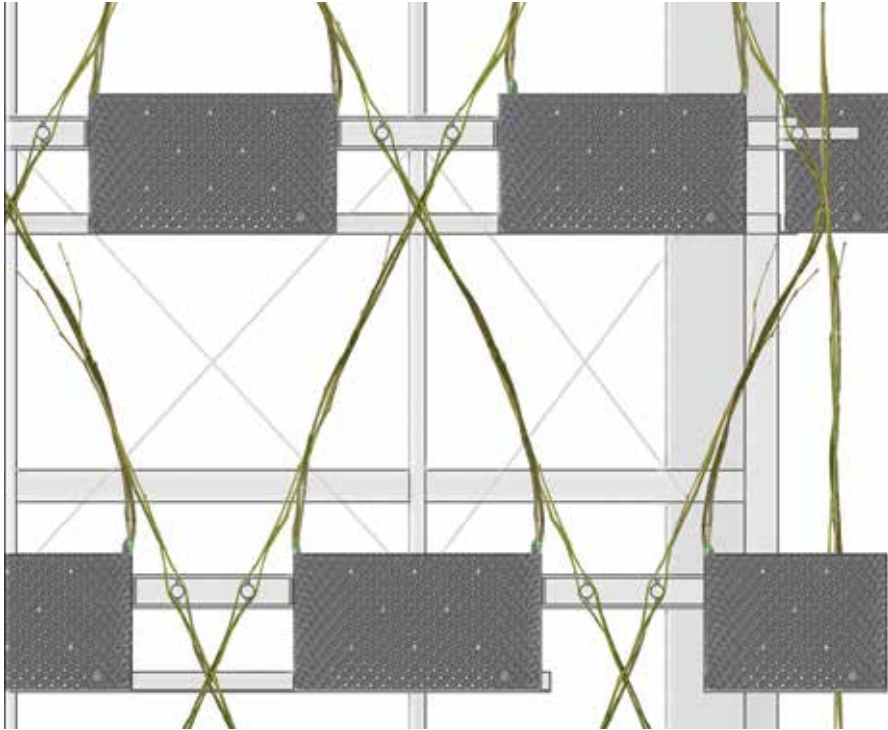
Page de gauche :
Oliver Storz, section
d'un tronc dont
la croissance
secondaire
s'est adaptée
au composant
technique, 2010.

Page de droite :
Ferdinand Ludwig,
Daniel Schönle,
détails de la
structure vivante
pour le cube
de platane, à
l'installation (en
haut) et après
développement (en
bas). La flexibilité
des plants permet
de les enrouler
autour de la
structure support.



Cultiver des éléments de construction ?

En horticulture, la culture de cellules ou de tissus est aujourd'hui utilisée avec succès pour la propagation in vitro de plantes. Elle exploite la capacité d'une cellule de la plante en question à régénérer un organisme entier. Cette technique permet la multiplication de plantes difficiles à reproduire, mais aussi une propagation plus rentable de plantes plus faciles à multiplier.³⁷ Une telle pratique nécessite cependant un environnement stérile, et le passage de la boîte de Pétri au site de construction, du laboratoire à l'échelle 1:1, semble donc difficile à imaginer.²⁸ J'ai contacté par téléphone le Dr Welling, directeur de l'Institut de Recherche du Bois à Hambourg afin de savoir s'il était possible de cultiver in vitro des tissus spécifiques. Si l'on parvient aujourd'hui à reproduire un organisme vivant entier à partir de morceaux de feuilles, de morceaux de racines, de bourgeons, ou de sections de la tige, on ne parvient pas encore produire un seul tissu choisi. Si l'on pouvait effectivement cultiver un tissu sélectionné, on pourrait envisager de faire croître des fibres de bois ou d'autres tissus de la plante. En poussant la réflexion plus loin, on pourrait cultiver des éléments de construction en bois, par exemple des éléments de cambium qui pourraient remplacer les vis lors des connexions Baubotanik et accélérer le processus d'anastomose (idée évoquée avec M. Buttler, je n'ai pas réussi à obtenir de confirmation quant à la faisabilité de cette idée).



La conception
architecturale d'un projet
vivant

L'importance du processus

La question du temps

Dans un projet d'architecture vivante, le processus de conception revêt une importance particulière. Tout d'abord se pose la question du temps, la croissance d'un arbre mettant plusieurs années pour produire un individu mature. Les structures réalisées avec la technique de l'addition des plantes sont soumises à un développement plus long que les bâtiments conventionnels. Néanmoins, cette technique réduit fortement la durée de génération d'un organisme mature par rapport à un arbre isolé. De plus, elle permet d'atteindre la hauteur désirée sans devoir attendre que les plants grandissent suffisamment. Si l'on produit en continu et en grande quantité de jeunes plants adaptés à la technique de l'addition des plantes, alors ceux-ci sont disponibles comme des éléments de construction et le temps de croissance initial n'est plus un problème. Notons aussi que les « chantiers », s'ils sont plus longs, génèrent beaucoup moins de nuisances que les chantiers habituels (bruit, poussière ...).

L'idée est donc de produire un bâtiment hybride, alliant une structure vivante en devenir et une structure support. Grâce à cette dernière, le bâtiment est habitable dès son installation terminée. Au fil du temps, la structure vivante croît et se rigidifie, et reprend les charges jusque-là supportées par la structure support qui peut progressivement être retirée. Ainsi, le temps nécessaire à la stabilisation de la structure vivante n'est pas perdu pour l'exploitation du bâtiment. La conception de la structure support n'est donc pas à négliger, puisqu'elle sera très visible à l'installation et présente pendant plusieurs années. De plus, son retrait doit faire l'objet d'une réflexion attentive. On pourrait imaginer des structures en bois non traitées, qui pourrissent sur le long terme et donc s'auto dégradent. Il faudrait pour cela que les prévisions structurelles puissent être affinées.²

Ferdinand Ludwig, structure support du cube de platane, Nagold. L'importance de la structure de support lors de l'installation n'est pas négligeable.



Une dimension aléatoire

« La construction d'une structure vivante repose sur des principes botaniques de croissance des plantes. Pour cette raison, l'architecte ne doit pas seulement prévoir un plan d'exécution, mais aussi des prévisions de développement ainsi que des concepts de maintenance. Cette manière de penser basée sur le processus change la pratique conventionnelle des architectes, habitués à penser des objets finis et à employer des techniques fournissant des résultats prévisibles. Le fait de penser une structure Baubotanik requiert en effet la volonté d'accepter des facteurs imprévisibles et de les reconnaître comme des opportunités esthétiques. »³⁸

Ces facteurs imprévisibles incluent les conditions de concurrence entre les plantes, les réactions gravimorphes, les attaques par des agents pathogènes ainsi que les intempéries.

Prévisions et scénarios

Une structure Baubotanik nécessite donc dès sa phase de conception des prévisions de scénarios de croissance. Ceux-ci peuvent être estimés au moyen de calculs de biomasse, et en considérant l'espace disponible pour les racines et la couronne, ainsi qu'en analysant les conditions de concurrence entre les plantes.

Considérations budgétaires

En ce qui concerne les considérations budgétaires de la conception d'un tel bâtiment, je m'appuie sur les réflexions du concepteur du Fab Tree Hab, Mitchell Joachim :

« Si en établissant le coût d'une maison on prenait en compte les économies d'énergie et plus abstraitement, la diminution ou la suppression des coûts d'externalité (nuisances environnementales et sanitaires générées par la maison traditionnelle par exemple), alors on concevrait plus de maisons à faible impact environnemental. Plus chère à l'achat, ses bénéfices se font néanmoins ressentir sur le long terme. Cependant, la manière de penser actuelle donne encore trop de valeur aux avantages reçus aujourd'hui par opposition à ceux de demain ou dans cent ans à partir de maintenant. Une représentation valable de la valeur durable peut être atteinte en reconnaissant explicitement les caractéristiques d'adaptation, de renouvellement, de coopération, d'évolution et de longévité de ce type de bâtiment.

Les matériaux nécessaires peuvent avoir un coût similaire à ceux de la construction traditionnelle, néanmoins leur impact total est réduit en raison de leurs qualités locales et naturelles : argile, paille, gravier... Les plantes peuvent être obtenues à partir de graines à prix courant, et les installations de chauffage, ventilation, sanitaire, électricité ne sont pas plus chères qu'en temps normal, et peuvent même être moins coûteuses si des systèmes naturels sont intégrés comme de la ventilation naturelle, l'écoulement de l'eau par gravité, un éclairage naturel et solaire passif. Les coûts d'exploitation supplémentaires ou non traditionnels concernent l'expertise requise au cours de la vie de la maison, notamment la lutte contre les parasites et les maladies, mais aussi l'attitude à adopter en cas d'intempéries. Si le temps écoulé pour atteindre l'habitabilité est supérieur à celui d'une construction traditionnelle, la durabilité de la maison ainsi que la santé de la famille s'en trouvent améliorées.»³⁹

Ces considérations, destinées à son projet de maison individuelle vivante, traduisent un mode de pensée qui s'applique aussi aux structures de plantes vivantes. Notons toutefois que dans le cas d'une structure Baubotanik, il faut prendre en compte le coût de production pour les serres des jeunes plants flexibles, éléments de construction de base du système.

Chapitre 11

Une nouvelle représentation ?

Si le projet vivant apporte une nouvelle manière de concevoir pour l'architecte, ainsi qu'une nouvelle manière d'habiter pour l'utilisateur, alors se pose la question de sa représentation architecturale lors de la conception. Reprenons les 3 premières considérations de l'importance du processus : la question du temps, une dimension aléatoire, prévisions et scénarios.

La question du temps

Il s'agit pour l'architecte de faire savoir quelle temporalité du projet il représente. Le projet n'est effectivement pas le même à son installation, lors de sa croissance (dans le cas d'une structure Baubotanik, il est alors hybride), ou une fois la structure de support retirée. La variation saisonnière est aussi à considérer lors de la représentation. L'architecte peut-il/doit-il représenter toutes ces temporalités en même temps ? L'utilisation d'un média comme la vidéo ou l'animation graphique peut être une des réponses à cette multiplicité des temporalités.

Une dimension aléatoire

Puisque le projet vivant dépend en partie des conditions environnementales, l'architecte ne peut produire un bâtiment fini. Varier l'aspect du projet dans sa représentation peut être une solution pour exprimer les fluctuations possibles. L'architecte peut par exemple proposer des vues différentes incluant des changements potentiels dans la structure vivante (disparition d'un plant, épaisseur variable, forme des troncs changeante) ou dans l'enveloppe (mouvement, saison, année).

Prévisions et scénarios

L'architecte doit aussi profiter de l'expertise de certains botanistes qui utilisent déjà des logiciels de prévision de croissance et de développement, ou d'estimation de biomasse, pour approcher un résultat plausible ou proposer différents scénarios d'évolution. L'interdisciplinarité du projet vivant doit être exploitée jusque dans sa représentation.

Sensibilité

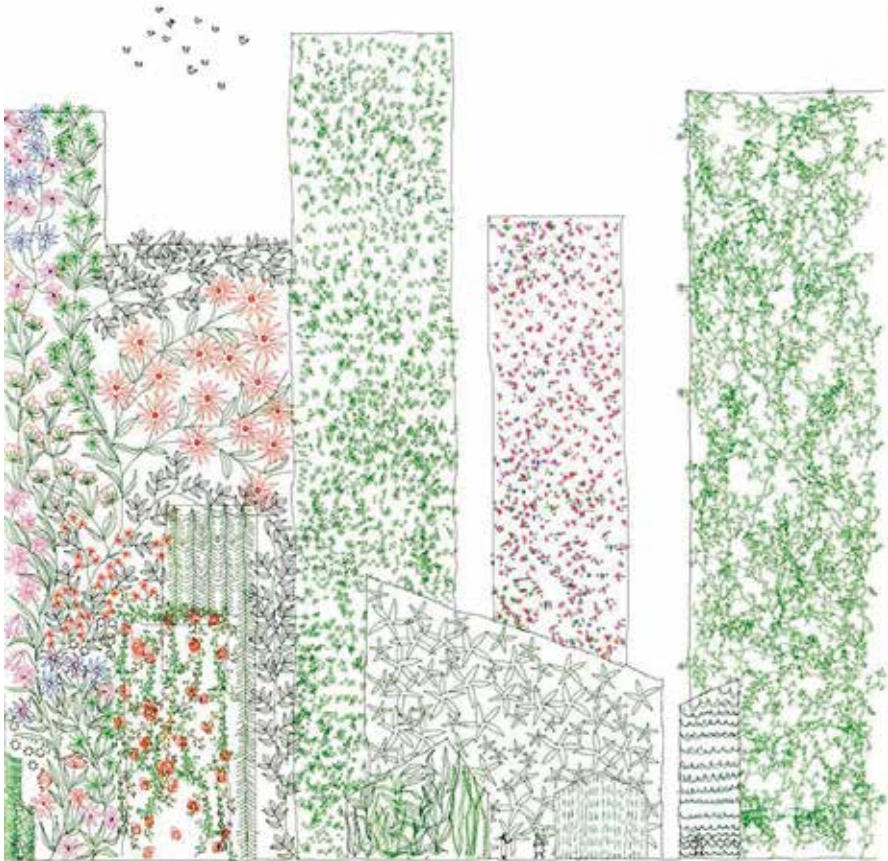
Enfin, je rappelle que l'une des motivations du choix d'une architecture vivante était celle d'une architecture sensible, capable d'émouvoir et de faire réfléchir. Cette dimension doit être intégrée dans la représentation du projet vivant. Je pense par exemple aux dessins fleuris de Jun'Ya Ishigami, intrigants, fascinants et beaux à la fois, ou aux dessins oniriques de Luc Schuiten, qui nous émerveillent lorsqu'on les contemple. La sensibilité de la représentation peut également amener le public à s'intéresser à cette nouvelle forme d'architecture s'il est intrigué ou séduit.

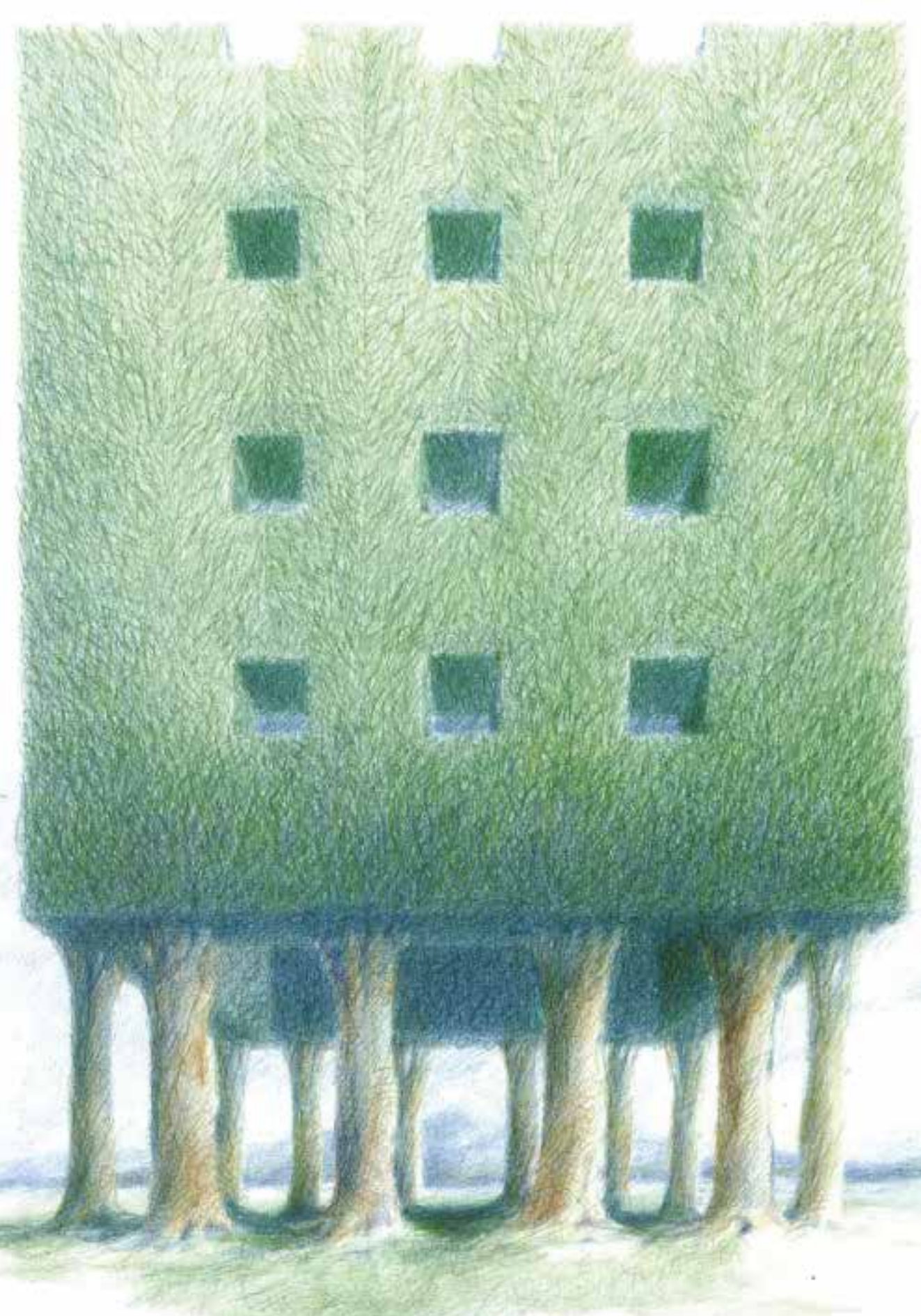
*« L'inclusion de verdure dans mes dessins fait partie d'une recherche d'une nouvelle relation entre l'architecture et le paysage. Dans les dessins, l'architecture devient le paysage et le paysage devient architecture – l'intérieur et l'extérieur se mélangent pour former un nouvel environnement ».*⁴⁰

La représentation du projet vivant comme vecteur d'émotions.

Page de gauche :
Jun'Ya Ishigami.

Page de droite :
Heinz Birg, «Clan
Tower», 1986.





Chapitre 12

Le projet vivant

Variation saisonnière et sur le long terme

Le projet d'architecture vivante ne livre pas un bâtiment achevé. En effet, le bâtiment change d'aspect selon les saisons. Avec une structure de type Bau-botanik, l'hiver l'effet produit est très tectonique, les branches de la structure étant mises à nu. Au printemps et en été, la structure se pare de feuilles, puis de fleurs et de fruits qui viennent orner le système porteur. En automne, les couleurs changeantes animent la façade et transforment l'ambiance perçue. Au fil des ans, les proportions varient en raison de la croissance de la canopée. Mais la croissance en longueur ne s'effectue qu'aux extrémités des pousses les plus jeunes, les plus anciennes ne faisant que s'épaissir (et donc se rigidifier). Ainsi, l'apparence générale (notamment la hauteur des nœuds) est conservée. Cette croissance secondaire en épaisseur se remarque surtout au niveau des connexions avec des éléments de construction traditionnelle, et permet le retrait progressif de la structure initiale servant de support, les charges étant transférées aux plantes vivantes.³⁸

Ces variations n'influencent pas seulement l'aspect de la façade mais aussi les ambiances intérieures, la lumière étant directe ou filtrée par des feuilles, dont les teintes varient selon la saison.

Entretien

De plus, le bâtiment vivant nécessite un entretien particulier, des soins continus afin d'assurer sa longévité et sa vigueur. D'après Bernard Messerli, l'idée est de maintenir le système en phase juvénile, c'est à dire en phase de croissance, par taille régulière et soignée. En se développant, la structure vivante étoffe aussi son système de racines qui doivent avoir assez place et de nutriments (composés azotés) à disposition. Ceux-ci sont en effet essentiels à la production de protéines et donc à la poursuite de la croissance. Finalement, notons que des éléments imprévisibles comme des intempéries, ou des attaques d'éléments pathogènes peuvent entraver la croissance de la structure.

Ouverture : vers un projet d'architecture

Chapitre 13

Projet

Après analyse et compréhension de l'état existant de l'architecture vivante, je peux esquisser les bases de mon projet d'architecture du semestre de printemps. L'idée est de concevoir un bâtiment avec une structure de type Baubotanik ainsi que l'intégration d'un ou plusieurs systèmes d'enveloppe vivante. Pour la structure, comme les adhérences peuvent se produire chez n'importe quelle espèce (mais pas entre deux espèces différentes !), je vais concentrer mon choix sur des espèces à croissance rapide, à l'écorce fine et souple, ayant prouvé leur capacité à fusionner rapidement et facilement. L'espèce la plus adaptée aux connexions par vis est le platane (*Platanus acerifolia*). S'il a démontré être particulièrement adapté pour la construction d'une structure vivante, il peut néanmoins être irritant pour les voies respiratoires s'il est taillé au printemps. M. Messerli m'a suggéré de m'intéresser au Micocoulier *Celtis* qui remplace peu à peu le platane dans les villes, pour son absence de maladie ravageuse connue. Toutefois, je ne dispose pas d'informations concernant son potentiel d'anastomose en utilisant des vis. Après discussion avec M. Schweingruber, le bambou n'est pas retenu malgré sa croissance rapide, pour les mêmes raisons que le Micocoulier. En dépit de sa croissance rapide et sa capacité à former des anastomoses, le saule ne réagit pas bien à l'assemblage par vis. Il peut cependant être utilisé avec des bandes ou des câbles métalliques, mais cela complique la mise en œuvre. Le hêtre et le charme sont deux autres espèces tout à fait adaptées à ce même type de connexion. Le choix du type d'assemblage devra être discuté, les vis assurant la praticité de la mise en œuvre et la rapidité de développement des connexions. La connexion par bandes ou câbles implique une mise en œuvre plus compliquée et plus difficile à gérer sur une structure entière mais ouvre à l'utilisation d'autres espèces.²

Les choix concernant l'enveloppe se feront au cours du développement du projet, ceux-ci devant être en adéquation avec le concept jusque dans le détail de construction, mais aussi le programme choisi. Une attention particulière sera portée à la structure de support initiale, pour son installation mais aussi son retrait, tout en permettant l'habitabilité du bâtiment. Il pourrait par exemple être envisagé de proposer une « boîte habitable » temporaire, retirée en même temps que la structure support une fois la structure vivante stabilisée, avant de reconstruire le programme définitif du bâtiment vivant. Une autre possibilité est celle de concevoir cette boîte habitable qui permettrait le retrait de la structure support.

La réalisation d'un prototype de structure vivante comme maquette de détail peut être envisagée s'il est possible de se procurer de très jeunes plants. Je suis en train d'en faire la recherche auprès de M. Yves Lachavanne, et M. Messerli a quant à lui contacté la pépinière Genolier dont nous sommes en attente d'une réponse.

Le projet cherchera à faire connaître l'architecture vivante en sensibilisant aux possibilités architecturales permises par le vivant.

Chapitre 14

Site

Le site du projet devra correspondre aux exigences de l'espèce structurelle utilisée. En effet, le climat ainsi que le sol du lieu devront être adaptés pour une croissance et une vigueur optimale de l'espèce choisie. De plus, puisque le bâtiment vivant apporte des qualités à son environnement, le site doit aussi démontrer un besoin de ce type d'architecture. Le site choisi devra répondre aux critères suivants :

- Adapté au développement optimal de l'espèce choisie (climat, sol)
- et
- Nécessitant un microclimat
- ou
- Nécessitant un filtrage en eau, une stabilisation du sol ou une dépollution de métaux lourds.

Dans les pages suivantes, une série de cartes illustre la répartition mondiale des espèces utilisables.

Chapitre 15

Programme

Pour l'instant inconnu, le programme du projet s'allie au site et à ses besoins pour bénéficier à son environnement ainsi qu'à ses futurs utilisateurs.

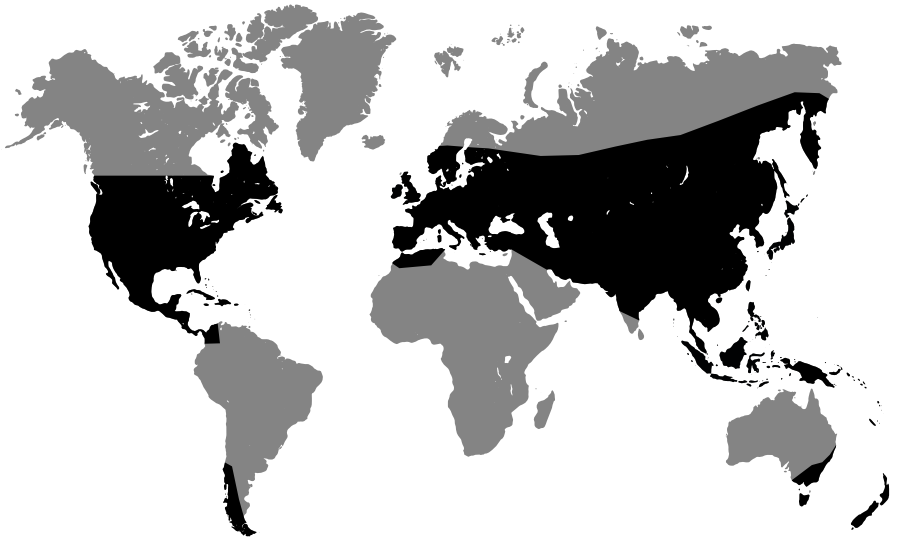


Chloé Joly-Pottuz,
répartition mondiale
des Platanaceae
(platanes), 2018.



Chloé Joly-Pottuz,
répartition mondiale
des Salicaceae
(saules, trembles,
peupliers), 2018.

Chloé Joly-Pottuz,
répartition mondiale
des Fagaceae
(hêtres, chênes,
châtaigniers), 2018.



Chloé Joly-Pottuz,
répartition mondiale
des Betulaceae
(aulnes, charmes,
bouleaux,
noisetiers), 2018.



Chapitre 16

Conclusion

Dans la 1^{ère} partie de cet énoncé théorique ont été exposés les motivations et l'introduction au thème de l'architecture vivante. Architecture sensible, rapprochant le vivant et le construit, elle permet d'envisager le matériau de construction qu'est le bois d'un point de vue biologique, c'est-à-dire vivant. L'architecture vivante se place également comme garante d'une écologie urbaine localisée en générant un microclimat dans son environnement, et invite à une réflexion sur nos modes de vie et de consommation. Elle s'inscrit enfin dans un cursus polytechnique en tant que pratique interdisciplinaire, mettant en relation des experts de domaines différents (architecture, ingénierie civile, botanique...).

L'aperçu culturel et technologique des pratiques de construction avec des plantes vivantes a permis de dresser un état des lieux, en commençant par l'architecture à laquelle la nature est surajoutée, mais non utilisée comme solution constructive ou structurelle. Un tour d'horizon de projets non réalisés démontre que si certains penseurs ont eu des idées visionnaires, la faisabilité n'a pas toujours pu être démontrée, pour certains peut-être en raison d'un manque de connaissances botaniques, pour d'autres simplement parce que ces projets sont des moyens de faire rêver tout en invitant à la réflexion. Ensuite, des réalisations de structures, constructions, ou meubles vivants ont été présentées. Celles-ci nous démontrent les possibilités des plantes vivantes à être mises en forme et assemblées. Néanmoins, seules les recherches du groupe Baubotanik affirment une volonté d'établir des principes constructifs à partir de plantes vivantes.

Enfin, cette première partie a élargi le champ de la construction vivante à d'autres organismes vivants que les plantes, ainsi qu'à d'autres applications que la structure d'un bâtiment. Elle regroupe des projets non réalisés, (aménagements marins, éclairage, urbanisme durable) et des applications au stade de prototypes ou déjà réalisées, notamment des solutions constructives et énergétiques pour des façades (biomatériaux, innovations pour la protection du bois).

La seconde partie a cherché à comprendre la plante en tant que matériau de construction vivant. Pour ce faire, des principes élémentaires de botanique nécessaires à la compréhension de sa croissance et de son comportement dans la nature ont été étudiés. Les paramètres permettant d'influencer le développement d'une plante vivante ont aussi été abordés : modifications génétiques, hormonales ou des facteurs environnementaux, en vue de produire des plantes en tant qu'éléments de construction. Les résultats obtenus par le groupe Baubotanik lors de leurs essais de production ont ensuite été indiqués, afin d'obtenir une vision précise des possibilités mécaniques du matériau « plante vivante ». Cette partie a permis de comprendre que l'on peut influencer la croissance des plantes en modifiant la composition de la lumière qu'elles reçoivent. En simulant une situation de concurrence, leur croissance est augmentée, et elles poussent en tiges minces et très flexibles, utilisables pour la conception d'une structure vivante.

Les technologies de construction d'une architecture vivante ont ensuite été explorées, dans un souci de faisabilité. Ce sont tout d'abord la conception et la réalisation d'une structure de type Baubotanik qui ont été détaillées. Une telle structure repose sur le phénomène naturel d'anastomose, qui permet à deux plantes vivantes de fusionner en un seul organisme. Après explication de ce phénomène et brève description des techniques horticoles de greffes, le moyen de provoquer ces adhérences de manière artificielle a été décrit. En vissant de jeunes plants entre eux, il est en effet possible de les forcer à fusionner tout en formant la structure désirée. Celle-ci doit cependant profiter lors de son développement d'une structure support et d'un apport en eau et en nutriments suffisants.

La recherche s'est ensuite concentrée sur l'enveloppe architecturale et son rôle, ainsi que les nouvelles solutions constructives permises par le vivant pour celle-ci. L'émergence de biomatériaux générés par le vivant et l'utilisation de biomasse produite par des microorganismes comme des algues sont des innovations dans la thématique de l'architecture vivante, exploitables pour son enveloppe.

Le détail de connexion entre la structure vivante et des éléments de construction plus traditionnels poursuit l'observation, en mettant en évidence la croissance secondaire de la plante vivante qui lui permet de produire plus de matière au niveau d'un point de contact où s'exercent des forces extérieures. La question d'une possible culture in vitro d'éléments de construction en produisant des tissus spécifiques du bois a été abordée. Il semble que l'état actuel des connaissances ne permette cependant pas une telle manipulation, qui trouverait pourtant de nombreuses applications.

La seconde partie se termine avec une réflexion sur le rôle de l'architecte dans la conception d'un projet vivant. La question du temps reste un point critique, le projet vivant n'étant pas un objet terminé à sa livraison. Hybride, son utilisation est néanmoins permise dans le laps de temps nécessaire à la stabilisation de la structure. La dimension aléatoire du projet vivant est à exploiter en tant qu'opportunité, en considérant les moyens utilisables pour obtenir des prévisions, comme les logiciels de calcul de biomasse et de simulation de croissance par exemple. Les considérations budgétaires évoluent elles aussi lors de ce nouveau processus de conception et nécessitent un changement de mode de pensée.

La question de la représentation est ensuite abordée, le projet vivant possédant des temporalités multiples et cette dimension aléatoire étant à considérer. La représentation comme vecteur d'une architecture sensible est aussi à prendre en compte. Elle reste cependant un élément qui sera réellement éprouvé lors du semestre de printemps. Il est pour l'instant difficile de prédire quelle sera la meilleure méthode à utiliser selon le projet proposé. Les pistes retenues intègrent des simulations ou l'utilisation d'animations. Toutefois, on peut affirmer que des représentations lors de différentes saisons ainsi que selon les années sont nécessaires pour une compréhension du projet en perpétuelle évolution. Pour terminer, le projet vivant est décrit comme changeant, selon les saisons puis les années. Il nécessite donc un entretien particulier et continu pour garantir sa survie et son développement.

La dernière partie constitue l'introduction au projet d'architecture qui sera développé au semestre de printemps. Constitué d'une structure Baubotanik, il cherchera à intégrer d'autres éléments de construction vivante, notamment dans son enveloppe. Les espèces végétales retenues pour la structure sont le platane, le saule, le hêtre et le charme. Le platane est particulièrement adapté aux connexions par vis alors que le saule réagit mieux lorsqu'il est assemblé avec des bandes ou des câbles métalliques, ce qui marche aussi très bien pour le hêtre et le charme. Le type de connexion à utiliser est donc à discuter. Le choix final de l'espèce déterminera le site choisi, qui devra présenter un besoin pour une architecture vivante et permettre aux arbres de croître convenablement. Le site permettra d'amorcer la réflexion sur le programme, pour l'instant inconnu. La réalisation d'une maquette vivante est envisagée, si je parviens à me procurer de très jeunes plants d'une des espèces précédemment citées.

Chapitre 17

Remerciements

Je tiens à remercier le Professeur Yves Weinand pour son intérêt pour le sujet choisi et pour son suivi qui m'a motivée tout au long du semestre. Je remercie également le Professeur Alexandre Buttler pour ses précisions éclairantes, son enthousiasme et son aide pour rencontrer des spécialistes. Merci à M. Bernard Messerli pour son accueil chaleureux et ses connaissances très utiles. Merci à M. Schweingruber pour son expertise botanique. Merci au Dr. Welling pour ses précisions. Merci également au Professeur Antoine Picon d'avoir pris le temps de commenter le début de mon travail. Merci à M. Yves Lachavanne pour son aide dans la recherche de jeunes plants et l'intérêt porté à mon travail. Merci aussi à Sacha Favre et Didier Callot pour leurs remarques avisées.

Enfin, je tiens à remercier Anaïs Racine, dont les commentaires et conseils m'ont aidée à avancer durant le semestre. Merci aussi à mes parents et ma sœur, et plus généralement ma famille, qui m'encourage et m'accompagne depuis le début de mes études. Merci également à Norbert pour ses précieux conseils et son soutien inestimable.

Bibliographie

1. Stiftung zur Förderung der Internationalen Kooperation in Wissenschaft und Bildung. Daidalos: Berlin architectural journal : Architektur, Kunst, Kultur : architecture, art, culture. Berlin : Scholz; 1981.
2. Ludwig F. Botanische Grundlagen der Baubotanik und deren Anwendung im Entwurf [Thèse de doctorat]. Stuttgart : Universität Stuttgart; 2012.
3. [En ligne]. Wood Material Science; [cité le 23 nov 2017]. Disponible: <http://www.ifb.ethz.ch/research/research-wood-material-science.html>
4. Fratzl P. Materials design inspired by nature: function through inner architecture. Cambridge : Royal Society of Chemistry; 2013. 402 p. (RSC smart materials; vol. no. 4).
5. Interview « Pour une ville nouvelle végétale et résiliente » [En ligne]. 2015 [cité le 21 déc 2017]. 472 seconds. Disponible: <http://www.vegetalcity.net/topics/interview-pour-une-ville-nouvelle-vegetale-et-resiliente/>
6. Sedlbauer K, Schunck E, Barthel R, Künzel HM. Flat Roof Construction Manual: Materials, Design, Applications. Walter de Gruyter; 2010. 210 p.
7. Le Corbusier. Almanach d'architecture moderne: documents - théories - pronostics - histoire - petites histoires - dates - propos standards - organisation - industrialisation du bâtiment. Facs.de l'éd.1925. Torino : Bottega d'Erasmus; 1975. 200 p. (Fonti sull'architettura e sull'urbanistic; vol. 2).
8. Myers W. Bio design: nature, science, creativity. London : Thames & Hudson; 2012. 288 p.
9. [En ligne]. burckhardtpartner. Nouveau MFO-Park, Zurich; [cité le 21 déc 2017]. Disponible: <http://burckhardtpartner.com/fr/projets/detail/projekte/show/Projekte/neubau-mfo-park-zuerich/>
10. Laugier MA. Essai sur l'architecture ; Dictionnaire des termes de l'architecture. [fac. de la nouv. éd.] 1755. Genève : Minkoff Reprint; 1972. 316 p.
11. Wiechula A. Wachsende Häuser: aus lebenden Bäumen entstehend. Berlin : Verlag Naturbau-Gesellschaft; 1926. 320 p.

12. Doernach R. Pflanzenhäuser: Biotektur : Leben im Naturklima. Altstätten [etc. : Panorama-Verlag; 1987. 187 p.
13. Taschen A, Fürst AC, Hundertwasser F. Hundertwasser: Architektur : für ein natur- und menschengerechteres Bauen. Köln : Taschen; 2011. 317 p.
14. Schuiten L, Loze P, Chapelle G. Vers une cité végétale. Wavre : Mardaga; 2010. 164 p.
15. vegetalcity [En ligne]. Schuiten L. Arte Sella; [cité le 4 janv 2018]. Disponible: <http://www.vegetalcity.net/topics/arte-sella/>
16. Hall J. Essay on the origin, history, and principles, of Gothic architecture [En ligne]. 1813 [cité le 3 nov 2017]. Disponible: <https://archive.org/details/essayonoriginhis00hall>
17. [En ligne]. Génie Végétal - Conseils et fournitures en bio-ingénierie Présentation et contacts; [cité le 27 déc 2017]. Disponible: <http://www.genie-vegetal.eu/>
18. Arborsmith Studios [En ligne]. Reames R. Arborsculpture; [cité le 22 déc 2017]. Disponible: <http://www.arborsmith.com/>
19. Kirsch K. Naturbauten aus lebenden Gehölzen. Xanten : OLV Organischer Landbau Verlag Lau; 1996. 112 p.
20. Kalberer M, Remann M. Das Weidenbaubuch: die Kunst, lebende Bauwerke zu gestalten. 4. Aufl. Aarau : AT-Verlag; 2004. 128 p.
21. Ludwig F, Schwertfeger H, Storz O. Living Systems: Designing Growth in Baubotanik. Archit Des. 2012;82(2):82–87.
22. baubotanik.org IGMA Universität Stuttgart [En ligne]. IGMA. baubotanik.org; [cité le 5 janv 2018]. Disponible: <http://www.baubotanik.org/>
23. Austin Jarvis [En ligne]. Austin J. Carbon 2065; [cité le 5 janv 2018]. Disponible: <http://www.austinjarv.is/carbon2065-0pnd>
24. ETH Zürich Future Cities Laboratory [En ligne]. FCL. Mycelium-based composite materials; [cité le 5 janv 2018]. Disponible: <http://www.fcl.ethz.ch/research/archipelago-cities/alternative-construction-materials/mycelium.html>

25. Bioplastique. Dans: Wikipédia [En ligne]. 2017 [cité le 5 janv 2018]. Disponible: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Bioplastique&oldid=136993980>
26. Guo H, Fuchs P, Cabane E, Michen B, Hagedorfer H, Romanyuk YE, et al. UV-protection of wood surfaces by controlled morphology fine-tuning of ZnO nanostructures. *Holzforschung*. 2016;70(8):699–708.
27. Ludwig F, Schönle D. Designing with living Material. Dans: Lösckke SK. *Materiality and architecture*. London : Routledge; 2016.
28. Bruyn G de, Ludwig F, Schwertfreger H. *Lebende Bauten - trainierbare Tragwerke*. Berlin : Lit; 2009. 202 p. (Kultur und Technik; vol. Band 16).
29. Figuier étrangleur. Dans: Wikipédia [En ligne]. 2017 [cité le 29 déc 2017]. Disponible: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Figuier_%C3%A9trangleur&oldid=141746535
30. Fladung M, Ewald D. *Tree transgenesis: recent developments* [En ligne]. Berlin : Springer; 2006 [cité le 20 nov 2017]. Disponible: http://sfx.ethz.ch/sfx_locator?sid=ALEPH:EBI01&genre=book&isbn=978-3-540-32198-9&id=doi:10.1007/3-540-32199-3
31. Ludwig F, de Bruyn G, Thielen M, Speck T. Plant stems as building material for living plant constructions. *Proc 6th Plant Biomech Conf*. 2009;398-405.
32. Vittone R. *Bâtir: manuel de la construction*. 2e éd. entièrement revue et augm. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes; 2010. 1015 p.
33. Arup. BIQ House [En ligne]. 2013 [cité le 3 janv 2018]. 319 secondes. Disponible: [https://cdnapisec.kaltura.com/html5/html5lib/v2.58.1/mwEmbedFrame.php/p/529921/uiconf_id/38407421/entry_id/1_rbsfiiu7?wid=_529921&iframeembed=true&playerId=kVideoTarget&entry_id=1_rbsfiiu7&flashvars\[autoplay\]=false](https://cdnapisec.kaltura.com/html5/html5lib/v2.58.1/mwEmbedFrame.php/p/529921/uiconf_id/38407421/entry_id/1_rbsfiiu7?wid=_529921&iframeembed=true&playerId=kVideoTarget&entry_id=1_rbsfiiu7&flashvars[autoplay]=false)
34. Arup [En ligne]. Arup. SolarLeaf; [cité le 3 janv 2018]. Disponible: <http://www.arup.com/en/projects/s/solarleaf>
35. IAGS [En ligne]. Santosuosso G. ALGAEbuilding research; [cité le 3 janv 2018]. Disponible: <https://iags.carbonmade.com/projects/2851262>

36. Schuiten L, Loze P. Archiborescence. Liège : Mardaga; 2006. 162 p.
37. Tissue culture of woody plants [En ligne]. Lineberger RD. Woody Plant Tissue Culture; [cité le 4 janv 2018]. Disponible: <https://aggie-horticulture.tamu.edu/tisscult/Microprop/woodypl.html>
38. Löschke SK. Materiality and architecture. London : Routledge; 2016.
39. Mitchell Joachim Terreform 1 [En ligne]. Mitchell J. Fab Tree Hab Living Tree House; [cité le 5 janv 2018]. Disponible: <http://www.archinode.com/fab-tree-hab-9.html>
40. FMG Fabbrica Marmi e Graniti. Architecture As A Piece Of Nature March 2011 @ SpazioFMG Milan [En ligne]. [cité le 8 janv 2018]. 763 seconds. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=YGa3pIMMzFc>

Bibliographie : pour aller plus loin

1. Mudge K, Janick J, Scofield S, Goldschmidt EE. A History of Grafting. Dans: Janick J, rédacteur. Horticultural Reviews [En ligne]. John Wiley & Sons, Inc.; 2009 [cité le 5 janv 2018]. p. 43793. Disponible: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470593776.ch9/summary>
2. Armstrong R, Michałowicz M. Vibrant architecture: matter as a code-signer of living structures. Warsaw : De Gruyter Open; 2015. 370 p.
3. El-Khoury R, Marcopoulos C, Moukheiber C. The living, breathing, thinking, responsive buildings of the future. London : Thames & Hudson; 2012. 291 p.
4. Ludwig F. Baubotanik - Designing Growth Processes. 2014.

Crédits des illustrations

Image de couverture : Leader

© Bryan Nash Gill

source : Bryan Nash Gill , <http://www.bryannashgill.com/woodcuts/> (consulté le 8 janvier 2018)

page 20 : La « cabane » primitive

source : MarcAntoine Laugier, Essai sur l'architecture, 1755.

page 20 : La « hutte » primitive

source : Eugène Viollet-le-Dic, Histoire de l'habitation humaine depuis les temps préhistoriques jusqu'à nos jours, 1875.

page 21 : Arthur Wiechula, Ecurie sur un paddock et Lieu de travail avec puits de lumière

© 4. Edition 2012 OLV Organischer Landbau Verlag

source : Konstantin Kirsch, Naturbauten aus lebenden Gehölzen, 1996, p19, p30.

page 23 : Hundertwasser, Baummieter

© 2011 Namida AG

source : Angelika Taschen, Andrea Christa Fürst, Hundertwasser: Architektur : für ein natur- und menschengerechteres Bauen, 2011, p67.

page 25 : Projets pour la cité des Habitarbres

© 2006 Editions Mardaga

source : Luc Schuiten, Pierre Loze, Archiborescence, 2006, p113.

page 26 : Processus de développement du Fab Tree Hab

© 2008 Mitchell Joachim GNU Free Documentation License

source : <http://www.archinode.com/fab-tree-hab.html> (consulté le 7 janvier 2018)

page 27 : Pont vivant à 2 niveaux au-dessus de la rivière Umshiang

© Lambert Shadap

source : William Myers, Bio design: nature, science, creativity, 2012, p31

page 28 : « Tanzlinden » à Hilgershausen

© R. Graefe

source : Daidalos: Berlin architectural journal : Architektur, Kunst, Kultur n°23, 1981, p18.

page 31 : Sir James Hall, Cathédrale de saule, 1794

source : James Hall, Essay on the origin, history, and principles of Gothic architecture, 1813, p1.

page 32 : Techniques de génie végétal par tressage de saule

© Aqua Terra Solutions

source : <http://www.genie-vegetal.eu/page/55/4-5--tressage-de-saule.htm> (consulté le 7 janvier 2018).

page 34 : Marcel Kalberer, processus de croissance du Palais de Saule, 1998

©1999, AT Verlag

source : Marcel Kalberer, Micky Remann Das Weidenbaubuch: die Kunst, lebende Bauwerke zu gestalten, 2004, p118

page 36 : Cube de platane, Nagold. Visualisations après installation (gauche), en période de croissance (milieu) et après 15 ans (droite), 2011

© Ferdinand Ludwig

source : Ferdinand Ludwig, BAUBOTANIK - Designing Growth Processes, 2014, p11.

page 36 : Ferdinand Ludwig, Cornelius Hackenbracht. Baubotanik tower après réalisation (gauche), en croissance (milieu), et maquette de la structure autoportante (droite), 2009

© Boris Miklatusch

source : Ferdinand Ludwig, BAUBOTANIK - Designing Growth Processes, 2014, p10.

page 36 : Ferdinand Ludwig, Oliver Storz, Baubotanischer Steg, 2005.

© C. Moro

source : <https://www.german-architects.com/wd/architecture-news/hauptbeitrag/in-neuer-gesellschaft> (consulté le 7 janvier 2018)

page 47 : Processus de développement d'arbres tressés basés sur la croissance du figuier étrangleur

© 2010 Editions Mardaga

source : Luc Schuiten, Pierre Loze, Vers une cité végétale, 2010, p99.

page 52 : Surexpression génétique et hormonale et leurs effets sur des arbres transgéniques.

trees, 2006

© 2018, Chloé Joly-Pottuz, traduction et mise en forme d'après :

© 2006 Springer-Verlag

source : Matthias Fladung, Dietrich Ewald, Tree transgenesis: recent developments, 2006, p130.

page 53 : Simulation de situation de concurrence par modification de la composition spectrale de la lumière reçue

© Ferdinand Ludwig

source : Proceedings of the Sixth Plant Biomechanics Conference November 16th – 21st, 2009.

page 58 : Anastomose de 2 branches (*Castanea sativa*), 2008

© 2008 Springer-Verlag

source : Fritz Hans Schweingruber, Annett Börner, Ernst-Detlef Schulze, Atlas of woody plant stems: evolution, structure, and environmental modifications, 2008, p172.

page 60 : croquis explicatif initial de l'addition des plantes

© Ferdinand Ludwig

source : Ferdinand Ludwig, Botanische Grundlagen der Baubotanik und deren Anwendung im Entwurf, 2012, p61.

page 60 : bois soudé par anastomose (aulne)

© Ferdinand Ludwig

source : Ferdinand Ludwig, Botanische Grundlagen der Baubotanik und deren Anwendung im Entwurf, 2012, p164.

page 60 : Coupe à travers deux tiges assemblées en parallèle

© Ferdinand Ludwig

source : Ferdinand Ludwig, Botanische Grundlagen der Baubotanik und deren Anwendung im Entwurf, 2012, p145.

page 64 : ALGAEbuilding research

© 2016 iaGS

source : <https://iags.carbonmade.com/projects/2851262> (consulté le 7 janvier 2018).

page 65 : Joachim Mitchell, coupe constructive du Fab Tree Hab.

© 2008 Mitchell Joachim GNU Free Documentation License

source : <http://www.archinode.com/fab-tree-hab-6.html> (consulté le 7 janvier 2018)

page 65 : Façade algue de la BIQ House, Hamburg, 2013

© SPLITTERWERK

source : <file:///Users/Chloe/Zotero/storage/7XE8J5FQ/biq-algae-house-splitterwerk.html>, (consulté le 7 janvier 2018)

page 67 : coupe constructive pour l'habitat bambou

© 2010 Editions Mardaga

source : Luc Schuiten, Pierre Loze, Vers une cité végétale, 2010, p65.

page 69 : Détails de connexion de la main courante du Baubotanischer Steg

© Ferdinand Ludwig

source : Ferdinand Ludwig, Botanische Grundlagen der Baubotanik und deren Anwendung im Entwurf, 2012, p17.

page 70 : Oliver Storz, croissance secondaire et adaptation, 2010

© 2010 Oliver Storz

source : Ferdinand Ludwig, Hannes Schwertfreger, Oliver Storz, Living Systems: Designing Growth in Baubotanik, p84.

pages 71, 76 : détails de la structure vivante pour le cube de platane, à l'installation et après développement et structure support du cube de platane, Nagold.

© Ferdinand Ludwig, Daniel Schnöde

source : <http://www.baubotanik.org/de/bauten/kubus/> (consulté le 7 janvier 2017).

page 80 : Jun'Ya Ishigami

© Jun'Ya Ishigami

source : Jun'Ya Ishigami, Small images, 2008.

page 81 : Heinz Birg, «Clan Tower», 1986

© Heinz Birg

source : Daidalos: Berlin architectural journal : Architektur, Kunst, Kultur n°23, 1981, p27.

pages 89, 90 : cartes de répartition mondiale des Platanaceae, Salicaceae, Fagaceae, Betulaceae

© Chloé Joly-Pottuz

D'après : Vernon H. Heywood, Les plantes à fleurs : 306 familles de la flore mondiale, 1996, (prêté par M. Messerli), pages 56, 59, 60, 118.

