



UNIVERSITÉ
LUMIÈRE
LYON 2

N° d'ordre NNT : 2018LYSE2022

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de

L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

École Doctorale : ED 483 Sciences sociales

Discipline : Architecture

Soutenue publiquement le 31 janvier 2018, par :

Benjamin RILEY

Concrete living walls / Murs en béton vivant

Devant le jury composé de :

Marc ANGELIL, Professeur d'université, ETH ZURICH, Président

Sophie NADOT, Professeure des universités, Université Paris 11, Rapporteure

Kimberly KURTIS, Professeure, GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Rapporteure

Sabine CHARDONNET DARMAILLACQ, Maître-assistant École d'Architecture, École d'architecture de Paris-Malaquais

Patrick BLANC, Chargé de recherche, C.N.R.S ; Examineur

François FLEURY, Professeur des Écoles d'architecture, École Nationale Supérieure d'architecture – Marne la Vallée, Directeur de thèse

Valéry MALECOT, Maître de conférences, AGROCAMPUS OUEST, Co-Directeur de thèse

François DE LARRARD, EXPERT, Co-Directeur de thèse

Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « [Paternité – pas d'utilisation commerciale – pas de modification](#) » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

Université Lumière Lyon 2
École doctorale Sciences Sociales
École Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon
Laboratoire MAP-Aria UMR CNRS-MCC 3495

Résumé long de la thèse en français

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Lumière Lyon 2

en

Architecture

Murs en béton vivant

Présentée par :

Benjamin Riley

Laboratoire MAP-Aria UMR CNRS-MCC 3495

Sous la direction de :

François Fleury
François de Larrard
Valéry Malecot

Présentée et soutenue publiquement le 31 janvier 2018

Composition du jury :

François Fleury, Directeur de thèse, Professeur, ÉNSA Normandie

François de Larrard, Co-directeur de thèse, Directeur Scientifique, LCR - LafargeHolcim

Valéry Malecot, Co-directeur de thèse, Professeur, Centre INRA Angers-Nantes

Kim Kurtis, Rapportrice, Professeur, Georgia Tech

Sophie Nadot, Rapportrice, Professeur, Université Paris-Sud

Sabine Chardonnet Darmaillacq, Rapportrice, Professeur, ÉNSA Paris-Malaquais

Marc Angéllil, Examineur, Professeur, ETH Zurich

Patrick Blanc, Examineur, Botaniste et chercheur, CNRS

François Fleury
Directeur de thèse

Benjamin Riley

François de Larrard
Co-directeur de thèse

Valéry Malecot
Co-directeur de thèse

Résumé long en français

F.1. Résultats et résumé des analyses

Un système de construction peut-il avoir un impact international sur l'atténuation des effets de la surpopulation, du changement climatique et du manque de nature ? Dès le départ, le but de cette thèse était de développer un système de mur vivant qui soit soutenable, écologiquement approprié, non contraint par la localisation et la typologie du bâtiment, et plus abordable que les systèmes actuellement disponibles. Les villes confrontées à la surpopulation dans un climat changeant ont besoin de solutions pratiques pour répondre aux besoins biophiliques, sanitaires et sécuritaires des citoyens. La raison pour laquelle le béton a été choisi comme support pour un tel système n'a rien à voir avec un goût personnel pour le matériau. L'hypothèse de l'adéquation du béton dans cette thèse est directement issue de ses caractéristiques de durabilité, de coût et d'ubiquité. Ce n'est peut-être pas le seul choix, mais c'est actuellement le choix matériel le plus réaliste pour étendre de manière significative la composante de la nature comme troisième dimension du milieu urbain.

L'évaluation de l'hypothèse nécessitait une approche interdisciplinaire mariant la botanique, la science des matériaux et l'architecture. Nous avons répondu à la question principale de cette thèse en matière de botanique et de sciences des matériaux : le béton peut être utilisé comme un médium de croissance pour la vie végétale. Nous avons répondu à la question de la botanique en identifiant des plantes capables de pousser dans un environnement cimentaire et de vivre dans un environnement non naturel (c'est-à-dire vertical). La réponse à la partie sciences des matériaux du questionnement a nécessité la reformulation de la composition du béton afin que la vie végétale soit possible. Elle a également nécessité la création d'une nouvelle méthodologie de construction. La question architecturale sous-jacente de cette thèse est la suivante : le béton vivant a-t-il un sens en architecture et comment l'architecture peut-elle tirer profit d'un tel matériau ? Évaluer ces possibilités a demandé d'étudier les effets architecturaux d'un nouveau système constructif, destiné à jouer un rôle écologiquement actif, sur cinq échelles architecturales différentes, afin d'observer comment il interagit : matériellement, systémiquement, spatialement, formellement / expérimentalement au niveau du bâtiment, et symbiotiquement au niveau du quartier. Aborder toutes ces questions a exigé une recherche simultanée dans les trois disciplines de l'architecture, de la botanique et de la science de la matière. En effet, les réponses dans chacune de ces disciplines ont modifié le cours de l'action des deux autres. Cependant, l'ensemble de la thèse reposait initialement sur la résolution de la question du matériau. Sans matière, il n'y a pas d'architecture. Le début de l'approche méthodologique par la recherche sur les questions problématiques portant sur la botanique et la matière signifie que l'essentiel du travail architectural intervient après la validation des résultats botaniques et physiques. Toutefois, l'objectif architectural est resté majeur tout au long de la recherche.

Cette thèse a été divisée en cinq parties dont chacune est résumée ci-après. La structure de la thèse pose les questions dont les réponses confortent l'hypothèse principale : grâce notamment à leur faible coût, les systèmes de murs vivants en béton peuvent apporter davantage de nature dans les villes afin d'exploiter des surfaces sous-utilisées ; et, ce faisant, jouent un rôle dans l'amélioration des problèmes urbains tels que la surpopulation dans le contexte de changement climatique et contribuent simultanément à répondre à notre besoin intrinsèque de contact étroit avec le milieu naturel.

F.1.1. Partie I : Contexte et problématique

La première partie de cette thèse explore le contexte et la problématique ayant abouti à la nouvelle proposition de système de mur en béton vivant. Le premier chapitre se concentre sur les facteurs sociétaux qui sous-tendent la thèse ; principalement des questions globales normalement considérées au-delà de la compétence des architectes, une perception que le premier chapitre tente de modifier. Le deuxième chapitre est centré sur les aspects scientifiques qui motivent l'hypothèse, c'est-à-dire sur les réponses aux principales critiques des systèmes de murs vivants actuels, élucidées pour justifier les fondements de notre hypothèse. Ce chapitre répond également à l'une des deux pierres d'achoppement majeures de cette thèse : les murs vivants irrigués peuvent-ils même être écoresponsable ? Par la suite, le chapitre trois se concentre sur les facteurs matériels à l'origine de la thèse. Et comme le titre l'indique explicitement, il s'agissait d'une thèse fondée sur le matériau ayant pour base un médium de plus en plus désapprouvé du fait de son impact négatif sur l'environnement planétaire. Il s'agit là de la deuxième pierre d'achoppement de cette thèse à laquelle le troisième chapitre répond : jusqu'à quel point le béton peut-il être écologique ? Avant d'aborder plus largement le contexte et la problématique qui ont inspiré cette thèse, nous établirons une brève définition des murs vivants ainsi qu'un aperçu des précédents des murs en béton afin de justifier ces trois mots : béton, vivant et murs.

Surpopulation dans les changements climatiques

Accueillir des populations en nombres inconcevables il y a 100 ans sous la pression nouvelle du changement climatique rendra critiques nos besoins et liens intrinsèques avec la nature : la conception biophilique est cruciale pour notre santé et notre bien-être et, simultanément, le recours massif aux plantes peut atténuer le changement climatique global en réduisant l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Le premier chapitre affirme que si les murs verts doivent jouer un rôle positif pour faire face aux trois défis les plus pressants des villes contemporaines - surpeuplement, changement climatique et accès à la nature - ils doivent être conçus et construits en vue de répondre aux exigences d'une ville durable, c'est-à-dire qu'ils doivent être en mesure de satisfaire les besoins sociaux, environnementaux et économiques de leurs environnements urbains. Cependant, l'impact des murs végétalisés sur une ville peut être multidimensionnel et multi-scalaire, ainsi leurs avantages chevauchent au moins deux de ces trois domaines. Les murs verts ont un impact sur leur environnement local et peuvent avoir un impact contextuel plus large sur le réseau urbain dans lequel ils s'inscrivent. De plus, si les murs verts doivent être construits en béton, il est alors nécessaire d'en mesurer les impacts environnementaux et de prédire les typologies de bâtiments qui pourraient bénéficier de leur emploi.

Afin de bien cerner les enjeux, le premier chapitre montre comment l'influence de la densité urbaine sur les villes conduit les urbanistes, gestionnaires, architectes, ingénieurs et paysagistes à choisir les solutions de développement appropriées pour rendre les villes le plus vivable possible. Les dernières théories de modélisation statistique examinées montrent clairement que le contrôle du développement réussi d'une ville est beaucoup plus complexe et indépendant que ce qui est traditionnellement compris. Il est principalement gouverné par des réseaux sociaux et économiques complexes et diffus prospérant et s'intensifiant avec la densification urbaine. Mieux nous comprenons où et comment la densification urbaine a lieu, mieux les concepteurs, planificateurs et gestionnaires du paysage urbain sont à même d'avoir une influence. Comprendre comment la densité peut être organisée pour minimiser la consommation d'énergie peut considérablement réduire la quantité de gaz à effet de serre produite par les villes, réduisant également leur impact sur le changement climatique mondial. À l'échelle locale, les innovations aidant les bâtiments à s'adapter aux changements climatiques à long terme jouent un rôle en évitant le gaspillage des ressources dépensées pour des rénovations ou des adaptations et se traduisent par des bâtiments d'une durée de vie de plusieurs générations, sans dépenses majeures ; la longévité étant un type de conservation de ressources. Les bâtiments adaptés à leurs environnements aux niveaux matériel, systémique, formel et réticulaire permettent plus de contrôle par les citoyens grâce à la possibilité de mitiger de manière passive les effets du changement climatique ou de participer activement à son amélioration.

Murs vivants: leçons apprises

Le chapitre 2 vise à aider les architectes, les concepteurs, les constructeurs et les propriétaires se tournant vers les murs vivants et contraints à passer au crible des informations parfois contradictoires. Par exemple, il arrive que les études de cas transmettent des données techniques sans aborder les stratégies de

conception formelles les plus instructives. L'écueil en est que si l'on ignore les adaptations de la forme qu'un système requiert, le risque est de copier strictement les détails de construction qui peuvent conduire à une mise en œuvre inadaptée au nouveau contexte. Dans le cas des murs vivants, le danger est encore plus conséquent qu'avec d'autres systèmes constructifs en raison de la nécessité d'entretenir le vivant sur le projet architectural ; projet dont les facteurs environnementaux sont rarement, voire jamais, reproductibles. Ces facteurs environnementaux et micro-environnementaux peuvent avoir autant d'importance que les détails de conception technique pour déterminer le succès d'un mur vivant.

Par exemple, les facteurs environnementaux varient d'un point à un autre de la surface d'un mur [1]. Les différences microclimatiques entraînent potentiellement des conditions fluctuantes de chaleur et d'humidité ou de variance dans les contraintes de vent aux extrémités, les coins et les sommets des murs vivants. Les différences microclimatiques peuvent affecter les espèces végétales qui poussent avec succès dans une zone donnée et avoir des difficultés à prospérer ailleurs sur le même mur ou le même bâtiment

Le chapitre 2 utilise les leçons tirées des études de cas sur le terrain dans le monde entier. Celles-ci permettent de rendre les murs vivants plus fiables et plus abordables. Certains résultats présentés sont probablement moins positifs que certains promoteurs de la paroi vivante le souhaiteraient. Plutôt que de cacher ou d'ignorer des résultats défavorables, les nouvelles données présentées offrent une opportunité pour l'industrie naissante des murs vivants de se confronter ouvertement aux coûts réels et aux implications de la création de la vie, d'une respiration, d'une reproduction et (comme dans le cycle de la vie) d'un système de mur mourant. Le mot-clé est « système ». Pour devenir vraiment écoresponsable, il devient évident que l'industrie doit changer de paradigme et passer de la vente de l'idée d'un simple « mur » à la commercialisation d'un système complet, de réservoirs de stockage d'eau de pluie, etc.

La durabilité du béton

Le chapitre 3 recentre la discussion sur les questions environnementales clés de cette thèse, en impliquant principalement le béton et en dépassant les considérations d'ordre plus technique du chapitre 2. En dépit de sa complexité, déterminer s'il est possible de résoudre les défis techniques auxquels sont confrontés les murs bétonnés n'est pas la première question à laquelle il convient de répondre. La question cruciale n'est pas de savoir comment faire pousser les plantes sur le béton mais de savoir si l'action est justifiée ou non. En d'autres termes, il faut d'abord répondre aux questions plus globales : le béton peut-il être un matériau écoresponsable et les murs en béton peuvent-ils être considérés comme un système constructif écologique ?

L'une des façons de répondre à cette question est par l'évaluation du cycle de vie des bâtiments qui nous apprend deux leçons importantes sur la construction durable. La première est qu'une analyse complète des impacts sur l'environnement est nécessaire avant que des hypothèses puissent être faites sur le choix d'un matériau ou d'un système particulier. Les variables comprennent la longévité et la typologie des bâtiments. La typologie est importante car certains types de bâtiments tels que les maisons et les bureaux dépensent la plus grande partie de leur énergie dans leur fonctionnement. Par conséquent, le choix des matériaux ne doit pas se faire uniquement sur l'énergie intrinsèque de leur fabrication et de leur construction, mais sur la performance environnementale des matériaux et des systèmes pendant toute la durée de vie du bâtiment. Ceci est de bon augure pour les systèmes constructifs en béton pourvus de caractéristiques écologiques jouant un rôle actif dans la réduction de la consommation d'énergie et se souciant de la santé et du bien-être. La typologie déterminera également la matérialité. Par exemple, la construction en bois ou en terre est une option pour la construction résidentielle de bâtiments de faible à moyenne hauteur, mais pas pour la construction de grande hauteur, où le béton et l'acier dominant.

Les emplacements géographiques détermineront également la matérialité. Dans les climats aux étés chauds, la masse thermique d'un mur en béton est parfois un avantage par rapport à un système reposant uniquement sur l'isolation thermique, telles que les charpentes en bois. Le béton est souvent (injustement) considéré comme nécessaire dans la construction de bâtiments dans les zones sismiques et dans les zones côtières sujettes aux inondations.

Découvrir si le béton peut être un matériau écoresponsable est une étape importante pour relever les défis du développement durable et c'est pourquoi une grande partie du chapitre 3 est consacrée à répondre à cette question. Le béton est fait de matériaux omniprésents pouvant être mélangés et employés par des

personnes ayant des compétences extrêmement variées : allant de la main-d'œuvre non qualifiée aux techniciens travaillant dans les échelons supérieurs de la technologie émergente. Les architectes doivent recourir au béton de la manière la plus judicieuse possible. Simultanément, les scientifiques des matériaux, les chimistes, les physiciens et les ingénieurs de processus s'efforcent d'améliorer la science du béton et sa production. La seule réponse pertinente à la question de savoir si le béton peut ou non être un matériau écoresponsable est qu'il doit être conçu pour l'être, évoluer pour être aussi écologique que possible. Bien que cela soit contraire à l'argument « moins mauvais n'est pas assez bon » (obligatoire pour remplacer le paradigme actuel de la construction), il est essentiel que les architectes, écologistes, scientifiques et ingénieurs ne cachent pas la question de savoir comment améliorer la soutenabilité du béton. Tourner le dos à ce problème serait une collusion de facto pour nuire à l'environnement. Pourquoi ? Parce que la portée mondiale du béton est si profonde que les conséquences globales de l'amélioration des propriétés écologiques du béton ne seront pas négatives pour l'environnement. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser une lentille écologique pour économiser les constituants du béton. Cela commence par voir ses composants dans le cadre d'une économie plus large : une économie en boucle fermée et naturelle. Les progrès technologiques peuvent être utilisés pour optimiser la conception du mélange de béton qui, à son tour, peut être utilisé pour influencer le processus de conception le plus tôt possible, c'est-à-dire au stade de la conception.

F.1.2. Partie II : Botanique

La deuxième partie se divise en deux chapitres. Le chapitre 4 porte sur les plantes pour les murs vivants en béton et le chapitre 5 sur leurs substrats, c'est-à-dire les milieux de culture des plantes.

Les tropes conduisant la recherche sur le volet botanique sont matériels et biophiliques. La matérialité fait référence au fait que les plantes ont toujours été perçues globalement comme un matériau architectural, et le caractère « biophilique » renvoie à l'objectif omniprésent de ce volet : identifier les plantes qui transmettront le dynamisme de la nature dans une troisième dimension.

La recherche en botanique de cette thèse coïncide avec la recherche en sciences des matériaux. Cependant, les premiers mois de recherche se sont concentrés sur la réponse aux questions essentielles en botaniques, la principale méritant d'être répétée : les plantes peuvent-elles se développer dans un environnement cimentaire ? Répondre affirmativement à cette question, même théoriquement, est essentiel car sans les plantes, la composante « vivante » du mur de béton serait absente.

Plantes: sélection des espèces

La sélection des espèces végétales pour les murs vivants en béton est fondamentale afin de prouver l'hypothèse de cette dissertation. La différence entre la sélection de plantes pour un mur vivant en béton et des plantes pour d'autres systèmes est qu'un environnement de mur vivant en béton est plus contraint en raison de ses caractéristiques physiques et chimiques uniques. À première vue, certaines de ces caractéristiques semblent exclure l'hypothèse selon laquelle les plantes peuvent pousser dans un environnement cimentaire. Les propriétés du béton impliquent de plus grandes restrictions, ce qui signifie moins de choix ; conséquence qui s'intensifie lorsque des restrictions écologiques se superposent, par exemple, lorsqu'il s'agit de décider de limiter les plantes aux espèces locales. Dans d'autres systèmes de parois vivantes, les matériaux structurels et autres supports choisis pour contenir et / ou maintenir les plantes sont choisis en fonction de leurs propriétés mécaniques et économiques ; l'exigence minimale pour les matériaux est qu'ils n'affectent pas négativement le développement de la plante. Pour les murs vivants en béton, les premiers critères sont les mêmes, mais la dernière condition n'orientait pas le choix vers le béton. Le béton a été choisi pour son économie et son omniprésence, sa flexibilité formelle et géométrique ainsi que pour sa solidité et sa durabilité. Son impact négatif sur la vie végétale était présumé être important et, dès le premier jour, cet effet anticipé a influencé la sélection des plantes.

Le chapitre 4 présente également la méthodologie de recherche en botanique qui comprend l'interview d'un botaniste et d'un systématicien spécialisé dans les plantes, sauvages en majorité, ou angiospermes ligneuses cultivées, et passent en revue la littérature portant sur les différents sujets impliqués. Les résultats de cette méthodologie sont résumés dans ce chapitre, tout comme les critères de sélection des plantes, l'identification des espèces végétales possibles, les différents groupes de plantes comparés et enfin, les sélections finales des plantes.

Auparavant, la réponse théorique à l'application « mondiale » avait été remise en question, et le chapitre 4 traite la réponse à cette question plus en détail, notamment sur la façon dont les murs vivants en béton ont le potentiel d'entretenir la vie végétale : d'où l'hypothèse selon laquelle les murs vivants en béton ne seront pas limités géographiquement. Le facteur critique identifié a moins à voir avec l'emplacement géographique du mur mais plutôt avec les plantes choisies pour les murs. La sélection des plantes a été identifiée comme le critère qui déterminera la viabilité du mur. Par exemple, les plantes connues pour tolérer les environnements alcalins et survivre dans des habitats verticaux peuvent s'adapter à des conditions extrêmes de vie dans un milieu vertical et cimentaire, c'est-à-dire s'ils viennent d'un environnement semblable à celui dans lequel ils seront semés.

Il est déterminé que le milieu de culture du béton doit s'adapter autant que possible aux besoins des plantes, ce qui peut être fait en optimisant la taille des pores du béton afin que la distribution de la percolation puisse jouer un rôle dans le contrôle de la vitesse de diffusion de l'humidité relative. Diminuer la porosité génère une humidité accrue, mais trop d'humidité risque de noyer les plantes. L'augmentation de porosité et l'irrigation devra être favorisée pour obtenir des niveaux d'humidité optimaux. En effet, une porosité importante assure un meilleur drainage et diminue le risque d'étouffement des racines de la plante. Le chapitre 4 identifie les facteurs potentiellement en conflit les uns avec les autres en vue de trouver la porosité concrète appropriée pour supporter la vie végétale.

L'une des façons d'augmenter les chances de survie des plantes consiste à choisir des plantes locales, puisque les facteurs climatiques locaux affectent également le potentiel de croissance. Des espèces particulières de plantes locales peuvent être difficiles à obtenir, ainsi des accords précoces avec des sélectionneurs de semences sont nécessaires pour assurer un approvisionnement suffisant et répondre à la demande. Il a été noté que de nombreux pays ont à la fois des organisations gouvernementales et non gouvernementales à même de contribuer à cette entreprise. Une autre façon d'améliorer les chances de survie de la plante - et abaissant le coût - est de choisir d'installer la végétation du mur vivant en béton en semant. La culture des plantes à partir des semences élimine alors l'installation des jeunes plantes sur le mur, ce qui est un facteur déterminant de la conception du mur. Cela simplifie le processus de conception et le mur lui-même, et coûte moins cher que d'installer des plantes élevées dans une pépinière. La satisfaction des besoins spécifiques des graines, telles que la vernalisation, se produit directement sur le mur.

Mais d'autres besoins doivent également être pris en compte, tels que la performance du mur vivant en béton dans le contexte plus large de la façon dont il peut servir son environnement local. Par exemple, les plantes peuvent être choisies en fonction de leur performance dans la dépollution de l'environnement du dioxyde de soufre, qui peut entrer dans la stomie de la plante, ou des oxydes d'azote, généralement captés par dépôt.

Le chapitre 4 a également révélé que certaines plantes sont naturellement présentes et n'ont pas besoin d'être plantées, c'est le cas par exemple pour les mousses. Comme cela a été prouvé dans les chapitres 8 et 9, les mousses poussent à partir de spores bien réparties dans le sol à l'échelle mondiale : pourvu que les bonnes conditions de croissance soient respectées, les mousses apparaîtront dans le sol même. Si la mousse est désirée mais qu'aucun sol n'est utilisé, il est nécessaire de semer des spores de mousse dans le milieu de culture. D'autres plantes endémiques non choisies proviendront des spores et des graines semées par le vent. Notons également qu'il est prévisible, voire probable, que les espèces endémiques rattrapent entièrement le mur vivant en béton - en surclassant les espèces végétales initialement sélectionnées, bien que cela n'ait pas été prouvé jusqu'à présent lors des essais examinés dans le chapitre 9.

Une des plus grandes questions de cette thèse est abordée dans le chapitre 4 : la fertilisation. La fertilisation est souvent considérée comme un facteur déterminant dans la sélection des plantes. Cependant, la fertilisation NPK a été jugée inutile car la plante crée son propre environnement. La fertilisation, résultat du contrôle de rendement des cultures utilisé pour aider les plantes à pousser plus vite et à devenir plus volumineuses, est souvent utilisée pour surmonter l'incapacité d'une plante à survivre dans un environnement dans lequel elle serait autrement surpassée par des plantes non affectées par des maladies. Les plantes cultivées à partir de graines bénéficient déjà des avantages de leurs plantes mères, telles que la tolérance à la sécheresse et la survie sans engrais. L'ajout de terre à la porosité du béton aide les graines à germer et à donner aux semis des éléments nutritifs pour faciliter leur croissance, ce qui réduit encore le besoin d'engrais.

L'ensemble des critères de sélection des plantes mis en place dans le chapitre 4 conduit aux résultats suivants. On choisit plutôt les plantes locales aux espèces exotiques : elles ont en effet besoin de moins

d'entretien, d'eau et de produits chimiques pour survivre et sont mieux adaptées au climat local. Il est également démontré que les plantes locales encouragent la biodiversité et créent un lien psychologique avec leur région. Les plantes choisies pour les tests de la thèse sont adaptées à Lyon, dans la région Rhône-Alpes en France. Et il a été décidé d'utiliser une approche polyculturelle lors de la sélection des espèces pour les essais de cette thèse, c'est-à-dire qu'un certain nombre d'espèces différentes sont utilisées ensemble afin d'augmenter les chances d'atteindre la pérennité du mur vivant en béton. De même, des espèces vivaces de plantes sont choisies pour alléger la nécessité de replanter ou de réensemencer la paroi vivante en béton à chaque printemps. Les graines sont semées plutôt que d'utiliser des plants élevés en pépinière pour les raisons susmentionnées. Plusieurs plantes ont été identifiées comme capables de survivre dans un environnement vertical et alcalin, cette caractéristique a été vérifiée. Les espèces choisies pour la majorité des tests de cette thèse sont *Aurinia saxatilis*, *Centranthus ruber*, *Cymbalaire muralis*, *Festuca rubra*, *Lolium perenne*, *Ruta Graveolens* et *Sedum acre*.

Supports de croissance : science du sol

La croissance des plantes sur une surface verticale affecte non seulement la morphologie des plantes, mais elle remet également en question les conventions de la science des sols. Ces déviations sont présentées dans le chapitre 5. Par exemple, les pédologues décrivent les sols comme des horizons maîtres. Tous les sols n'ont pas les horizons présentés au chapitre 5, mais tous les sols sont une variante du modèle discuté.

Ce modèle est mis en contraste avec celui du mur vivant en béton dont le substrat de sol est installé sur la face verticale. Là où il n'y a pas de couverture végétale et après quelques saisons, les éléments nutritifs et les minéraux sont éliminés, laissant derrière eux des particules de sol blanchies, de couleur blanche ou cendrée. Ces particules nues restées sur la surface verticale du mur vivant sont visibles. Sans l'élasticité de l'argile et la souplesse de la matière organique, ces particules de sol éluviées et agrégées forment une croûte sur la surface la plus verticale. Plus sèche sur la surface exposée que sur la face interne, la croûte sèche provoque différemment des divisions résultant en des flocons incurvés et concaves. Au-dessous de cette croûte, une strate illuviale non éluviée ou relativement inchangée est observée. On peut imaginer que tous les minéraux et les particules d'argile disparaissent au-dessous et se dissolvent dans l'eau d'irrigation qui s'écoule vers le bas, n'eût été l'évolution et la régénération de la vie végétale dans la strate la plus externe. Le chapitre 5 suggère une réorganisation des horizons en strates, poursuit l'explication de la dynamique potentielle de ces phénomènes jamais quantifiés auparavant; et se demande comment ces «micro-horizons» interagissent avec les «micro-strates» verticales minces qui leur sont perpendiculaires ? On peut également percevoir la couche de béton perméable d'un mur vivant en béton apparenté à l'horizon traditionnel du substrat rocheux non consolidé, et la couche de support structurel du mur vivant en béton comme l'horizon du substrat rocheux. Nous pouvons aussi nous attendre à ce que cette strate « rocheuse » ne soit pas bénigne, comme c'est le cas dans le modèle de sol typique lié à la terre décrit dans le chapitre 5. Pourquoi ? Il s'agit d'une masse thermique pourvue d'un grand vide derrière elle, c'est-à-dire le volume intérieur du bâtiment que le mur vivant en béton enferme : la perte ou le gain de chaleur du bâtiment peut avoir un effet sur la partie vivante du mur vivant en béton. Qu'en est-il alors de la couche de substrat rocheux non consolidée, c'est-à-dire le béton perméable ? Il est possible qu'il se remplisse lentement de racines à la recherche d'humidité, qui finiront par se décomposer, pour devenir une couche illuviale pour les substances perdues par les particules du sol ou rester, comme on le suppose, relativement poreuse pour percoler sans entrave l'eau d'irrigation. L'intrusion « horizontale » des racines entre les strates verticales reflète la trajectoire de la racine verticale descendante du développement précoce des plantes dans le modèle de sol de l'horizon classique. Si nous additionnions tous ces phénomènes, et d'autres pas encore élucidés car le sujet est large et complexe pour couvrir cette dissertation, nous obtiendrions un nouveau modèle scientifique pour le sol d'un mur vivant en béton avec sa propre nomenclature qui reflète étrangement ce biome dichotomique, à la fois contre nature et naturel. Il est erroné de cultiver des plantes sur une surface verticale artificielle et, comme le montre le chapitre 9, les plantes commencent naturellement à créer leur propre environnement. Les façons de le faire peuvent être prédites, au moins dans une certaine mesure, mais les résultats esthétiques et les effets architecturaux sont imprévisibles et inattendus, comme on peut le voir dans les chapitres 8, 9 et 10.

L'incursion du chapitre 5 dans la physique du sol esquisse les phénomènes qui formeront la base d'une nouvelle sous-branche de la science du sol. Espérons que cet effort aidera le travail futur sur les substrats verticaux ; en partie grâce à son identification des substrats à base de sol et substrats dépourvus de sol ayant le potentiel de porter la vie végétale dans un mur vivant en béton, en partie en déterminant

L'hydrologie de ces substrats, et, partiellement en testant et en évaluant les substrats dans les essais intérieurs et extérieurs présentés dans les chapitres 8 et 9.

L'étude de l'hydrologie des substrats du chapitre 5 pour cette thèse détermine la quantité minimale d'eau nécessaire pour les plantes du mur vivant en béton. La détermination de la capacité de chaque substrat à contenir de l'eau en fait partie intégrante. Tous les substrats fournissent suffisamment de réserves d'eau pour porter la vie typique des plantes murales vivantes, à l'exception de deux d'entre eux, qui nécessitent une étude plus approfondie.

La dernière étape de l'optimisation du cycle d'irrigation pour les murs en béton est également présentée ; il est défini comme le bilan hydrique dans lequel le stockage est égal à l'eau gagnée moins l'eau perdue. Il a été déterminé que le substrat de la paroi vivante en béton doit être irrigué avant qu'il n'ait perdu 50% de sa teneur en humidité disponible dans la zone racinaire de la plante. Par conséquent, cette limitation doit être respectée jusqu'à ce qu'un profil de données plus complet soit établi en vue de décrire le bilan hydrique de chaque substrat.

F.1.3. Partie III : Science des matériaux

La troisième partie se divise en deux chapitres. Le chapitre 6 porte sur les matériaux et les systèmes potentiels qui pourraient résoudre la pièce du puzzle relative à la science des matériaux : comment les plantes sont-elles capables de pousser verticalement sur un mur construit en béton ? Plusieurs propositions sont présentées, trois ont été sélectionnées pour des essais préliminaires. Le chapitre 7, à partir de ces trois propositions, teste chacune dans le but de créer un nouveau matériau béton qui pourrait entretenir la vie végétale.

Explorer les possibilités : murs vivants en béton

Le chapitre 6 commence par un passage en revue des questions préliminaires en science des matériaux qui ont conduit la recherche et une explication de l'approche méthodologique de l'exploration en deux catégories, matérielle et systémique. Les propositions sont décrites graphiquement et les trois voies choisies pour les tests physiques sont présentées.

La recherche de propositions concrètes de matériaux pour des murs vivants pouvant être testés physiquement débute par l'identification de questions clés. De ces questions, une représentation est proposée qui expose des caractéristiques désirées du matériau pour un mur vivant de béton. À partir de ces caractéristiques, un ensemble de critères est établi. Les critères incluent le coût, le caractère local, la transférabilité géographique, le comportement structurel (idéalement), l'adaptabilité aux applications de grande hauteur (donc hydroponique - idéalement), la simplicité de construction, la capacité à retenir l'humidité disponible pour les plantes, la forme, l'attrait esthétique, et la capacité d'adaptation aux méthodologies de construction préfabriquées et coulées sur place.

Grâce aux critères ci-dessus, un cadre a été établi pour faciliter l'approche des explorations propositionnelles. Les approches ont été définies comme étant matérielles ou basées sur le système. L'approche basée sur le matériau divise le problème en surfaces texturées ou en matériaux perméables. Des propositions passives et actives sont théorisées pour la catégorie de texture et plusieurs manières de s'attaquer aux défis auxquels les matériaux perméables sont confrontés sont abordées. En ce qui concerne l'approche systémique-recherche, les matériaux théorisés dans la première approche sont conceptualisés soit comme l'ensemble du système composé d'une seule couche de matériau, soit comme un ou plusieurs matériaux combinés sous la forme d'un système multicouche. Des propositions sont également présentées en matière de méthodologie de construction en vue d'aborder les problèmes des assemblages multicouches, des formes complexes, et le séquençage de la construction. Ensuite, une étude typologique est conduite afin de cartographier les combinaisons potentielles des possibilités matérielles concrètes perméables. Enfin, trois approches dans la catégorie perméable ont été sélectionnées pour les essais physiques : la série I fait intervenir des graines coulées dans la pâte de ciment du béton perméable ; la série II, identique à la série I mais avec un milieu de culture ajouté, et la série III, à l'aide d'un substrat ensemencé appliqué au béton perméable pendant ou après la coulée.

Les trois séries choisies pour les tests physiques n'annulent pas les propositions non sélectionnées. Cependant, leurs caractéristiques potentielles correspondent plus étroitement aux critères établis et

alimenteront un large éventail de voies expérimentales à suivre. Afin de confirmer ces choix, des tests physiques préliminaires sont effectués (présentés dans les chapitres 7 et 8) pour fournir une évaluation du concept mentionné.

Formuler un nouveau béton

Les trois objectifs détaillés dans le chapitre 7 consistent à tester les formules de béton perméables, à en vérifier les performances mécaniques (avec et sans son système de support) et à estimer la répétabilité des expériences sur des plantes en croissance et vieillissantes sur les éprouvettes. La recherche se questionne quant à la capacité des plantes à pousser avec succès sur un mur de béton fabriqué à partir de béton perméable verticalement coulé et auto-consolidant avec ses pores partiellement remplis d'un substrat ensemencé. Un certain nombre de conclusions sont tirées au cours des essais exploratoires des deux mélanges nécessaires à la mise au point d'une nouvelle formulation de béton perméable autoportant.

Il en ressort que le sable sera supprimé des conceptions de mélange proposées du fait de sa propension à les rendre trop rigides, ce qui diminue la maniabilité du matériau. Une caractéristique importante pour un béton perméable réussi est la pâte de ciment avec son effet lubrifiant. La représentation observable de cet effet est le phénomène de l'apparition de ce que l'on appelle "chaînes" ("fils" en français) qui apparaissent entre les agrégats adjacents. L'omission du sable dans la formule favorise une pâte de ciment plus « fibreuse ». Mais cela ne pas résout le problème des agrégats fins. Bien que les granulats fins tels que le sable soient éliminés de la formule, ils sont involontairement réintroduits en accompagnant les plus gros granulats, et sont donc réduits autant que possible.

Résoudre la rhéologie des deux formules de ciment est un bon point de départ en vue de converger vers des formules de béton, mais les formules de ciment de mortier avec une rhéologie validée trouvée dans le laboratoire ne sont pas représentatives des formules finales utilisées avec les agrégats. Cela a surtout à voir avec l'effet lubrifiant nécessaire pour une formule réussie. Cet effet lubrifiant est observé uniquement en présence de la matière à lubrifier, c'est-à-dire les agrégats. Parce que la rhéologie de la pâte de ciment est formulée sans agrégats, il est très improbable que les tests rhéologiques effectués dans le laboratoire sur le mortier fournissent plus qu'une base de référence extrêmement approximative pour commencer les tests plus significatifs avec les agrégats, car sans confirmation visuelle des « chaînes » existant entre les agrégats, il y a peu d'indication dans l'approche méthodologique utilisée pour indiquer une rhéologie réussie en termes pratiques. Par conséquent, il est recommandé qu'une nouvelle méthodologie soit créée pour toute étude ultérieure d'un béton perméable coulé verticalement autocompactant, ce qui, soit ajoute un nouveau test de validation dans les études de rhéologie, soit le redéfinit. S'il est redéfini, il est recommandé de travailler à rebours des formules finales validées pour reconstruire une nouvelle méthodologie en utilisant le cadre utilisé pour la ligne de ciments Hydromedia, à la seule exception qu'elle devrait inclure le BVMB (formule de béton vivant avec du métakaolin et du ciment blanc) révisé. La méthodologie rhéologique est utilisée pour trouver les "quenelles", spécifiées dans les chapitres "Nouveau Système" de cette thèse. Les tests que nous avons effectués avec des granulats nécessitent généralement plus d'additifs et/ou d'eau pour obtenir un effet lubrifiant. Avec plus de temps et de ressources, un modèle informatique pourrait être développé pour prévoir l'écart entre les études avec et sans agrégats. Enfin, le modèle pourrait prédire les constituants approximatifs nécessaires pour affiner une pâte de ciment de mortier en laboratoire. Note : les outils utilisés pour mesurer l'étalement de ciment devront être ajustés pour accommoder les pâtes de ciment plus visqueuses car les diamètres à mesurer sont parfois trop importants pour être pris en charge par les outils utilisés dans cette étude (on être amené à utiliser un cône plus petit). Manifestement, certains bétons, dont la singularité provient de la forme et de la taille de leurs agrégats, peuvent nécessiter une méthodologie rhéologique de guidage définie rétroactivement.

La formule BVP1 (béton vivant avec du ciment pur), à base de ciment pur, sera l'option la plus économique des deux bétons développés pour ce projet. Alors que l'autre formule utilise des matières premières relativement abordables et disponibles, l'un de ses constituants primaires est un peu moins accessible que la formule BVP1. Il convient de noter que, comme pour l'autre formule, le pourcentage d'adjuvant de la formule BVP1 est suffisamment important en volume pour nécessiter un examen plus approfondi, c'est-à-dire si l'économie de la formule devient plus préoccupante. Il en est de même pour déterminer la nécessité d'utiliser l'agent modifiant la rhéologie fabriquée par KELCO-CRETE, dont la gomme diutane possède un comportement pseudoplastique. Les matériaux pseudoplastiques reviennent à l'état de gel presque instantanément lorsque l'application du cisaillement est supprimée. Ces matériaux sont

également caractérisés par la viscosité. Bien qu'il y ait une certaine beauté dans le fait que la seule formule sans métakaolin ait un élément ajouté qui fait que la pâte de ciment a plus de l'aspect thixotropique de celle avec le métakaolin, il serait plus pratique de trouver un moyen d'éviter d'avoir un tel agent spécialisé utilisé dans la plus "démocratique" des formules.

L'importance de la formule BVM1 (formule de béton vivant avec du métakaolin et du ciment pur) est que ses constituants produisent un béton d'un pH inférieur à celui de la formule de ciment pur de BVP1. Esthétiquement, la formule BVM1 durcit à un gris plus clair que la formule BVP1 en raison du métakaolin et de la charge de calcaire. Parce que la formule BVM1 est venue après la formule du ciment pur, c'est avec cette formule que l'on a appelé la "magie" des propriétés thixotropes du métakaolin. Pourtant, le métakaolin affecte également l'apparence du béton. Il est également connu pour diminuer l'efflorescence et améliorer la force d'adhérence entre la pâte et les agrégats. Dans les bétons, ceci peut signifier une résistance accrue à la compression et à la traction.

La phase de validation de la formule a vu la construction réussie d'un mur de béton perméable non armé coulé verticalement auto-compactant et supportant son propre poids, ouvrant la possibilité d'explorer une gamme de systèmes de construction architecturale. Du fait que le matériau peut être moulé sur le terrain, les formules font avancer la thèse du plus en plus proche du premier système de mur vivant non préfabriqué au monde.

F.1.4. Partie IV : Nouveau système

Des graines au système

Les essais exploratoires menés au laboratoire de science des matériaux ont constitué la base des essais intérieurs ultérieurs à Angers ainsi que des essais extérieurs ultérieurs à Lyon. Les essais de substrat ensemencés (série I) ont été considérés pour leur proposition unique de cultures hydroponiques de graines mélangées dans un lot de béton. Bien qu'elles soient entièrement recouvertes de pâte de ciment, les graines - certaines graines - ont germé. Cependant, ces essais n'ont pas prouvé que les semis pouvaient atteindre l'âge adulte. Les semis n'ont pas pris. Cependant, cette leçon encourage l'installation d'un substrat et il est constaté qu'avec un peu plus de "colle" les semis pouvaient être plantés sur la face verticale d'un mur vivant en béton. Les mousses sont cultivées avec succès à partir de spores, mais pas de manière contrôlable. Les essais de Rockwool font émerger un moyen d'appliquer un substrat inorganique dans du béton perméable et de faire pousser avec succès des plantes à partir de graines incorporées dans la laine de roche. Une méthodologie qui pourrait être applicable à d'autres types de substrats plus écologiques, par exemple des substrats de coton ou de laine recyclés pouvant être utilisés dans des applications de grande hauteur ou dans des régions dont les sols ne constituent pas de bons substrats. Les essais de thé de compost enseignent que les plantes murales vivantes peuvent survivre si elles sont contraintes à vivre dans leurs propres déchets à condition que l'eau d'irrigation soit traitée comme dans le cas de l'eau aérée pendant la percolation dans du béton perméable, une hypothèse qui nécessite une enquête plus approfondie. Les substrats aidant à fabriquer le thé de compost ont également été étudiés, nous apprenant qu'un mélange de terreau et de terre d'emportage fournit la structure du sol et ses avantages nutritifs et une germination régulière. Les tests de substrat prouvent également que les graines peuvent germer dans les substrats du sol mélangés au ciment, une découverte qui pourrait s'avérer utile pour aider à lier le substrat au béton perméable, rendant ainsi le substrat moins sensible aux dommages causés par les tempêtes. Les essais d'exposition testent les substrats à l'extérieur et prouvent que le substrat peut survivre pendant les quatre saisons et les événements météorologiques lyonnais sans que les plantes le protègent. Les tests SAP ont ouvert la possibilité d'ajouter des éléments tertiaires au substrat, ce qui pourrait faciliter la germination des graines. Même si les résultats ne sont pas concluants, la porte reste ouverte pour l'ajout de polymères superabsorbants sur des substrats de murs vivants en béton. C'est également le cas concernant la possibilité d'ajouter de la terre cimentaire expansée au béton perméable pour son potentiel isolant, sa légèreté et sa capacité à s'accrocher aux surfaces. Ces essais exploratoires ont été essentiels pour passer à l'étape suivante de tests plus rigoureux, et leur succès prépare le terrain afin que les essais intérieurs puissent se dérouler dans la serre d'Angers, en France.

La première série d'essais à Angers voit l'échec des séries I et II (le béton perméable avec graines mélangées dans le béton et noyées dans la pâte de ciment). Bien que le concept puisse un jour s'avérer utile, la difficulté inhérente de forcer les plantes à croître verticalement fait l'ajout d'un autre obstacle à surmonter - la germination dans le ciment - un défi de trop. L'échec des séries I et II crée l'opportunité de se concentrer sur les essais de la série III (avec des graines mélangées dans des substrats ajoutés au béton perméable), et

ces essais fonctionnent bien, si bien qu'ils ouvrent la porte à plus d'idées jaillies dans les essais exploratoires, à tester plus rigoureusement et à plus grande échelle. Ces deuxièmes essais introduisent le renforcement du substrat fibreux et le renforcement du ciment dans le but de créer des substrats offrant une meilleure résistance aux intempéries. Aussi différentes espèces de plantes sont testées telles que l'herbe. Les deuxièmes essais sont aussi concluants que ceux reportés de la première série, ce qui ouvre la porte à une troisième série d'essais qui analyse de plus près la relation temporelle entre la germination de la plante et le délai entre la coulée et l'installation du substrat. Ces essais temporels prouvent que l'installation d'un substrat un jour après la coulée conduit finalement aux mêmes résultats que l'attente de 28 jours. Cependant, si des résultats à court terme sont recherchés, attendre jusqu'à 21 jours donne des résultats presque aussi bons qu'à 28 jours. Ces résultats sont vérifiés dans l'analyse chimique de l'eau intérieure des corps d'essai de murs vivants en béton irrigué.

En résumé, les essais intérieurs valident la répétabilité de la germination, les matériaux formulés et les méthodes de construction des murs intérieurs en béton. Indépendamment du succès des essais extérieurs, le travail de cette thèse peut prétendre avoir développé un nouveau matériau vivant pouvant être dans une application de mur intérieur. Seul, il s'agit d'une découverte importante qui peut avoir un impact sur l'architecture. De plus, dans le temps écoulé depuis la mise en place des blocs d'échantillons à Angers, bien qu'aucun engrais n'ait été utilisé dans les essais, aucun signe de mort des plantes dû à une pénurie d'éléments nutritifs n'a été observé.

Test du nouveau système- Essais extérieurs

Le développement d'un nouveau système architectural de mur vivant en béton s'est déroulé de façon non linéaire et a nécessité des progrès simultanés dans les disciplines concernées de la botanique, de la science des matériaux et de l'architecture. Tous les efforts déployés pour tester l'hypothèse de cette thèse portent leurs fruits dès lors que la pérennité du nouveau système est validée. Cependant, le nouveau système nécessite une évolution avant d'être prêt à être inclus dans le lexique de l'architecte. Le chapitre 10 traite du potentiel architectural du nouveau système, alors que le chapitre 9 aborde les aspects techniques de la botanique et de la science des matériaux et présente les conclusions et les discussions tirées des leçons apprises et des recommandations pratiques pour améliorer la technologie des murs vivants.

Aspects techniques

En ce qui concerne la formule du béton perméable, le ciment blanc nécessite de modifier la formule de ciment gris et de métakaolin, et c'est seulement la formule BVMB qui utilise du ciment blanc et du métakaolin utilisé pour les essais grandeur nature. Quel que soit le type, d'autres travaux sur les formules "BV" (béton vivant) sont nécessaires pour optimiser leur modèle de percolation. Une porte d'accès pour améliorer les formules grâce à du ciment pur (BVP) serait d'éviter d'utiliser des additifs spécialisés, c'est-à-dire, la gomme Diutan. De plus, étant donné que le métakaolin est choisi pour abaisser le pH et que les tests intérieurs montrent qu'à long terme, il n'est pas nécessaire si l'eau d'irrigation n'est pas recyclée (si l'eau est recyclée, il est possible d'observer une augmentation progressive de son pH). Ce qui nécessite une prise de décision quant à la pertinence de l'utilisation de métakaolin dans les formules BVM (béton vivant avec du métakaolin).

La méthodologie de construction révèle qu'au moins une partie de l'hétérogénéité du modèle de percolation testé est liée à la méthodologie de construction elle-même. Un effort pour résoudre ce problème consiste à vérifier qu'une seule goutte de BVMB est nécessaire pour une séparation minimale de la pâte de ciment et des granulats (avec 10% de pâte en moins) et pour que la coulée dans les ascenseurs crée des cônes avec des pores bloqués au sommet des cônes ; de sorte que le moins soulève le mieux car les points concentrés de l'effet de coulée hétérogène du pattern de percolation. En outre, un scénario prometteur pour réduire l'hétérogénéité de la percolation est un mouvement constant pendant la coulée, c'est-à-dire que le manchon ou la goulotte de béton n'est jamais stationnaire pendant la coulée. Alternativement, peut-être qu'une reformulation de la formule BV pourrait optimiser le modèle de percolation. En ce qui concerne le renforcement, il est entendu que les attaches permanentes ne seraient pas nécessaires structurellement et ne seraient pas nécessaires pour la plupart des codes.

Les caractéristiques de résistance du matériau sont encourageantes. La force de l'adhérence entre les deux couches de béton varie de 1,4 à 2,1 MPa pour les 16 + 8 cm A0 et la moyenne des points de rupture pour les formules BV est de 1,9 MPa. En ce qui concerne la résistance à la compression du béton perméable

à 28 jours, le BVP (ciment pur) a une densité moyenne de 1,74 kg / m³ et la formule BVM (métakaolin) une moyenne de 9,9 MPa et une densité de 1,75 kg / m³. En raison de cette résistance à la compression, les propriétés structurales du béton perméable ne lui permettent pas d'être utilisé comme mur porteur sans une couche de support de secours.

L'irrigation est l'un des éléments les plus critiques du nouveau système. Un système d'irrigation optimisé doit encore être mis en place. Dans cette optique, la collecte des données d'humidité doit être reconduite. Cependant, le travail de cette thèse aboutit à une base de connaissances qui fournit un certain nombre de leçons importantes et qui prouve que le système d'irrigation du mur vivant en béton est aussi compétitif que les systèmes de murs vivants plus classiques. La leçon la plus importante est que le mur vivant en béton peut consommer en moyenne 1 litre / m² par jour d'eau consommée. La germination initiale nécessite plus d'eau, comme le printemps suivant pour la régénération. La couverture végétale homogène exige que le substrat soit entièrement humidifié. Pour déterminer la durée de l'irrigation, la distance verticale entre le tuyau d'irrigation et le point de collecte doit être déterminée. Pour commencer, l'irrigation doit durer jusqu'à ce que le substrat soit entièrement humidifié. Les tuyaux flexibles peuvent être préférables aux tuyaux rigides (nous utilisons des tuyaux rigides) pour diminuer de colmatage et la sensibilité à la planéité. Fait intéressant, l'irrigation par pulvérisation supplémentaire sur la surface du mur pour la germination est inutile si l'irrigation interne est autorisée à fonctionner assez longtemps pour saturer le substrat entier. Une leçon essentielle apprise est que l'irrigation hivernale est nécessaire, mais dans une quantité beaucoup plus faible que pendant la saison de croissance (en fonction du type de plantes).

L'analyse de l'eau extérieure a montré que les niveaux d'oxyde de calcium se stabilisent dans les 10 jours, que le pH se stabilise rapidement en une semaine et atteint en moyenne 8,3 (alors que l'eau municipale est en moyenne de ~ 7,9). Remarque : le contact de l'eau et du sol doit être pris en compte dans l'analyse chimique car la perte de substrat et l'éluviation des minéraux constituent un aspect important de l'hydrologie du substrat. Pour tous les éléments suivis, l'eau de pluie est beaucoup moins chargée que l'eau municipale. On a découvert que le pH, le CaO et éventuellement le SO₃ sont les valeurs les plus pertinentes, par exemple, les valeurs de SO₃ restent légèrement plus élevées que les valeurs de contrôle de l'alimentation en eau municipale. Le trioxyde de soufre est l'agent principal dans les pluies acides, il est donc important de le mesurer. Une dernière recommandation a été tirée de l'analyse chimique : le délai minimum recommandé entre la fabrication et l'ensemencement est de 10 jours.

En ce qui concerne les capteurs d'humidité mentionnés ci-dessus, d'autres études sur la teneur en humidité doivent être effectuées. Les capteurs installés sont eux-mêmes expérimentaux. Par exemple, aucune donnée n'a été lisible à partir des capteurs installés à l'intérieur du mur sud. Nous avons constaté que les capteurs de la paroi nord sont inopérants et certains des capteurs de surface ont fonctionné. Par conséquent, les résultats ne sont pas concluants en raison du manque d'échantillons comparatifs. Il est recommandé d'installer des capteurs prêts pour le marché pour la lumière et l'humidité.

L'analyse de coût du système de mur vivant en béton calculé pour la saison de printemps 2017 montre que le béton vivant de 8 cm de mur de béton perméable (matériel + main d'œuvre) = 67 € / m². Le mur de soutènement en béton armé normal de 16 cm (matériel + main d'œuvre) = 75 € / m². Le substrat ensemencé (matériel + main d'œuvre) = 8 € / m². Le système d'irrigation incluant la captation et la recirculation de l'eau d'irrigation (matériel + main d'œuvre) = 45 € / m². Le coût total du système qui comprend la structure et la finition de l'ensemble du mur extérieur (et pas seulement de la surface végétalisée) est de 193 € / m² avant la marge bénéficiaire.

La coupure d'eau (arrêt d'irrigation involontaire) entre le 26 avril et le 16 mai 2017 a présenté un avantage : l'eau ayant été arrêtée pendant trois semaines et une partie de la végétation ayant survécu, il a été prouvé que le nouveau système est capable de survivre à des événements extrêmes et inattendus. Pendant cette période, seuls le sommet des murs recevaient l'eau de la pluie (justifiée par des preuves vidéo GoPro et une observation visuelle). L'irrigation a été relancée le 16 mai et après la reprise des mousses, près de 100% des sédums ont survécu, et 35% des graminées ont survécu.

De même, une leçon importante a été tirée après la tempête extrême du 8 juin 2016. Juste un mois après l'installation, le substrat superficiel de 5-graines du mur nord a perdu 50% de la portion interne du substrat en raison d'une tempête violente, la plus violente des 50 dernières années. La taille et la force des gouttes de pluie ont causé à la perte de substrat. Mais, étant donné que la sa structure racinaire de la bande d'herbe était suffisamment développée - pour renforcer naturellement le substrat comme si les racines étaient

une forme de renfort fibreux - la bande d'herbe adjacente à la zone affectée était visiblement non touchée par la tempête et le substrat est resté intact.

L'interruption hivernale du système d'irrigation doit également être étudiée. Les essais extérieurs à LCR ont été interrompus pendant plusieurs mois au cours du premier hiver, à l'exception d'arrosages occasionnels. L'arrosage d'hiver supplémentaire est inutile pour les jardins horizontaux conventionnels, qui ont la capacité de stocker l'eau. Le système de mur vivant en béton a une capacité de stockage très faible.

La sélection d'espèces végétales a également permis de tirer plusieurs leçons, par exemple, l'ensemencement est moins coûteux que la plantation, l'obtention de variétés de semences locales est difficile, et les graines peuvent prendre une année à germer. En ce qui concerne les groupements d'espèces, la biodiversité est potentiellement la clé pour assurer la pérennité végétative indépendamment de l'orientation du mur. Il est suggéré qu'un objectif devrait être fixé pour le nombre d'espèces dans un mélange sans graminées ; nous établissons 30 comme la cible recommandée.

La croissance des plantes a été analysée et, en termes d'orientation, les orientations nord, sud, est et ouest du mur ont un impact visible sur la croissance des plantes. Nous observons que la croissance des plantes est inégale. Cependant, le mur exposé à l'ouest est partiellement abrité par deux bâtiments d'essai. En termes d'espèces, la couverture herbeuse est homogène malgré l'irrigation hétérogène. Le mélange de fleurs sauvages en bord de route se développe rapidement, mais télégraphie l'hétérogénéité du modèle d'irrigation. Les mousses sont naturelles et prolifèrent sans égard à l'orientation. L'installation d'une plante endémique crée une couverture négligeable, alors que l'hypothèse était que les espèces locales peupleraient automatiquement le mur après deux saisons de croissance. Actuellement, rien n'indique que cela se produise. Comme indiqué sur le mur ouest, une mise en abri partielle peut favoriser la croissance. Seuls l'herbe, les sedums, un spécimen de Cymbalaire de Rome, deux spécimens d'espèces vasculaires endémiques et la mousse survivent au premier hiver. La croissance des plantes grimpantes n'est pas concluante ; toutefois, il est certain que les plantes grimpantes ne s'attachent qu'aux zones de la surface de béton perméable qui reçoivent régulièrement de l'humidité. Si elles sont installées tôt, les mousses créent plus tard un meilleur microenvironnement. Un environnement 100% humide est favorable pour la germination des plantes. Enfin, si nous conservons l'eau en réduisant l'irrigation du système, le développement de la mousse est moins qualitatif ; les mousses ne poussent que sur les zones les plus humides.

F.1.5. Partie V : Architecture

Une nouvelle époque

La révolution de l'information et l'urgence des préoccupations environnementales accélèrent la manifestation d'une nouvelle ère architecturale. Notre époque ou la conception est basée sur la recherche fusionne et optimise les succès des époques passées grâce à des recherches fondées sur des faits avérés. Conception et fabrication assistées par ordinateur, la modélisation de l'information du bâtiment et le prototypage rapide par exemple, ont le potentiel de combler la rupture dans le continuum de qualité, de durabilité et de personnalisation qui a été brisé lors de la révolution industrielle par la production de masse et l'obsolescence programmée. L'architecture moderne en a été complice en amplifiant cette rupture avec le passé ; la dénonciation de cette rupture par les architectes post-modernistes, déconstructivistes et phénoménologues, nous conduira finalement à l'architecture néo-néo-baroque solipsiste de cette époque. Ici, nous nous sommes laissés la liberté de réapprendre les leçons des époques architecturales passées, qui, avec la ferveur révolutionnaire, ont été balayées. Le passé nous a laissé des matériaux que de nouveaux systèmes nous permettront de réutiliser afin de réparer les erreurs et les excès et de nous aider à répondre aux immenses défis environnementaux et démographiques auxquels nous sommes tous confrontés.

Perspectives de nouveaux matériaux et systèmes

Le problème le plus urgent auquel se confronte l'architecture est celui des villes. La croissance massive de la population nécessite une quantité proportionnée de construction pour abriter, nourrir et employer un nombre croissant d'habitants. Simultanément, les décideurs repensent le logement urbain, la circulation (transport) et les services publics qui affectent directement les archétypes architecturaux. Le bruit et la pollution de l'air accompagnent les augmentations de population. Tous les bâtiments devront fonctionner à des niveaux élevés d'efficacité énergétique et de gestion des ressources. Les changements de température que nous attendions au cours du siècle passé sont maintenant imminents. De nouveaux matériaux et systèmes

de construction sont nécessaires pour mieux s'adapter aux changements climatiques survenant au cours de la vie d'un bâtiment. La conception biophilique gagnera en crédibilité lorsque nous aurons appris à quantifier le coût économique d'une forme de privation de la nature. De nouvelles formes, matériaux et systèmes architecturaux sont ainsi nécessaires pour rétablir notre lien intrinsèque avec le vivant.

Les critères utilisés pour mener les investigations architecturales de ce chapitre sont basés sur les facteurs économiques, environnementaux et sociaux analysés dans les parties précédentes de cette thèse. Les facteurs économiques des murs vivants en béton sont leur coût / m² et la façon dont ce coût se compare aux systèmes de murs vivants concurrents, à leurs coûts de maintenance, en tenant compte de l'impact du cycle de vie sur le coût. Les facteurs environnementaux sont la consommation d'eau du système de murs vivants, l'énergie intrinsèque, l'effet sur l'îlot de chaleur urbain, l'effet sur la qualité de l'air, et leur capacité de réduction du bruit. Les facteurs sociaux sont l'effet biophilique des murs vivants, l'effet sur la forme architecturale et leur effet sur le tissu urbain, à la fois localement et à l'échelle du système.

En agissant comme un méta-concept qui aurait un impact sur les trois catégories et leurs facteurs nous proposons une temporalité des systèmes de murs vivants en béton. Les systèmes ont une temporalité à la fois à long et court terme. À court terme, ils sont affectés par le rythme des saisons. À long terme, ils sont affectés par les cycles de croissance des plantes et l'espérance de vie. La saisonnalité crée un contraste esthétique et fonctionnel, mais son rythme est prévisible et répétitif. La croissance des plantes en termes de cycle de vie est plus perturbatrice, au moins dans le sens où il commence et achève la saisonnalité des plantes. Par exemple, pour les premières saisons après l'installation, les murs vivants en béton semblent être en grande partie en terre et avoir très peu de germination visible. Cette phase affecte tous les facteurs précédemment notés excepté la forme du bâtiment et l'orientation solaire. Cependant, même la forme du bâtiment est perçue différemment au début et à la fin des cycles de vie des plantes car, pendant la majeure partie de leur existence, leurs potentiels cinétiques et tridimensionnels modifient notre perception sensorielle des murs vivants en béton.

Méthodologie de conception

La méthodologie utilisée pour répondre à l'hypothèse de cette thèse et à ses objectifs est d'étudier les potentialités des murs vivants en béton à cinq échelles différentes : les échelles de matériau, du système technique, de l'espace intérieur, du bâtiment et du voisinage. Cette approche permet d'explorer la myriade d'impacts qu'un nouveau matériau et système architectural a potentiellement sur la profession d'architecte, l'industrie de la construction et le public.

Certains aspects de l'architecture sont une science exacte et quantifiable, d'autres sont qualitatifs et incommensurables par les méthodes scientifiques actuelles. L'observation à travers cinq lentilles différentes permet des explorations variées telles que : l'étude des caractéristiques architecturales du matériau du mur vivant en béton et des possibilités de leur coulage en place ou de leur préfabrication (échelle matérielle); un examen détaillé du fonctionnement d'un système de mur végétal complet et fonctionnel avec irrigation en boucle fermée et de l'impact potentiel du système sur le bâtiment au-delà de l'enveloppe (échelle du système); l'évaluation des effets spatiaux intérieurs de variations subtiles sur la configuration géométrique d'un mur vivant en béton, comment les variations de la forme intérieure peuvent bénéficier du mur vivant, et comment ces décisions peuvent générer des expériences sensibles (échelle de l'espace); l'intégration de la matérialité par la conception systémique et celle des espaces intérieurs impactés par des murs vivants en béton dans plusieurs propositions de projets complets proposées (échelle de construction); et l'étude, au-delà de l'impact individuel de ce nouveau matériau et système, de ses impacts potentiels sur le voisinage immédiat et sur le tissu urbain plus vaste auquel il est relié (échelle du quartier). Chacune de ces recherches, une section pour chacune des cinq échelles, est présentée à l'appui de propositions architecturales.

L'objectif principal de cette thèse dans la discipline architecturale est d'étudier si et comment les murs vivants en béton peuvent conduire à repenser l'architecture en réponse à notre problématique : l'architecture peut-elle contribuer à réduire les effets négatifs de surpopulation et de changement climatique ? Une stratégie ascendante pour répondre à cette question aborde le problème de manière systémique. La prémisse est que les villes sont, en grande partie, la somme de ses bâtiments ; les bâtiments sont, en grande partie, la somme de leurs systèmes constructifs. Par conséquent, une approche visant à améliorer les villes serait de transformer les systèmes utilisés pour créer les bâtiments. Une stratégie architecturale est proposée qui consolide l'hypothèse que les murs vivants en béton peuvent être un outil architectural pour effectuer des

changements à l'échelle de la ville visant à atténuer les conséquences néfastes de la surpopulation et du changement climatique.

F.1.5.1. Échelle matérielle

Pour qu'un mur vivant en béton soit accepté comme un matériau de construction viable, il doit avoir une cohérence systématique et établir des liens logiques avec les moyens et méthodes existants de construction et de pratique architecturale. Ce défi confronte tous les nouveaux matériaux à leur acceptation dans le lexique de l'architecte.

Tous les obstacles que les murs vivants doivent franchir proviendront de leurs caractéristiques et propriétés intrinsèques, c'est-à-dire architecturales, mécaniques, physiques, structurelles, écologiques, pratiques, praticables (réalisables) et bien sûr économiques. Et, bien que les propositions matérielles présentées aient été conçues pour toucher tous ces domaines, l'investigation se concentre sur les qualités architecturales et constructives du matériau : l'une des caractéristiques uniques du système de mur vivant en béton de cette thèse est sa mise en place. Sa méthode de construction est singulière dans le domaine des murs vivants car c'est un matériau mural qui peut être coulé sur place. Bien sûr, la préfabrication est également une option, elle a aussi été couverte.

Le système de mur vivant en béton diffère des systèmes de murs vivants existants en premier lieu en termes économiques. Les conséquences de cette économie définissent les caractéristiques architecturales de ce matériau.

Presque tous les autres systèmes de murs vivants sont installés avec leurs plantes dans un stade juvénile. Cette solution est plus chère qu'un épandage simple d'un substrat ensemencé. Les jeunes plants sont élevés pendant plusieurs mois dans une pépinière, souvent dans des conditions idéales et rarement dans un environnement correspondant à leur microclimat, à l'air libre. Par conséquent, les systèmes de murs vivants typiques prévoient une perte de 30% des plantes lors de leur premier hiver et de 10 à 15% de remplacement des plantes chaque année par la suite. Un stade de germination peut-être plus proche des conditions de vie éventuelles des semis peut abaisser un pourcentage significatif de pertes annuelles de plantes.

Les systèmes de murs vivants existants typiques ne sont pas conçus pour présenter toutes les étapes du développement de la plante et nécessitent une couverture végétale uniforme ; les zones ouvertes ou les lacunes du système sont jugées inacceptables. En effet, celles-ci exposent les matières plastiques ou textiles qui portent les plantes (qui peuvent être visuellement choquantes) ou rompent simplement l'homogénéité de la couverture en envoyant un message symbolique au public diamétralement opposé aux motivations pour lesquelles le client a payé, c'est-à-dire représenter la santé naturelle et l'abondance (et non la faiblesse, la carence en ressources, la maladie ou tout autre symptôme de mauvaise santé).

Les matériaux des murs vivants en béton exigent que nos yeux acceptent et apprécient toutes les étapes de la vie dans le monde naturel. Au cours de la première année, le mur traverse une étape pendant laquelle l'expression est dominée par le substrat, il pourrait par exemple apparaître principalement comme une structure en terre. Au cours des étapes ultérieures, le substrat peut réapparaître et un motif zonal apparaît en visibilité permanente. S'il est manipulé adroitement dans sa conception et sa réalisation, cet affichage apporte une valeur ajoutée à l'expression architecturale des murs vivants en béton, celle d'une présentation honnête des cycles de vie naturels intrinsèques à sa matérialité.

C'est potentiellement un matériau local. Les matériaux de murs vivants en béton peuvent exprimer leur localité, leur région. Les espèces végétales envahissant le mur seront des espèces endémiques, typiquement annuelles. Lorsque les plantes meurent, les espèces pérennes initialement choisies peuvent éventuellement reprendre l'espace envahi. Pourquoi ? Elles sont aussi des espèces endémiques. S'il existe une zone sèche dans la surface du matériau ou si le matériau est pourvu d'une section dont le microenvironnement nie la vie, alors le substrat est exposé. La terre locale est alors visible. Si des plaques nues arrivent et que le substrat disparaît, les agrégats du béton perméable sont révélés. Les pierres locales sont alors à nu.

C'est potentiellement un matériau dynamique. Il passe par une série de métamorphoses qui modifient la profondeur. Il change de couleur, il bouge. La morphologie du matériau est en constante évolution.

C'est potentiellement un matériau fonctionnel. Comme tous les systèmes de murs vivants existants, les matériaux du mur vivant en béton ont des avantages à la fois publics et privés. Ils peuvent embellir, réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain et améliorer la qualité de l'air extérieur. Ils stimulent la création d'emplois locaux, créent un sentiment d'enveloppement et de confidentialité. Ils améliorent l'efficacité énergétique et réduisent le bruit et la pollution de l'air. Enfin, ils offrent un retour sur investissement en raison de leur potentiel de commercialisation et de leur capacité à augmenter la valeur des propriétés. Cependant, ce qui sépare les murs vivants en béton de ces autres systèmes est lié à leur avantage économique : toutes les caractéristiques susmentionnées peuvent être offertes à une échelle auparavant jamais imaginée.

C'est potentiellement un matériau biophilique. Il promeut la biodiversité, la santé et le bien-être. En regardant une tempête par la fenêtre, la première chose que l'on regarde est le ciel. La deuxième chose que nous observerons est un arbre, si le vent plie l'arbre ou le balance. Nous observons les rafales créer le chatolement cinétique des feuilles d'un arbre. Nous lisons les arbres parce qu'ils matérialisent l'invisibilité du vent. Ils sont meilleur baromètre de la saisonnalité que nos thermomètres. Lorsqu'il n'y a pas d'arbre dans notre champ de vision, ou lorsque les arbres seuls ne suffisent pas, le mur vivant en béton, comme un arbre, communique. Ses feuilles sont soufflées par le vent ; les brins d'herbe à poil long tracent l'éphémère mouvement du vent. Ses métamorphoses enregistrent les changements de saisons. A proximité de sa surface, on verra un écosystème de vie imprévu sur un mur, mais avec un moment de concentration, nous sommes reconnectés au monde naturel. C'est pour cette raison que le matériau du mur vivant en béton doit être composé en vue de permettre l'entrée de l'extérieur à l'intérieur. Sa caractéristique d'économie lui permet de se réaliser, et ses propriétés biophiliques aident à restaurer la nature dans le milieu urbain.

Enfin, l'un des aspects essentiels qui le distinguent de tous les systèmes de murs vivants est qu'il s'agit d'un matériau multi-matériaux fusionné en un seul. Le matériau se compose de trois sous-matériaux : le support structurel, le béton perméable et le substrat. Les trois sous-matériaux sont combinés sur le site selon différentes temporalités, et une fois réunis, fusionnent en un seul matériau. Les autres systèmes de murs vivants contemporains se constituent de matériaux individuels se réunissant pour former un système. L'avantage réside ici dans le fait que les composants individuels peuvent être remplacés si nécessaire. L'inconvénient, qui accentue l'avantage du matériau de mur vivant en béton, est que d'autres systèmes de murs vivants ont une obsolescence programmée, tandis que le matériau de mur vivant en béton durera toute la vie du bâtiment.

F.1.5.2. Échelle du système

Pour mieux comprendre le mur vivant en béton en tant que système, il faut d'abord comprendre comment ses caractéristiques matérielles impactent sa fonction future ; c'est la porte qui conduit notre compréhension du niveau matériel à la conceptualisation de ses besoins systémiques. Une fois que ses besoins systémiques sont explicités, il est possible d'envisager comment le système de mur vivant en béton peut être intégré dans l'enveloppe d'un bâtiment. Une fois que son intégration dans l'organisation plus large d'un bâtiment est bien cernée, il est possible d'émettre des hypothèses sur les potentialités qui distinguent le système de murs vivants en béton par rapport aux autres systèmes muraux vivants, et de même pour les systèmes d'enclos extérieurs.

Cette thèse pose plusieurs avantages des murs vivants en béton par rapport à d'autres systèmes de murs vivants, y compris une meilleure économie, à la fois en termes de frugalité et d'efficacité de la gestion des ressources. Le plus important de ces avantages provient du couplage du système structural avec le système de cloison vivante, ce qui permet de partager une partie du coût du mur vivant avec une partie des coûts pour l'enceinte murale extérieure. C'est un rôle inédit pour les systèmes de murs vivants contemporains. Deuxièmement, les murs en béton ne nécessitent pas de remplacement régulier, car ils sont fabriqués avec des matériaux ayant la même durabilité que le système de murs extérieurs. En termes de longévité, cela équivaut à l'avantage des matériaux de façade traditionnels par rapport aux murs vivants contemporains. En outre, il rend les murs vivants en béton plus compétitifs que les systèmes de murs vivants contemporains dont la durée de vie est basée sur les plastiques à partir de laquelle ils sont construits – qui est inconnue ou estimée entre deux et cinq décennies ; estimations qui soulignent le fait que la plupart des systèmes ne vivent pas assez longtemps pour avoir fait leurs preuves. Les avantages à long terme peuvent être moins intéressants pour l'intention des investisseurs sur le profit à court terme, mais cette durabilité a un avantage de coût calculable. Troisièmement, les murs vivants en béton nécessitent moins d'entretien que les autres systèmes de murs vivants. Bien que certaines tâches de maintenance restent les mêmes, par exemple, des inspections

visuelles régulières du système mural, un entretien régulier du système d'irrigation, et l'identification et l'élimination des espèces végétales qui peuvent endommager le mur ; comme c'est le cas avec les grandes plantes ligneuses. Mais les coûts annuels de remplacement des plantes sont évités avec des murs en béton, car leur objectif esthétique est différent de celui des murs végétaux standards qui nécessitent en moyenne 30% de remplacement après le premier hiver et 10 à 15% de remplacement annuel des plantes. Les lacunes dans la végétation ne sont pas tolérées sur le mur vivant type. Alors que pour les murs vivants en béton, l'hétérogénéité d'aspect est l'une des caractéristiques du matériau : les murs vivants en béton sont censés rester relativement dominants pour former leur propre esthétique de plantes endémiques auto-ensemencées pour compléter les espèces locales de plantes initialement semées. Quatrièmement, les murs en béton ne nécessitent pas de système de fertigation comme c'est le cas pour d'autres systèmes. Cela signifie une économie de coûts de tout le matériel, l'équipement et les utilités nécessaires pour acheter, remplir, stocker, mélanger et distribuer les produits chimiques utilisés pour fertiliser le système de mur vivant typique. Cinquièmement, comme pour les systèmes de murs vivants hydroponiques à base de feutre, mais contrairement aux systèmes utilisant la terre, les murs vivants en béton nécessiteront moins de la moitié des lignes d'irrigation nécessaires pour desservir le mur vivant. Généralement les murs en béton doivent avoir des lignes d'irrigation installées à chaque étage, soit environ tous les 2,5 m. Cela signifie une économie de matériaux tels que la tuyauterie, mais cela signifie également moins de vannes électromagnétiques et de régulateurs de pression, et cela réduit les coûts d'inspection et de remplacement de la partie émetteur du système d'irrigation.

En ce qui concerne les avantages des murs en béton par rapport aux autres matériaux standard, les murs en béton partagent les avantages de la plupart des systèmes muraux vivants, en particulier pour promouvoir la conception biophilique, capturer les polluants atmosphériques, réduire la pollution sonore, réduire l'effet d'une source naturelle de refroidissement, ajouter de la vie privée à un lieu et promouvoir la biodiversité. Mais les murs vivants en béton ont aussi l'avantage d'être « programmés » pour s'adapter aux changements climatiques. Puisque leurs espèces végétales sont des variétés locales, on suppose qu'elles s'adapteront à leur environnement à mesure que leur environnement change. Au fur et à mesure que les régions se réchauffent et que les plantes des régions plus chaudes commencent à s'installer dans des régions autrefois plus fraîches, on s'attend à ce que les murs vivants en béton suivent leur cours. De même, les mêmes adaptations peuvent se produire avec des murs vivants en béton face aux changements micro-environnementaux que subissent toutes les villes en évolution, par exemple lorsqu'un nouveau bâtiment est construit et projette une ombre sur le mur vivant en béton. Avoir une surface qui peut s'adapter à son environnement est une caractéristique dynamique qui distingue les murs vivants en béton des systèmes d'enceintes de bâtiments standards.

Les avantages mentionnés ci-dessus peuvent altérer les idées préconçues sur les murs, mais pour changer le paradigme du mur vivant comme matériau de façade, les voir comme un système nécessite de repenser le rôle que jouent les murs vivants sur un bâtiment ; un changement conceptuel obligatoire si les murs vivants doivent proliférer. L'économie peut être au cœur de ce besoin de ré-conceptualisation, et les murs vivants en béton de cette thèse sont un moyen de résoudre le problème du coût en capital, mais une autre dimension du coût des murs vivants entrave leur prolifération, c'est leur consommation d'eau ; les coûts sont financiers et environnementaux.

Les murs vivants en béton, comme les murs vivants contemporains les plus économes en eau, nécessitent en moyenne 1 litre d'eau par mètre carré et par jour. Et l'eau doit être relativement propre : si elle est recyclée, elle doit être filtrée avant d'entrer dans la tuyauterie de distribution d'eau pour éliminer les particules susceptibles de bloquer la distribution de l'eau.

Compte tenu du besoin d'un volume d'eau propre important, le seul moyen de rendre les murs vivants défendables est de rendre leur consommation d'eau écologiquement viable. Pour ce faire, il existe une double stratégie, les deux parties sont inséparables. À quelques rares exceptions près, tout mur vivant construit dans des climats tempérés à l'aide de plantes vivaces n'ayant pas recours à cette stratégie n'est pas un système écologiquement viable. La solution en deux parties est la suivante : limiter le volume d'eau d'irrigation utilisé aux quantités strictement nécessaires pour les besoins minimaux de plantes saines et utiliser de l'eau captée et/ou recyclée. Ce dernier prérequis impose un changement paradigmatique dans la conception des murs vivants : les murs vivants ne peuvent plus être conçus comme un élément planaire de base.

Les architectes doivent conceptualiser les murs vivants dans les vraies proportions géométriques : un organisme vivant dont les tentacules s'étendent horizontalement et verticalement ; si l'eau de pluie doit être captée pour répondre aux besoins d'irrigation d'un mur vivant, alors les surfaces et les dispositifs utilisés pour recueillir l'eau de pluie sont également partie essentielle et inséparable du système de mur vivant. Par exemple, si le toit d'un bâtiment est utilisé pour capter l'eau de pluie, la partie horizontale du toit fait partie du système de murs vivants. Il en va de même pour les surfaces horizontales des terrasses du bâtiment, si elles sont utilisées pour recueillir l'eau de pluie, elles font également partie du système de murs vivants. De même, si l'eau de pluie doit être stockée dans un réservoir pour approvisionner le mur vivant en eau pendant les périodes sèches saisonnières, alors le réservoir souterrain - ou au-dessus du sol - fait également partie du système de mur vivant. Ces éléments et d'autres sont essentiels à la fonction écologique des murs vivants, et ils élargissent leur enveloppe géométrique ; ils aident également à rendre la tridimensionnalité du système plus facile à visualiser.

Une stratégie pour abaisser davantage le coût des murs vivants en béton est d'identifier ses potentialités en tant que système pour améliorer les défis habituels auxquels sont confrontés les murs extérieurs. L'hypothèse est contre-intuitive : utiliser le système de mur vivant en béton pour empêcher l'eau de fuir à l'intérieur du bâtiment. À première vue, cette proposition semble irréaliste du fait que les architectes consacrent leur carrière à éloigner l'eau de l'enveloppe du bâtiment tandis que les murs vivants font le contraire, recouvrant intentionnellement d'eau le mur extérieur. Le mur vivant en béton vise à transformer cet inconvénient potentiel en un avantage en conceptualisant le mur vivant en béton comme un système d'écran pare-pluie.

Dans le cadre de l'échelle du système, une proposition a été faite d'utiliser le système de mur vivant en béton pour aider à refroidir le bâtiment, et pour cela, deux potentialités ont été identifiées. Le premier système adapte le système de refroidissement adiabatique à refroidissement libre pour aider à maintenir le bâtiment au frais lorsque la température de l'air ambiant (extérieur) est inférieure à la température de l'air de l'intérieur du bâtiment. Cette proposition est supposée profiter aux bâtiments dans les zones à faible humidité et les climats tempérés à la fin de l'automne, en hiver et au début du printemps, mais elle est aussi un avantage significatif toute l'année pour les centres de données. Le deuxième schéma propose d'enchaîner la circulation de l'eau du mur vivant en béton avec le système centralisé d'eau glacée généralement utilisé pour refroidir les grands bâtiments commerciaux.

F.1.5.3. Échelle spatiale

Construction ou architecture ?

Les cinq échelles du chapitre 10 commencent par définir les caractéristiques du mur vivant en béton et les propriétés matérielles, essentielles pour comprendre la valeur de ce nouveau matériau. La première échelle « matériau », explore comment la matérialité des murs vivants en béton peut servir de meilleure enveloppe de mur extérieur. La deuxième échelle « système », définit comment répondre aux besoins systémiques des murs vivants en béton pour leur permettre de s'adapter aux moyens, aux méthodes et aux matériaux de la construction contemporaine ; des adaptations qui peuvent augmenter la probabilité que leurs écosystèmes durent toute la vie du bâtiment. Alors que ces besoins systémiques concernent principalement les aspects techniques de la construction et que les arguments sont essentiellement quantitatifs, la troisième échelle de « l'espace », a été explorée qualitativement, car la capacité de construire un mur vivant en béton ne lui garantit pas pour autant des qualités au niveau de l'architecture.

Mais comparé aux phénomènes architecturaux connus, quelque chose de nouveau se produit ici dans cette thèse. Selon Zumthor, « l'architecture est exposée à la vie. Si son corps est suffisamment sensible, il peut assumer une qualité qui témoigne de la vie passée ». Peter Zumthor fait référence à des vies passées dans l'espace même qu'il habite actuellement, et comment cette conjecture sur les échos temporels du passé l'emporte sur d'autres mesures de qualité spatiale. Ceci est également différent de la référence de George Nakashima à la seconde vie d'un arbre tombé, c'est-à-dire, comment le bois autrefois vivant revivra, cette fois au service de l'homme. La différence entre les assertions de Zumthor et de Nakashima et ce qui est investigué dans cette thèse réside dans le matériau physique, puisque le mur vivant en béton est lui-même vivant. C'est, il est comme tous les autres matériaux qui servent à former le théâtre de nos vies, mais, contrairement au bois, il est toujours vivant. Cette animation est différente de tout autre matériel architectural. Comment cette nouvelle dimension vivante affecte-t-elle l'espace ? Comment les murs vivants en béton de cette thèse affectent-ils l'espace différemment des autres matériaux ; par rapport à d'autres systèmes de murs

vivants ? Comment impactent-ils les formes des espaces qu'ils permettent de définir ? Et ces espaces peuvent-ils être sculptés au profit des murs vivants ? Les espaces seront-ils améliorés du fait de leur intégration ? Et si oui, comment ? Des phénomènes nouveaux se produiront-ils ? Des phénomènes inattendus ? Une vaste exploration spatiale est présentée dans le chapitre 10 « l'espace », qui visait à répondre à ces questions et à trouver des moyens par lesquels les murs vivants en béton sont capables d'améliorer le cadre de nos vies.

Trois approches de cette recherche spatiale ont été suivies. La première approche est formelle, il s'agit d'une exploration de la façon dont les murs vivants en béton affectent la forme architecturale. Deux études formelles sont examinées ; chacune avec un ensemble propre de critères pour aider à rendre le caractère subjectif des critiques aussi contrôlé que possible. La deuxième approche est temporelle, la saisonnalité et le cycle de vie sont observés dans deux études pour déterminer quels effets spatiaux peuvent résulter de la présence d'un matériau vivant sur le mur qui change constamment. Enfin la troisième approche est sensorielle, des configurations spatiales et des effets sont recherchés en vue de maximiser les réactions sensorielles, et trois études ont été proposées pour l'analyse.

Les approches formelles, temporelles et sensorielles sont superposées à la typologie spatiale. Les études examinent à la fois l'espace intérieur et extérieur, puisque l'extérieur offre également de nombreuses possibilités de définition spatiale. Les espaces intérieurs et extérieurs sont divisés en deux sous-catégories, publique et privée, et les espaces privés sont subdivisés en deux types, les espaces communs, par exemple, les salons et les salles à manger, et les espaces véritablement privés ; par exemple, les salles de bains et les chambres. Chaque catégorie est examinée.

Les matériaux des murs vivants peuvent affecter un espace de manière formelle, temporelle et sensorielle. Les murs vivants peuvent affecter la façon dont l'espace est vécu. Les études formelles montrent qu'ils ont un effet sur notre perception des proportions. Par conséquent, des parois vivantes peuvent être utilisées pour concevoir la forme de l'espace, par exemple sa configuration ou sa géométrie. Le degré de cet impact est basé sur le climat local et le microclimat, les exigences programmatiques, les décisions de conception de l'architecte, les choix de design intérieur, les besoins systémiques du mur vivant et les changements temporels des plantes, son écosystème. Les murs vivants affectent l'espace en fournissant une connexion entre l'environnement artificiel et le monde naturel.

Comprendre comment les murs vivants en béton impactent l'espace différemment des autres systèmes de murs vivants commence avec leur saisonnalité, qui sera plus accentuée avec des murs vivants en béton. D'autres systèmes de murs vivants peuvent compter sur des espèces végétales exotiques pour donner une apparence persistante, ce qui réduit le contraste visuel entre les saisons. En termes de conception biophilique, les systèmes de murs vivants qui peuvent accueillir de plus grandes plantes auraient un avantage sur les murs vivants en béton ; ils pourraient avoir une plus grande variété de plantes avec une plus grande tridimensionnalité, donnant au concepteur une plus grande gamme d'effets spatiaux à explorer. Autrement, les différences entre les murs vivants en béton et les autres systèmes sont mineures en termes d'impact spatial.

Inversement, les murs en béton présentent un avantage en fonction de leur méthode de construction. La plasticité du béton - un résultat de son état liquide - confère une flexibilité pour adopter une gamme de formes plus large que la plupart des autres systèmes de murs vivants, en particulier ceux avec des contraintes modulaires. Jusqu'à présent, l'avantage principal d'un mur de béton réside dans la combinaison de son économie avec son esthétique inhabituelle. Son économie supposée permettrait d'utiliser plus généreusement les murs vivants, et le contraste frappant de son apparence par rapport à d'autres systèmes plus maniérés aboutit à l'expression locale de la flore et à une apparence changeante qui assurera une expression naturelle plutôt qu'artificielle. Parce que sa tridimensionnalité est différente et son apparence peut être hétérogène, c'est-à-dire que si des plantes homogénéisatrices comme l'herbe ne sont pas choisies, le concepteur doit s'attaquer à ces facteurs pour optimiser les effets spatiaux. En conséquence, pour obtenir les avantages désirés des murs vivants en béton, leurs qualités intrinsèques auront un plus grand impact sur la forme architecturale que les autres systèmes de murs vivants.

Les murs vivants en béton, qui définissent partiellement l'intérieur d'un espace, impactent sa forme de trois manières. D'abord, l'espace extérieur peut sembler faire partie du volume intérieur. Lorsqu'un mur vivant en béton devient un élément extérieur qui est visible depuis un espace intérieur, cet espace extérieur capturé par le mur vivant est défini, et cet espace défini est perçu comme étant ajouté à l'espace intérieur. Deuxièmement, les murs vivants en béton peuvent dynamiser l'espace. Enfin, la troisième voie est une

conséquence des fondements du fonctionnement du mur : les besoins des murs auront préséance sur certains des facteurs programmatiques non critiques.

L'espace peut être sculpté au profit des murs vivants. L'étude « entrée publique » montre comment un mur vivant en béton modifie de manière significative la conception et la matérialité de l'espace. De plus, dans l'étude de la « terrasse privée », non seulement la forme de la terrasse extérieure est sculptée au profit du mur vivant, mais la surface du mur vivant lui-même est sculptée au profit de la vie végétale.

Les espaces peuvent être améliorés par des murs vivants si les principes de conception biophilique sont activés. Ou cela peut être fait si le design conceptuel de l'espace est fait avec les qualités architecturales du matériau comme un facteur déterminant, comme on le voit dans l'étude « terrasse privée ».

La façon dont les murs vivants en béton sont utilisés pour impacter les espaces intérieurs influencera l'approche architecturale de la conceptualisation de l'enveloppe extérieure, ce qui impacte à la fois la forme intérieure et extérieure. Parce que l'espace intérieur est presque toujours agrégé, comme nous l'avons vu dans les plans dentelés de l'étude « chambre », un chemin prometteur vers de nouvelles potentialités de forme architecturale suit, comme c'est toujours le cas lorsque de nouvelles règles de conception sont suivies. Si les murs extérieurs en béton sont utilisés pour impacter l'espace intérieur, ils brouillent la ligne de perception entre l'intérieur et l'extérieur. Cette approche - à travers l'agrégation de l'espace - a un impact sur la forme extérieure.

F.1.5.4. Échelle du bâtiment

Les recherches architecturales de ce chapitre démontrent le potentiel des murs vivants en béton pour changer la façon dont les bâtiments sont organisés et construits. Les murs en béton peuvent avoir un effet significatif sur l'architecture en termes de forme, de fonction et, par conséquent, d'expérience sensible. Les effets formels ne sont pas nécessairement démesurés, ils peuvent aller du dynamique prononcé à l'imperceptible. Cependant tous les effets formels ne pénètrent pas la conscience de l'occupant d'un bâtiment, un paysage bucolique rendu possible par un parking souterrain ne télégraphie pas sa raison d'être.

La recherche des caractéristiques systémiques ou biophiliques d'un mur vivant en béton sert de point de départ pour définir la forme et peut alors susciter une réponse formelle novatrice. Une fois les besoins de la façade déterminés, les espaces intérieurs sont affectés par les exigences formelles de la façade.

Indépendamment de l'approche, les exigences pour que la végétation prospère sur un mur vivant en béton demeurent les mêmes. Si l'approche architecturale de la conception d'un bâtiment n'est pas affectée par la présence du mur de béton, les besoins du système limitent les solutions conventionnelles. En d'autres termes, si les facteurs qui impactent la forme d'un bâtiment incluent les exigences des murs vivants en béton, et si le style et l'expression du bâtiment sont prédéterminés, alors les possibilités de ces expressions sont réduites par l'inclusion des besoins du mur vivant en béton comme facteurs de conception.

F.1.5.5. Échelle du quartier

Les propositions présentées dans la cinquième échelle – celle du voisinage – entendent manifester l'idée de transformer les quartiers en réseaux à relations mutualistes et / ou commensales. Ils visent à montrer comment un système architectural peut être utilisé comme outil pour étendre son impact au-delà des limites de l'échelle du bâtiment. En déployant le système pour lier physiquement des éléments séparés dans la ville, le nouveau système lui-même devient un outil pour créer des relations symbiotiques mutualistes et commensales. Ces relations exigent que le matériau quitte les limites du voisinage immédiat d'un bâtiment et de sa fonction, et le relie au fonctionnement plus large du réseau qu'il aide à créer. Ce faisant, les propositions deviennent un symbole de la responsabilité d'une ville d'atteindre un équilibre entre ses propres besoins et l'impact qu'elle a sur son environnement. Ces impacts impactent toute la vie de la ville, y compris les humains, la flore et la faune. En tentant d'étendre la nature dans le milieu urbain et d'interconnecter ses objets au sein du réseau de la ville, les propositions de voisinage projettent une expression de la nature qui ne cache ni ne néglige son expression anthropique.

F.2. Conclusions et remarques de clôture

Contrairement à d'autres matériaux utilisés pour entourer l'espace, un mur vivant porte les organismes vivants. Et pour maintenir ces organismes vivants, le matériau lui-même doit être conceptualisé en tant que partie d'un organisme plus grand. Les besoins de cet organisme plus vaste sont bien plus qu'un simple matériau peut satisfaire, et quand on l'appréhende dans toute sa tridimensionnalité, il est impossible de revenir à l'idée qu'un mur vivant est simplement un matériau de façade, ce qui explique pourquoi le mur en béton vivant de cette thèse est structuré comme une composante primaire d'un organisme plus vaste.

Incontestablement, c'est seulement avec le soutien de cet organisme plus grand que le mur vivant en béton peut à son tour soutenir la vie végétale. Pour survivre, les plantes doivent avoir une lumière suffisante et un accès périodique à l'eau. Leurs besoins en éclairage proviennent de l'orientation solaire du mur, tandis que leurs besoins en eau nécessitent un réseau de support d'éléments en interaction, par exemple l'eau de pluie captée et stockée, les tuyaux d'irrigation, les gouttières, les capteurs d'humidité et les pompes. Répondre aux besoins des plantes leur permet de durer, mais ils ne sont pas les seuls besoins de l'enveloppe murale. Pour fonctionner efficacement, le mur vivant en béton, comme tout type de mur doit le faire, devra satisfaire à divers degrés les besoins structurels, thermiques, acoustiques, mécaniques, électriques et esthétiques du bâtiment. Ces besoins nécessitent un réseau de soutien d'éléments interdépendants. Tous ces éléments interdépendants, par exemple des renforts en acier, des isolants de bâtiment, des revêtements acoustiques, des composants de structure qui acceptent des sorties mécaniques et électriques et des surfaces murales finies, permettent au mur vivant en béton de répondre aux besoins d'une enceinte murale extérieure. Ensemble, ce réseau d'éléments interdépendants et interactifs constitue le système de murs vivants en béton.

Cependant, pour les acteurs dans le secteur du bâtiment, y compris les architectes, les murs vivants sont toujours considérés comme une façade, pas un système. Cela explique en partie leur prix élevé inattendu. Le coût des éléments en interaction du système, par exemple le système d'irrigation et ses composants, augmente le prix installé au-delà de ce que l'industrie est habituée à dépenser sur une façade extérieure. Si, comme conjecturé, les coûts de construction sont deux fois supérieurs au prix nécessaire pour leur permettre de proliférer, alors, quand leurs coûts d'entretien sont ajoutés, les murs vivants deviennent pratiquement inaccessibles sur des projets avec des budgets modestes.

Ceci nous amène à la question de l'économie, le saint graal des murs vivants ; il est fort probable que ce soit la seule façon pour les murs en béton de devenir une partie normalisée du paysage urbain : en devenant considérablement moins cher que les murs vivants existants disponibles sur le marché actuel. La méthodologie proposée pour évaluer cette hypothèse commence par identifier les qualités que le mur vivant en béton pourrait avoir pour satisfaire les besoins des murs extérieurs existants - y compris les autres murs vivants - et en posant les intérêts systémiques que des murs en béton peuvent avoir sur tout le bâtiment. Ces explorations indiquent que les murs vivants en béton peuvent offrir des avantages économiques considérables par rapport aux systèmes de murs vivants existants, notamment :

- L'avantage du mur en béton porteur qui permet de partager son coût avec celui de la superstructure du bâtiment (les autres systèmes de murs vivants sont non structurels) ;
- Leur longévité qui leur permet d'avoir la même durée de vie que le bâtiment (même les composants primaires des autres systèmes de murs vivants nécessitent un remplacement périodique) ;
- Les murs en béton peuvent être coulés sur place, ce qui leur confère la même plasticité que le béton standard; les murs vivants en béton ont donc une flexibilité formelle qui n'est possible qu'avec les murs hydroponiques à base de feutre ; aucun autre mur vivant et peu de matériaux conventionnels peuvent accomplir les mêmes possibilités formelles et structurelles ;
- Une surface habitable pouvant s'adapter à son environnement ; une caractéristique dynamique qui distingue les murs vivants en béton des systèmes d'enveloppes de bâtiments standards ;
- Ils nécessitent moins d'entretien que les autres systèmes de murs vivants qui ont des coûts annuels de remplacement des plantes ;

- Les murs en béton ne nécessitent pas de système de fertigation comme c'est le cas sur d'autres systèmes ;
- Ils nécessitent moins de la moitié des lignes d'irrigation qu'un système de murs vivants sur sol.

En ce qui concerne la comparaison entre les murs en béton et les murs extérieurs conventionnels, les murs en béton vivant partagent les mêmes avantages que les autres systèmes de murs végétalisés, en ce sens qu'ils peuvent :

- Augmenter la présence de la nature et les avantages de la conception biophilique associés ;
- Capturer les polluants atmosphériques ;
- Diminuer la pollution sonore ;
- Réduire l'effet d'îlot de chaleur ;
- Fournir au bâtiment une source de refroidissement naturel ;
- Ajouter de la convivialité dans les espaces publics ;
- Promouvoir la biodiversité.

Si le nouveau système de béton vivant devient opérationnel, les architectes pourraient tirer parti de tous les avantages de conception ci-dessus. Les architectes pourraient exploiter la flexibilité du mur vivant en béton comme un système coulé sur place et sa plasticité pour donner forme à leurs conceptions géométriques, et regrouper la capacité structurelle et la maintenance réduite, inhérents aux murs à faible coût, pour satisfaire les besoins budgétaires de leurs clients. La liberté qu'offrent ces avantages potentiels, ainsi que tous les autres énumérés ci-dessus, pourraient permettre aux architectes, urbanistes et urbanistes d'augmenter significativement la prolifération des murs vivants dans nos villes, mais seulement si leurs efforts aboutissent à réduire les coûts systémiques.

La deuxième partie de la méthodologie pour réduire le coût des murs en béton a commencé en faisant l'hypothèse des avantages systémiques que les murs en béton pourraient apporter à l'ensemble du bâtiment. Un avantage possible réside dans l'utilisation de son potentiel intégré pour empêcher l'eau de fuir à l'intérieur du bâtiment, tel que détaillé dans la proposition du système d'écran pare-pluie. Cette proposition utilise la matrice perméable comme coussin d'air pour équilibrer la pression du vent agissant sur le bâtiment. Un autre avantage potentiel réside dans l'exploitation de la percolation de l'eau à travers sa matrice perméable pour aider à refroidir le bâtiment. Pour cela, deux possibilités sont envisagées : utiliser l'eau utilisée dans les tours de refroidissement sur le toit (tour aérorefrigérante avec ventilateur latéral ou sommitaux) pour alimenter le système de mur vivant en béton ; et exploiter leur potentiel de refroidissement par évaporation directe dans les centres de données (centre de traitement de données).

Accomplir la réduction des coûts d'un mur vivant signifie faire face à deux défis inséparables, l'un tangible et l'autre intangible. Le défi tangible peut être traité en changeant les caractéristiques physiques de la conception d'un mur vivant, comme illustré par les murs vivants en béton de cette thèse. L'autre défi est plus difficile à surpasser parce qu'il est intangible ; cela nécessite de changer la perception standard ; il faut cesser d'identifier un mur vivant comme un élément additif, post-construction ; les murs vivants doivent être considérés dans leur totalité comme un système indivisible. Ce n'est que par cette stratégie que des murs vivants respectueux de l'environnement peuvent être réalisés à un prix qui peut aider les villes à avoir plus de biodiversité.

En résumé, le travail de cette thèse vise à fournir un modèle pour améliorer la façon dont les défis des villes sont confrontés par une approche ascendante de la modification des systèmes qui sont utilisés pour construire des bâtiments. La théorie est la suivante : si les systèmes constituent les bâtiments et les bâtiments les villes, changeons les systèmes et nous changeons les villes. Les murs en béton sont proposés comme un nouveau système de construction capable d'étendre la présence de la nature dans les parties des villes qui en ont le plus besoin. L'espoir réside dans le fait que le nouveau système introduit la conception biophilique et

les avantages environnementaux de la végétation dans les villes comme une alternative viable et abordable aux systèmes de construction conventionnels. En effet, les villes sont notre expression, c'est-à-dire notre culture et nos valeurs, le rôle que les architectes peuvent jouer pour déterminer comment nous répondons aux difficultés futures peut être déterminant pour que les villes s'adaptent aux changements climatiques et à la surpopulation. Ces recherches déterminent notre courage en tant que gardiens de notre propre environnement. En théorie, « l'architecture est le véritable champ de bataille de l'esprit¹. »

F.3. Perspectives et autocritique

F.3.1. Utilisation mondiale

Y a-t-il un potentiel mondial ? D'autres tests pourraient évaluer la perspective de murs vivants en béton pouvant être accueillis dans toutes les régions habitables. Les facteurs critiques à considérer sont la forme, l'irrigation, la sélection des plantes et la disponibilité de matériaux d'origine locale. La forme du mur impacte l'exposition solaire, éolienne et pluviale du mur vivant ; particulièrement important dans les régions où les conditions météorologiques sont extrêmes, telles que les conditions chaudes et arides du désert et les régions subarctiques. De même, les conditions climatiques impactent le volume d'irrigation et le cycle d'écoulement. De plus, il est nécessaire de trouver et de tester des espèces végétales locales conformes aux critères discutés dans le chapitre 4. Une approche consiste à tester le nouveau système dans chacune des quatre grandes zones climatiques. Puisque les essais du LCR ont été effectués dans une zone tempérée, au moins trois tests supplémentaires ont pu être effectués dans les zones tropicales, subtropicales et froides. Pour être locale, la formule du matériau de la paroi vivante devra s'adapter à sa localisation, tant en ce qui concerne la sélection des substrats et des plantes que les composants en béton. Afin de rester économiquement compétitif dans toutes les régions, les matériaux locaux devront être obtenus. Lorsque les coûts de transport augmentent, l'agrégat de pierre devient un matériau de construction à forte énergie intrinsèque. Idéalement, le béton perméable incorporerait des graviers locaux pour les agrégats. Les graviers arrondis et lissés, comme ceux utilisés pour cette thèse, peuvent ne pas être disponibles localement. Par conséquent, des alternatives devront être considérées. Les matériaux recyclés sont une option possible, tout comme la pierre concassée dont les grains les plus fins sont retirés. La substitution des agrégats utilisés pour cette thèse par d'autres impacte la porosité et la résistance à la compression de la matrice en béton perméable. L'accent doit être mis sur le maintien de l'économie du système.

F.3.2. Système bouché

Un potentiel risque pour le nouveau système est la multiplication des racines végétales entravant la percolation de l'eau d'irrigation. Les racines des plantes iront partout où l'humidité est située, ce qui signifie que partout où l'humidité apparaît dans la matrice de béton perméable, les racines des plantes l'atteignent potentiellement. À mesure que le mur vivant en béton vieillit et que sa vie végétale mûrit, les racines peuvent obstruer les espaces interstitiels du béton perméable. Réciproquement, probablement, le tapis dense des racines dirige l'eau vers la surface du substrat. Une fois que les racines ne sont plus en contact avec l'eau, elles se fanent et finissent par se décomposer, la percolation intérieure reprendra vraisemblablement. Par conséquent, cela crée un phénomène cyclique affectant la croissance des plantes et l'apparence de la paroi vivante du béton.

F.3.3. Potentiel structurel

Un béton perméable structurel est-il réalisable ? Deux chemins existent. Le premier consiste à modifier les constituants de la nouvelle formule développée dans cette thèse, par exemple les agrégats (si l'emballage des agrégats est optimisé, le nombre de connexions de pont peut se multiplier). Deuxièmement, la masse du béton perméable peut être telle qu'elle devient autoportante, ce qui réduit le besoin d'avoir un système de support et conduit à la capacité portante du matériau perméable. On peut imaginer que le matériau de mur vivant en béton perméable utilisé comme barrières de circulation, barrières acoustiques, murs de jardin autoportants et colonnes de grande taille, par exemple, pour supporter une pergola de jardin ou une autre structure extérieure. Pourtant, le plus grand avantage du béton perméable ayant la plus grande résistance possible résiderait dans une gamme d'assemblages de murs la plus large possible, comme une coque extérieure plus forte le permettrait.

¹ CONRADS 1970, p. 154

F.3.4. Homogénéité de la couverture vivante

Acceptons-nous l'irrigation hétérogène ou affinons-nous le nouveau système de mur vivant en béton pour l'éliminer ? Si l'homogénéisation de la diffusion de l'irrigation est souhaitée, elle peut être réalisée par la combinaison de la sélection des plantes, de la méthodologie d'installation du substrat, de la composition du substrat et en contrôlant l'hétérogénéité par la structuration. Les plantes peuvent être sélectionnées pour rapidement former un réseau de racines proches de la surface du substrat. Si des substrats sont installés avec une épaisseur supplémentaire de 0,5 cm de substrat au-delà de la surface extérieure du béton perméable, et si la composition du substrat est renforcée pour résister à la décomposition mécanique entre le moment de l'installation et le développement racinaire, l'hétérogénéité de la distribution de l'eau inhérente au béton perméable peut être réduite.

F.3.5. Néologisme

Ce travail de thèse identifie la nécessité d'élargir le lexique architectural pour distinguer les différents types de matériaux composites. Nous proposons de définir un matériau composite comme étant composé de sous-matériaux qui, lorsqu'ils sont combinés, nécessiteraient de détruire ou d'endommager un ou plusieurs des sous-matériaux afin de séparer le matériau multi-matériaux dans ses composants de sous-matériaux d'origine ; et une fois fondus dans le multi-matériau, tous les sous-matériaux conservent leurs propriétés distinctives, ces propriétés pouvant être perçues dans leur forme construite. Il existe très peu d'antécédents en matière de multi-matériau. Un matériau tel que le béton armé ou une brique renforcée de paille n'est pas un multi-matériau car ils ne conservent pas l'expression de chacun de leurs composants individuels. Le béton est visible et non le ferrailage, de même pour la brique et la paille. La paroi vivante multi-matériaux est plus proche d'un alliage tel que l'acier inoxydable ferritique 18/0, qui exprime sa résistance mécanique et sa résistance à la corrosion. L'acier inoxydable 18/0 reste légèrement magnétique, révélant une propriété importante du fer lui-même. L'observateur du mur vivant en béton peut voir sa multi-matérialité. Chacun de ses sous-matériaux peut être vu et exprimé dans le matériau final. Quels sont les précédents architecturaux spécifiques qui peuvent être identifiés et étudiés, et quelles leçons cet exercice peut-il apporter susceptibles d'informer l'utilisation du mur vivant multi-matériaux ? Certains précédents sont par exemple les vitrages isolants, les unités de maçonnerie isolées en béton, les unités de maçonnerie en béton composite, par exemple celles ayant des faces en céramique, et l'isolation en nappe / feuille de papier.

F.3.6. Aération

Quels sont les avantages pour la santé des plantes d'exposer l'eau à l'air dans la matrice perméable de la paroi vivante en béton ? En d'autres termes, le mur vivant en béton est le seul système de mur vivant soutenu par une matrice poreuse qui permet à l'air de percoler et de circuler. Cette couche aérobie non organique doit avoir un certain effet sur l'eau d'irrigation transportant les éléments organiques ramassés lorsque l'eau entre en contact avec les plantes et d'autres organismes dans le substrat du sol. Quels sont les avantages et les inconvénients de cette aération intrinsèque ?

F.3.7. Écran pare-pluie ou cavité d'air

Un inconvénient qui réside dans la possibilité que des joints ou des facettes du béton perméable se trouvent sans substrat est que les ouvertures permettent plus de points d'accès pour que l'air pénètre, circule et sèche le système mural. Normalement, ceci est un avantage d'un système d'écran pare-pluie puisqu'il diminue l'infiltration d'eau dans l'intérieur du bâtiment. Cependant, pour avoir le moins d'impact sur la teneur en humidité disponible pour les plantes, ces ouvertures et leur « séchage » supplémentaire du système conduiront à l'inefficacité. Cela également augmenterait les coûts opérationnels du système.

F.3.8. Optimisation de l'irrigation

Une seule proposition d'espacement vertical a été testée pour l'irrigation des murs vivants en béton. Au moment où cette section est écrite, la hauteur maximale perméable du mur de béton pourvu d'une ligne d'irrigation à son sommet est de 2,55 mètres, c'est-à-dire, environ un étage de construction. Une étude plus approfondie doit être effectuée pour déterminer la distance verticale maximale entre les lignes d'irrigation horizontales, c'est-à-dire avant que l'hétérogénéité de la matrice ne dépasse une limite acceptable, et donc avant d'avoir un impact négatif sur la vie végétale.

F.3.9. Humidité capturée

Le nouveau système peut-il optimiser sa capacité de stockage d'eau intrinsèque ? Une « source » d'eau pour le mur vivant en béton sera constituée par les minuscules « mares » d'eau formées lorsque de petites quantités d'eau sont piégées à l'intérieur des espaces interstitiels mal drainés de la matrice en béton perméable. L'évaluation de ce potentiel est rendue compliquée par la distribution hétérogène de la pâte de ciment et l'emballage des agrégats, qui seront légèrement différents à la base du mur (pas du fait de la pression, mais de la force d'impact après la chute du béton lorsqu'il est versé par le haut). Cette hétérogénéité affectera certainement la topographie des espaces interstitiels et donc le pourcentage d'eau piégée. La quantité d'humidité disponible diminuera avec le temps avec l'évaporation et le drainage des pores presque bloqués, et ce changement temporel après un événement d'irrigation doit également être étudié. Le séchage des pores intérieurs sera irrégulier, car les bassins sécheront plus lentement lorsqu'ils sont grands et plus rapides lorsqu'ils sont petits.

F.3.10. Refroidissement adiabatique

La proposition de refroidissement adiabatique propose d'utiliser des différentiels de pression naturels et artificiels entre la cavité (créé par la porosité de béton poreux) du mur et l'intérieur et l'extérieur du bâtiment pour aider à évacuer la chaleur de l'intérieur du bâtiment [voir la section 10.2.2.3]. La proposition de refroidissement adiabatique suggère de tirer parti du tirage thermique inverse, ou l'effet cheminée inverse de l'été, pour aider à refroidir naturellement le bâtiment en utilisant l'enveloppe de bâtiment humide du mur vivant en béton. Cette potentialité nécessite une exploration plus poussée dans le domaine de la physique du bâtiment afin de déterminer si une solution optimisée peut réduire la consommation d'énergie d'un bâtiment.

F.3.11. Matériau composite avec AAC

Le fait de combiner la partie en béton perméable de la paroi de béton avec du béton cellulaire autoclavé (AAC) afin de fabriquer un matériau composite peut rendre le système plus léger et plus isolant thermiquement que le système de base proposé dans cette thèse. Cependant, étant donné que l'AAC est peu résistant à l'écrasement, une telle interface pose un défi et peut nécessiter une connexion mécanique avec un troisième ou un quatrième matériau. Une enquête plus approfondie est nécessaire.

F.3.12. Comme panneau d'isolation thermique

Les panneaux d'isolation thermique appliqués sur un mur extérieur, ou plus communément sur une surface de toiture, agissent pour réduire le transfert de chaleur des hautes températures, de l'extérieur d'un bâtiment vers l'intérieur. L'eau saupoudrée sur le panneau d'isolation thermique peut aider à abaisser la température de surface grâce au processus de refroidissement par évaporation. Pour que ce système soit efficace, une couche de surface rétentive est nécessaire afin d'assurer la préservation de l'humidité de la couche de surface (typiquement, par attraction capillaire, les molécules d'eau sont maintenues en suspension dans la couche rétentive et leur mouvement gravitationnel est ralenti à son rapport élevé de solide à vide). Le collage d'un panneau d'isolation thermique en béton perméable du système de mur vivant peut être réalisé par moulage par compression ou par collage. L'avantage du moulage par compression réside dans la surface accrue du panneau d'isolation thermique en contact avec le béton perméable. Une enquête plus approfondie est nécessaire.

F.3.13. Inspection et arrosage robotisées

Les deux hypothèses envisagées sont le système d'inspection et le système d'arrosage robotisés. Le système d'inspection robotique surveillerait les murs et capture des images / vidéos visuelles du mur vivant en béton ; alléger le besoin pour les spécialistes formés ou les botanistes qualifiés de contrôler le mur in situ, de porter des harnais, se hisser sur des balançoires ou s'élever sur des échafaudages ou des bômes afin d'inspecter le mur. Grâce au système robotique, un botaniste ou un autre spécialiste est en mesure de voir les images à distance et de faire des recommandations de maintenance basées sur les coordonnées GPS. Le système d'arrosage robotique fournirait l'irrigation de surface, l'irrigation par aspersion à partir de microémetteurs, pour compléter le système d'irrigation par égouttement dissimulé. Le système robotique peut être utilisé conjointement avec un système de capteur d'humidité intégré, fonctionnant en tandem avec les données d'humidité du mur, ou fonctionnant indépendamment des commandes automatisées. Le robot parcourerait les murs attachés à un harnais léger. Le tuyau, un tube flexible de diamètre étroit, serait attaché

à un tuyau rigide, segmenté sur les bâtiments hauts pour limiter le changement de la pression atmosphérique. Le tuyau d'évacuation stocke l'eau et la distribue au robot via le tuyau.

F.3.14. Effets de la couleur de la plante

Une étude plus approfondie est nécessaire pour apprendre comment les caractéristiques architecturales des murs vivants en béton sont modifiables par le placement intentionnel d'espèces végétales en fonction de leur couleur. Comme discuté dans l'étude « lumière en cour privée » sur l'utilisation de dégradés de couleurs de Gaudi [voir section 10.3.6], il existe beaucoup de trajectoires intéressantes à suivre pour apprendre à exploiter les propriétés intrinsèques de la couleur, de la texture, lustre, et l'adaptabilité d'orientation. Les deux voies d'intérêt sont : l'utilisation de couleurs contrastées ; comment l'apparence des plantes change en fonction de la favorabilité des conditions de croissance. Pour ce dernier chemin, les plantes soumises à un stress affichent les effets du stress, ce qui a des implications esthétiques. En outre, si un mélange de graines est utilisé avec une variété de plantes, en fonction de l'orientation du mur, certaines espèces de plantes sont favorisées par rapport aux autres, et cela aussi affecte l'esthétique du mur. Étudier le degré auquel cela affectera l'apparence du mur vivant en béton offre une nouvelle gamme de possibilités de conception pour exploiter ces données.

F.4. Épilogue

Méthodologie de recherche interdisciplinaire

Après avoir passé plusieurs années à travailler sur le chantier avec des sous-traitants et des fabricants de béton coulé sur place et préfabriqué, une image du contraste saisissant entre le monde "brut" de la construction et le monde "précis" de la recherche matérielle s'est développée. Pourtant, malgré ces différences, aucun des deux ne peut exister sans l'autre. La familiarité avec le monde de la construction a donné une perspective au travail de thèse en laboratoire. L'expérience de la construction a fourni un rappel toujours présent des buts (construction) devant être satisfaits quels que soient les moyens (science de la matière). Les spécialistes des matériaux, les physiciens, les chimistes, les ingénieurs, les techniciens et d'autres personnes travaillant dans les laboratoires de science des matériaux ont une certaine familiarité avec le monde de la construction, cependant ils demeurent pour la plupart à côté. Ils doivent compter sur des experts externes (ou des connaissances acquises dans le cadre de projets de recherche antérieurs) comprendre la différence entre ce qui peut et ne peut pas être construit ; entre le possible et l'impossible. C'est la même chose pour ceux qui travaillent sur le terrain sur le chantier. Contrairement au spécialiste des matériaux, le travailleur du béton ne voit pas la microstructure se former dans le béton qu'il place ; il sait travailler avec un matériau béton thixotrope sans rien savoir du composant qui crée sa pseudo-plasticité. Une fois de plus, combien de personnes savent comment adapter la rhéologie d'une pâte de ciment aux caractéristiques souhaitées ? C'est là le paradoxe de l'innovation : pour qu'un nouveau concept puisse relier les deux mondes, il doit pouvoir exister, habiter et occuper les deux mondes simultanément. En outre, en termes de trajectoires de nombreuses carrières, cela peut être difficile. Cependant, il existe une profession dans laquelle le rôle de ses agents est prédisposé à combler le fossé entre le « rugueux » et le « précis », le pratique et le théorique, le réel et l'abstrait, le constructif et le scientifique. C'est le touche-à-tout et le maître d'aucun (celui qui orchestre tout mais n'est jamais un expert), le dilettante, le batteur professionnel, l'acteur habitué, formé réellement, pour exister dans beaucoup de mondes mais appartenant à aucun : l'architecte. Cet attribut n'accueille pas nécessairement l'architecte dans le monde qu'il habite. En fait, surtout dans le monde de la construction, il est au mieux considéré avec scepticisme. Dans le monde de la science des matériaux, un monde qui exige de ses acteurs de nombreuses années d'éducation et de formation intense, un monde auquel l'architecte a rarement l'occasion de rendre visite, il n'est qu'un outsider. Comme pour le monde de la botanique, ce statut ne devrait pas décourager le néophyte. Pourquoi ? Parce qu'il permet des propositions non orthodoxes. Les portes censées être verrouillées par la persuasion semblent accessibles à l'intrus. De plus, grâce à la générosité des membres de LCR, l'une de ces portes s'est entrouverte et a permis ce travail de thèse.

Inspiration divine : innovation versus préconception

Un piège courant pour les architectes lorsqu'ils abordent un problème de conception est la difficulté de résister à l'idée d'imaginer une solution formelle avant d'étudier le problème. L'architecte Bill Hicks appelle ce phénomène de prédétermination formelle « inspiration divine ». Par exemple, au moment où un client demande à l'architecte « une petite maison », multitude d'images de petites maisons commencent à coloniser l'esprit de l'architecte. Cela peut se traduire par l'image mentale d'une « petite maison » vue une

fois ou que l'architecte a voulu voir, et cette notion engendre une conception architecturale qui commence à prendre forme dans l'esprit. Le problème est que la préconception limite le potentiel de la conception. Si cette notion initiale est construite, elle ne parvient généralement pas à atteindre le niveau de qualité de ce qu'elle aurait pu être si elle n'avait pas été limitée par la préconception. Pourquoi cette inspiration initiale limite-t-elle la conception ? Parce que la forme initiale vue par l'architecte ne prenait pas en compte toutes les limites physiques - et possibilités - du problème architectural complet. Au lieu de cela, une solution superficielle - une surface - est acceptée comme le moteur de la conception, quelles que soient les réalités du problème. La notion préconçue a-t-elle tenu compte des désirs souvent contradictoires du client ? La notion préconçue a-t-elle été inspirée par les évolutions historiques de la culture de la communauté qu'elle va rejoindre ? La préconception a-t-elle suivi les règles et règlements des autorités locales ? Dans les contraintes d'un problème bien analysé se trouve le fruit de la conception. La fiction initialement imaginée par l'architecte se limite à ce qui a déjà été vu ou imaginé sur la base de son expérience passée. Par conséquent, sa préconception est enracinée dans le passé ; et ce n'est pas une recette favorisant l'innovation ou l'avancement dans le domaine de l'architecture. L'innovation survient en réponse aux spécificités d'un problème donné. Pour avancer, on commence par se pencher en avant.

De même, ce phénomène de limitation par préconception peut être vrai dans d'autres domaines, y compris la science des matériaux. Nous sommes limités par la connaissance de ce qui est arrivé auparavant. Le moyen de contourner cette limitation - pour l'architecte et le spécialiste des matériaux - est de résister à l'inspiration initiale ; se détacher de la (des) solution (s) initiale (s) de l'œil et se concentrer uniquement sur le problème en question. Si le problème fait l'objet d'une recherche approfondie et que toutes ses interdépendances sont vérifiées, il est indubitable qu'une solution sera trouvée, meilleure que celle préconçue. C'est ainsi que les parties de la thèse portant sur l'architecture, la botanique et la science de la matière ont été abordées. Cependant, cela n'a pas été le cas pour l'impulsion de cette thèse. Le travail de cette thèse a été entamé avec un concept déjà préfiguré, une idée préconçue qui est apparue dans l'esprit un an et demi avant le début officiel de la thèse. Cependant, conformément à l'approche susmentionnée, pour se détacher des idées préconçues, un effort a été fait de considérer toutes les solutions possibles pour un mur vivant en béton pouvant encore satisfaire le principe de cette recherche ; le prix, l'ubiquité et la plasticité du béton accroître la nature urbaine sans tenir compte des limites géographiques. Les résultats de cette tentative - pour ne pas limiter les directions possibles de la présente recherche - sont présentés dans les chapitres 6 et 10, mais, étant donné que seulement quelques-unes de ces propositions ont été testées, seul le temps dira si les autres propositions ont une valeur et peuvent contribuer à favoriser le dialogue architectural.

L'état de l'art des murs vivants

La promesse du travail de cette thèse est la même que celle qui concerne les nouvelles données sur les murs vivants : elle est l'occasion de comprendre pleinement toute la complexité des systèmes de murs vivants. Une fois approuvées, les leçons tirées de ces efforts aideront l'industrie des murs vivants à mûrir et à se normaliser ; probablement à entraîner la prolifération de murs vivants. Malgré cette promesse de standardisation, il est prudent de se rappeler que l'existence de murs vivants, dans leur incarnation moderne, est relativement nouvelle. Par conséquent, la longévité de presque tous les systèmes concurrents est inconnue. En conséquence, le monde des murs vivants est ouvert au changement et à la redéfinition. Ce monde en grande partie indéfini continue d'évoluer jusqu'à ce que nous apprenions comment optimiser les systèmes de murs vivants et comment limiter l'effet de leurs variables associées. Certains experts en politique prédisent que la mise en œuvre de normes pour les murs vivants prendra encore près d'une décennie. D'ici là, le monde des murs vivants demeure un terrain d'expérimentation se mêlant à l'innovation ; c'est le Far West d'un système architectural qui n'en est encore qu'à ses débuts.

Bibliographie

CONRADS 1970

Conrads U., Programs and Manifestoes on 20th-century Architecture, 1970.