

# DIGITAL MATTERS

Sous la direction de  
M. Brocato  
R. Zarcone



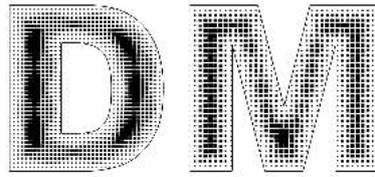
## SEMINAIRE DE RECHERCHE 2021-2022



École nationale supérieure  
d'architecture Paris-Malaquais

Auteurs :  
Faouzi GARGOUI  
Helin KAHRAMAN  
Ksenia KONSTANTINOVA  
Martin LICHTIG  
Aymeric MANTÉ  
Myriem RHMARI TLEMÇANI





DIGITAL MATTERS

## SÉMINAIRE DE RECHERCHE 2021-22

*Auteurs :*

Fauzi GARGOUI  
Helin KAHRAMAN  
Ksenia KONSTANTINOVA  
Martin LICHTIG  
Aymeric MANTÉ  
Myriem RHMARI TLEMÇANI

*Enseignants :*

Maurizio BROCATO  
Roberta ZARCONE  
Ahmed ABOUELKHEIR  
Emilien CRISTIA



**École nationale supérieure  
d'architecture Paris-Malaquais**



# Table des matières

Introduction . . . . .	6
<b>1 La numérisation 3D des maquettes physiques dans le projet d'architecture</b>	<b>9</b>
1.1 Introduction . . . . .	10
1.1.1 Une histoire longue, une pratique récente . . . . .	10
1.1.2 Enjeux de la recherche . . . . .	12
1.2 Méthodologie . . . . .	14
1.2.1 Photogrammétrie ou lasergrammétrie ? . . . . .	14
1.2.2 Matériel, appareil et logiciel . . . . .	16
1.2.3 Expérimentations . . . . .	18
1.3 Résultats . . . . .	19
1.3.1 Stabilisation de la captation des données . . . . .	19
1.3.2 Optimisation des conditions de captation . . . . .	21
1.3.3 Adéquation du modèle et du processus . . . . .	21
1.4 Un processus, plusieurs pratiques . . . . .	22
1.4.1 Numériser pour concevoir / Concevoir pour numériser . . . . .	23
1.4.2 Numériser pour partager . . . . .	25
1.4.3 Numériser pour archiver . . . . .	27
1.5 Conclusion . . . . .	29
<b>2 De la possession à l'usage : allonger la durée de vie des produits de la construction</b>	<b>35</b>
2.1 Introduction . . . . .	36
2.2 Méthodologie . . . . .	39
2.3 Résultats . . . . .	46
2.3.1 Conséquences d'un modèle leasing et intérêt pour le réemploi . . . . .	46
2.3.2 Modèles linéaire et traditionnel : une nouvelle organisation des parties prenantes . . . . .	47
2.3.3 Droit de propriété et défis liés à ce nouveau modèle circulaire . . . . .	48
2.3.4 Un potentiel de mise en pratique pour un client spécifique et une organisation d'entreprises renouvelée . . . . .	50
2.3.5 spécificités et contraintes des produits de la façade bois en regard à son démontage . . . . .	51
2.3.6 Degré de démontabilité des produits de la façade bois . . . . .	51
2.3.7 Des avantages à priori limités de la façade bois au sein d'une filière leasing . . . . .	55
2.4 Discussion . . . . .	58
2.4.1 Alternative à l'obstacle juridique vis-à-vis du droit de propriété que représente un modèle leasing . . . . .	58

2.4.2	Allongement de la durée de vie en service des produits bois par l'incrustation de la donnée . . . . .	59
2.5	Conclusion . . . . .	64
<b>3</b>	<b>Des procédures opérationnelles pour faciliter la déconstruction sélective et augmenter le potentiel de réemploi des structures porteuses</b>	<b>71</b>
3.1	Introduction . . . . .	72
3.2	Méthodologie . . . . .	75
3.2.1	Procédures opérationnelles pour la récupération d'informations utiles à faciliter la déconstruction des structures porteuses . . . . .	75
3.2.2	Procédures opérationnelles pour la préparation des directives de déconstruction des structures porteuses . . . . .	80
3.3	Discussion . . . . .	96
3.4	Conclusion . . . . .	98
<b>4</b>	<b>Façades dynamiques : vers un contrôle morphologique de l'approvisionnement solaire</b>	<b>105</b>
4.1	Introduction . . . . .	106
4.1.1	Problématique . . . . .	107
4.1.2	Méthodologie de recherche . . . . .	107
4.2	Les dispositifs d'ombrage cinétiques . . . . .	109
4.2.1	Les types de systèmes d'ombrage actif en architecture . . . . .	109
4.2.2	Origami et Architecture . . . . .	109
4.2.3	L'origami rigide : . . . . .	115
4.3	Expérimentation des géométries . . . . .	120
4.3.1	Géométries étudiées . . . . .	120
4.3.2	Manipulation & Interprétation . . . . .	122
4.3.3	Matrice géométrique . . . . .	124
4.4	Modélisation et évaluation des apports solaires sur un cas d'étude . . . . .	124
4.4.1	Amorce choix du site . . . . .	124
4.4.2	Géométrie simulée . . . . .	125
4.4.3	Evaluation apport solaire . . . . .	125
4.4.4	Tableaux de résultats . . . . .	125
4.5	Conclusion . . . . .	126
<b>5</b>	<b>Façade végétale : une solution pour la réduction des besoins énergétiques de refroidissement de bâtiment ?</b>	<b>131</b>
5.1	Introduction . . . . .	132
5.2	L'état de l'art . . . . .	134
5.2.1	Les transferts thermiques dans les façades végétales . . . . .	134
5.2.2	Les impacts énergétiques des façades végétales . . . . .	135
5.2.3	La modélisation numérique des transferts thermiques : les outils de simulations . . . . .	140
5.3	La simulation énergétique sur deux cas d'étude : analyse d'un mur végétal à Singapour et à Paris . . . . .	141
5.3.1	L'outil numérique . . . . .	141
5.3.2	La méthodologie . . . . .	141
5.3.3	Les résultats . . . . .	142
5.4	Conclusion . . . . .	143

---

<b>6</b>	<b>La réflectance comme outil de gestion thermique du bâti</b>	<b>149</b>
6.1	Introduction . . . . .	150
6.1.1	Contexte et état de l'art . . . . .	150
6.1.2	Objectif et organisation de la recherche . . . . .	151
6.2	Méthodologie de la recherche . . . . .	153
6.2.1	Propriétés des affichages électrophorétiques . . . . .	153
6.2.2	Formulation d'une hypothèse d'implantation des AEP en façade . . . . .	155
6.2.3	Caractéristiques des échantillons d'analyses . . . . .	157
6.2.4	Présentation du protocole des analyses radiatives . . . . .	157
6.2.5	Détails de la simulation énergétique . . . . .	159
6.3	Résultats et interprétations . . . . .	161
6.3.1	Résultat des analyses radiatives . . . . .	161
6.3.2	Résultats de la simulation énergétique . . . . .	163
6.4	Conclusion et perspectives . . . . .	164
6.4.1	Retours sur les résultats de l'étude . . . . .	164
6.4.2	Propositions de pistes de recherches ultérieures . . . . .	166
6.4.3	Remerciements . . . . .	167



# Introduction

**Par Maurizio Brocato et Roberta Zarcone**

L'avancée des technologies de l'information a engendré en peu de temps un grand nombre de changements des modes de vie et des modes de production. Le développement du numérique a changé la structure économique, industrielle et sociale déterminant une perception de discontinuité toujours renouvelée.

La révolution numérique investit et est investie par toutes les dimensions propres de l'architecture, tel est son rapport aux sociétés, aux individus et aux techniques. Sa force nous conduit à comprendre sa genèse comme un phénomène qui s'inscrit dans un *continuum* historique et social; elle nous sollicite avec son actualité et nous donne l'occasion d'imaginer des futurs possibles.

Le recueil de travaux étudiants présenté ici et développé au sein du séminaire de recherche du département Digital Matters de l'ENSA Paris-Malaquais s'inscrit dans ce contexte en plein évolution. Nous explorons la matérialité numérique et la centralité de l'information numérisée, qui, pouvant être traitée formellement, donne à la pensée le support extraordinaire des machines. Ce processus informé soutient la production et la recherche architecturale et permet la l'inscription de l'édifice dans un modèle circulaire, continu et contrôlable, de sa conception au réemploi de ses parties, de son optimisation à son fonctionnement intelligent. Quel architecte sera le maître d'une telle innovation, aujourd'hui et dans l'avenir proche, est la question qu'on se pose avec les étudiants, sachant qu'ils seront bientôt eux-mêmes des facteurs de la réponse.

Dans ce cadre la question du lien actif et rétroactif entre architecture et numérique est traitée avec plusieurs points de vue afin d'établir une pensée de l'architecture numérique, par nature générique et anti-disciplinaire. Cette pensée se projette par vocation dans une constante dynamique de recherche, d'innovation et d'expérimentation, croisant plusieurs thématiques.

Nous traitons la question de nouvelle matérialité numérique du point de vue de la relation entretenue entre l'information et les matériaux, les techniques et la forme architecturale. Dans cet axe s'inscrit le travail sur la numérisation 3D des maquettes physiques dans le projet d'architecture menée par Martin Lichtig. Dans son article, il explore le champ des possibles ouvert par la numérisation 3D et s'interroge sur la question de la pérennisation des savoirs en École d'Architecture. L'objectif de la recherche est de définir un processus de numérisation 3D des maquettes physiques à destination des étudiants des écoles d'Architecture. Pour ce faire, il définit les étapes à suivre pour effectuer le relevé photogrammétrique, ainsi que les outils nécessaires (matériel, appareil et logiciel).

Une deuxième thématique traitée porte sur l'économie circulaire en Architecture. Les

---

travaux menés par Myriem Rhmari Tlemani et Helin Kahraman, s'inscrivant dans cet axe d'exploration, traitent des procédures opérationnelles pour faciliter le réemploi en Architecture. Elles questionnent les problématiques liées à l'acquisition, à la gestion, au stockage et à l'exploitation des données. Myriem Rhamari Tlemani explore les potentialités du leasing pour le réemploi. L'hypothèse de cette recherche repose sur le déplacement du schéma commercial des biens immobiliers, d'habitude basé sur la vente de produits, vers un système basé sur la prestation de services. S'appuyant sur un cas d'étude d'une façade en bois, un protocole d'évaluation du degré de démontabilité des produits de la façade selon leur typologie de connexion respective est développé. Cela permet de mettre en lumière le rôle que les technologies de transmission de l'information joue dans l'allongement de la durée de vie des bâtiments. Cette dernière question est étroitement liée également à la définition de procédures opérationnelles capables de donner des directives pour la déconstruction sélective. Dans ce cadre s'inscrit la recherche de Helin Kahraman qui propose un protocole d'opérations à mettre en place pour la récupération des structures porteuses. L'expérimentation sur le bâtiment Lenoir de l'ENSAPM a permis d'appliquer de tester ces procédures opérationnelles sur un cas d'étude réel. Pour ce faire, une maquette informée BIM a été développé et a permis de construire les étapes de la démolition et d'ne vérifier ce potentiel. faciliter la récolte des informations nécessaires

Pour terminer, une attention particulière dans ce recueil est portée à l'étroite relation qui s'instaure entre le numérique et l'émergence des questions énergétiques en Architecture. Nous explorons ce nouveau paradigme énergétique en investiguant le potentiel de renforcement mutuel que les deux transitions, numérique et écologique, possèdent. Les travaux présentés par Faouzi Gargouri, Ksenia Konstantinova et Aymeric Manté s'inscrivent dans cette thématique large qui comprend l'intégration de la donnée environnementale dans le processus de conception informatisé, l'optimisation morphologique (ensoleillement, confort thermique, acoustique et visuel. . .), le design numérique bioclimatique et l'innovation dans la conception des systèmes technologiques à faible impact. Le travail de Faouzi Gargouri porte sur la recherche morphologique de nouveaux systèmes cinétiques capables d'assurer un confort lumineux intérieur ainsi que de gérer les apports de chaleur. S'appuyant sur l'art des origami, la recherche propose trois morphologies paramétriques différentes et en évalue les apports de chaleurs. La question de l'évaluation et de la simulation énergétique à l'aide d'outils numériques est également traitée par Ksenia Konstantinova. Son travail se concentre sur les façades végétalisées et sur une mise en comparaison des différents phénomènes simulés avec les principaux logiciels utilisés. Après une étude approfondie de l'état de l'art, la recherche mets en comparaison sur un cas d'étude l'application d'une telle solution constructive en deux contextes différentes afin d'en comprendre les avantages en termes d'apports énergétiques. Enfin, le travail présenté par Aymeric Manté propose l'application d'affichages électrophorétiques, capables d'exploiter le phénomène de la réflectance thermique à des solutions architecturales. Pour vérifier l'hypothèse selon laquelle cette technologie pourrait devenir un outil de gestion thermique de façade, la recherche s'appuie sur des tests et des expérimentations sur les capacités radiatives menées en collaboration avec le laboratoire de l'école de Chimie ParisTech.

Ainsi à travers les articles présentés ici, nous avons essayé de croiser les regards entre ces différents domaines afin de montrer leur inévitable imbrication. Les transformations, engendrées par le numérique, des modes de production, matérielle ou immatérielle, pratique ou intellectuelle de la structure même du savoir humain, entraînent, in fine, une réflexion sur le rôle de l'architecte et sur son positionnement dans un contexte en mouvement continu.

# La numérisation 3D des maquettes physiques dans le projet d'architecture

Par Martin Lichtig<sup>1</sup>

*La numérisation 3D en architecture constitue désormais une technologie relativement éprouvée quant à son utilisation pour le relevé d'un site ou d'un édifice existant. D'autre part, malgré un recours croissant aux outils numériques, la maquette physique figure encore aujourd'hui parmi ceux privilégiés par l'architecte. Cette étude restitue la confrontation de ces deux techniques à travers la numérisation 3D des maquettes physiques. À partir d'une série d'expérimentations, il s'est agi, dans un premier temps, d'optimiser ce processus de captation et de tendre à son automatisation. Cet objectif, partiellement atteint, s'est heurté à la variété des matériaux utilisés dans la conception des maquettes et à la difficile mise à l'échelle des technologies en jeu. Dans un second temps, il a été question d'investiguer le champ des possibles ouvert par cette technique dans le domaine de l'architecture. Depuis la formation au métier d'architecte en école jusqu'à la constitution d'un fonds d'archives d'agence, les potentiels recours à la numérisation 3D des maquettes physiques sont apparus relativement nombreux. Cependant, ces opportunités sont à relativiser au vu des contraintes inhérentes à ce processus, en particulier les problématiques liées au stockage et à la diffusion des données numériques 3D.*

*Mots-clés : maquette ; numérisation ; photogrammétrie ; données 3D*

---

1. Martin Lichtig, né en 1996 à Clermont-Ferrand. Après un master en histoire de l'art (spécialité histoire de l'architecture) à l'université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne obtenu 2019, il a intégré l'ENSA Paris-Malaquais d'où il est sorti diplômé en 2022. Il travaille actuellement au sein de l'agence DDA Devaux & Devaux architectes où il réalise sa mise en situation professionnelle nécessaire à l'obtention de son HMONP.

---

## 1.1 Introduction

### 1.1.1 Une histoire longue, une pratique récente

Le processus de numérisation 3D des maquettes physiques dans le domaine de l'architecture, c'est-à-dire par des architectes et à des fins architecturales, est une pratique relativement récente. Celle-ci n'est effectivement apparue qu'au début des années 1980, il y a donc une quarantaine d'années. Encore plus récente est l'étude historique de ladite pratique. Celle-ci a, quant à elle, été entamée depuis le début des années 2000 pour ce qui est de retracer des épopées individuelles, en particulier celle de Frank Gehry [22, 32, 29], et dans leur suite pour ce qui est de relater un mouvement de fond et collectif à travers une première *Archéologie du numérique* [23] ou encore une « histoire culturelle de la conception informatique » [5].

Dans son ouvrage, l'architecte et historien Roberto Bottazzi a mis en perspective cette pratique récente de numérisation 3D des maquettes physiques en l'inscrivant dans l'histoire plus longue des tentatives successives de retranscription du réel depuis la Renaissance.

Le premier exemple rapporté par l'auteur est celui de Leon Battista Alberti (1404-1472), lequel est parvenu, dès le XV<sup>ème</sup> siècle, à traduire le réel par des nombres, principe à la base de la numérisation, 2D ou 3D. À l'aide d'un dispositif de mesure détourné, un *quadrato delle ombre*, il a entrepris le relevé des limites de la ville de Rome. Au-delà de la méthode de relevé elle-même, Bottazzi insiste sur le mode de communication des résultats, Alberti ayant fait le choix de ne les diffuser qu'à travers une liste de coordonnées plutôt qu'à travers une carte. Ce faisant, ladite carte, plutôt que d'être fournie par l'auteur, peut-être (re)produite en tout lieu et à toutes les échelles par le lecteur lui-même. Aujourd'hui encore, lorsqu'il s'agit à notre tour de s'attarder sur le processus de numérisation 3D des maquettes physiques, c'est-à-dire sur un moyen de retranscrire le réel, la diffusion et l'utilisation des données enregistrées (mesure, mise à l'échelle) sont apparues comme deux enjeux centraux.

Après l'exemple d'Alberti, Bottazzi poursuit son récit des jalons posés depuis la Renaissance et qui ont conduit aux techniques de numérisation contemporaines à travers leur inventaire : le *bacolo* d'Euclide adapté par Léonard de Vinci (1452-1519), la machine à perspective de Jacopo Barozzi da Vignola (1507-1573), le *distanziometro* de Baldassarre Lanci (1510-1571), le *gnomone* de Bernardo Puccini (1520-1575), le *proteo militare* de Pietro Accolti (1455-1532), le *sportello* d'Albrecht Dürer (1471-1528), le perspectographe de Lodovico Cigoli (1559-1613), le pantographe de Christoph Scheiner (1573-1650), réinventé par Charles Gavard (1794-1871), le physionotrace de Gilles-Louis Chrétien (1754-1811) ou encore la photosculpture de François Willème (1830-1905). Si Bottazzi dresse ce panorama d'expérimentations et si on le restitue ici, c'est que, dans la suite d'Alberti, chacune de ces expériences a consisté non seulement en un perfectionnement de la précédente mais également en une nouvelle étape vers un idéal d'automatisation du processus de retranscription du réel. Là encore, nous cherchons aujourd'hui à poursuivre cette quête de l'automatisation dudit processus à travers notre étude de la numérisation 3D, en parallèle de celles précédemment évoquées de la diffusion et de l'utilisation des données.

Un autre enseignement de cette série d'inventions relève de la dépendance du processus de retranscription du réel à des instruments de mesure, depuis le *quadrato delle ombre* d'Alberti jusqu'au physionotrace de Chrétien. Tous les protagonistes de cette genèse de la retranscription automatique du réel sont les inventeurs de leurs instruments ou, au moins, se sont réappropriés des précédents. Cependant, chacun a eu le souci de rendre intelligible son processus davantage que de publier seulement les résultats obtenus grâce à lui. C'est là aussi l'une de nos préoccupations présentes : face à l'apparente complexité des outils de numérisation 3D, un effort de pédagogie et de simplification est à fournir pour rendre

---

accessible et encourager cette pratique.

Finalement, les scanners 3D, profitant du développement du numérique, ne sont apparus sous leur principe actuel que dans les années 1960. Il faudra attendre vingt années supplémentaires pour assister à leur entrée au sein des agences d'architecture<sup>2</sup>. Selon Bottazzi, ce moment peut être daté assez précisément de 1981, date à laquelle l'agence SOM (Skidmore, Owings et Merrill, fondée en 1936) s'est vue confier la réalisation d'une imposante et irrégulière sculpture de Joan Miró (1893-1983) à Chicago. Pour ce faire, l'agence a recouru au processus de numérisation 3D d'une maquette physique produite par l'artiste lui-même. Une fois numérisée, la maquette a pu être triangulée et projetée dans ses dimensions de réalisation grâce à un logiciel développé par l'agence. Cette première utilisation connue du scanner 3D en architecture relève uniquement de l'aide à la réalisation, la sculpture finalement produite par SOM ne consistant qu'en un agrandissement de la maquette de Miró.

L'exemple du recours au processus de numérisation 3D par SOM illustre également un certain changement de paradigme dans l'histoire longue des tentatives de retranscription du réel. En effet, si le recours à une nouvelle technologie est revendiqué par l'agence, dans une logique de positionnement commercial (« voilà ce que nous sommes capables de faire »), sa mise en oeuvre concrète demeure relativement opaque, loin du souci pédagogique des inventeurs de la Renaissance. De plus, pour ce qui est du matériel nécessaire à la numérisation, le scanner (dispositif de captation) est désormais indissociable d'un ordinateur (*hardware*, dispositif de visualisation) et d'un logiciel (*software*, dispositif de traitement). Dans le cas de la numérisation 3D opérée par SOM, le logiciel en question a été développé par l'agence elle-même et demeure son apanage, limitant alors grandement l'accessibilité à un tel processus.

Au tout début des années 1990, une autre agence d'architecture, américaine elle aussi, a introduit dans sa pratique le numérique (à travers l'utilisation du logiciel CATIA, développé par Dassault à l'origine pour l'aéronautique) et, plus particulièrement, le scanner 3D : celle de Frank Gehry, fondée en 1962. C'est pour un projet, non-réalisé, de rénovation d'une maison, la Lewis House (1989-1995), que le processus de numérisation 3D de maquettes physiques a été introduit chez Gehry Partners. Pendant six années, il s'est agi pour Frank Gehry d'expérimentations successives à travers l'outil maquette et pour ses équipes de retranscription numérique desdites maquettes (plus d'une centaine) [24]. Le rythme imposé et l'exigence de l'architecte d'obtenir une copie numérique à l'identique ont contraint ses équipes à recourir au scanner 3D. Pour simplifier un processus alors encore relativement complexe, ils ont recouru à des marqueurs, réduisant la maquette physique à des sommets, numérisés et à partir desquels, en les reliant, ils ont pu construire chaque avatar numérique.

De la même manière que pour SOM, ce premier recours à la numérisation a permis à Gehry d'incarner une nouvelle tendance de l'architecture, résolument numérique. Chez Gehry Partners, cette véritable revendication du recours aux outils numériques s'est matérialisée à travers la création, dès 2002, d'un département, Gehry Technologies, exclusivement consacré au développement de ces outils. Toutefois, on peut signaler que l'engouement suscité par la pratique de Gehry a permis, contrairement à SOM, de dévoiler et de diffuser largement son utilisation du scanner 3D [22, 32, 29]. Par ailleurs, l'emploi récurrent de cette technologie a finalement interféré avec la manière-même de concevoir de Gehry. Depuis le choix des matériaux des maquettes physiques en vue de leur numérisation, sur lequel nous reviendrons, jusqu'à la rationalisation informatique des surfaces, le scanner 3D est apparu dans cette agence comme une interface indispensable entre deux mondes, physiques et numériques.

---

2. « Digital scanners had already been developing for about two decades when they landed in an architecture office. » [5, p. 169].

---

Aujourd'hui, le recours aux outils numériques, en particulier aux logiciels de DAO et CAO, s'est généralisé au sein des agences d'architecture, l'utilisation de ces derniers étant encouragée et enseignée dans les écoles d'architecture. Cependant, l'emploi du scanner 3D par les architectes est, quant à lui, demeuré marginal. D'une part, lorsqu'il s'agit de scanner à grande échelle, c'est-à-dire d'effectuer le relevé d'un site ou d'un bâtiment, la mission est le plus souvent confiée directement à un professionnel (géomètre expert, « technicien de la mesure » [26]). D'autre part, à une échelle réduite, la maquette nativement numérique a parfois supplanté son homologue physique, entérinant une pratique devenue totalement numérique. Par conséquent, la numérisation 3D appliquée à l'architecture semble avoir retrouvé son statut de champ d'expérimentations, (re)devenant l'objet de recherche de laboratoires<sup>3</sup>.

### 1.1.2 Enjeux de la recherche

La maquette physique, qu'elle soit de recherche, prototype ou de présentation, demeure l'un des outils incontournables du projet d'architecture. Si l'ensemble de la documentation du projet (dessins, plans, coupes) donne à voir une version réduite du projet grâce au recours aux échelles de grandeur, la maquette ou modèle réduit n'y faisant pas exception, cette dernière se distingue toutefois par son caractère tridimensionnel. Face à elle, la maquette nativement numérique (notamment BIM<sup>4</sup>) consiste en un autre outil central du projet qui, malgré son développement, voire sa généralisation progressive, n'a pas pour autant supplanté son homologue physique. Parmi ces différents types de maquettes, physiques et numériques, dont s'empare l'architecte, à la fois pour concevoir et pour partager son projet, la maquette physique est la seule, par son statut d'artéfact, à impliquer l'observateur dans un rapport similaire à celui qu'il entretient avec les objets de son quotidien (à l'inverse d'une documentation spécialisée, propre au champ architectural)<sup>5</sup>. Cette relative trivialité de la maquette physique, instantanément intelligible par tous, ludique et manipulable, justifie en partie son utilisation (presque) systématique dans le processus du projet d'architecture, de la conception à la médiation.

Par conséquent, les maquettes physiques foisonnent, notamment parce que l'utilisation de cet outil se caractérise par une certaine tendance à la répétition, à la déclinaison et, au final, à la «surabondance» [11]. Les maquettes remplissent ainsi les étagères des agences d'architecture, elles s'accumulent au-dessus, en dessous et au fond des armoires et, surtout, comblent le moindre volume laissé vide dans les écoles d'architecture (d'autant plus lorsque l'espace de travail y constitue un véritable enjeu comme à l'École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais). Là, elles sont plus ou moins stockées, parfois abimées, souvent oubliées jusqu'à être jetées (et encore trop peu souvent recyclées) pour que d'autres puissent les remplacer. Car en architecture, en école comme en agence, un projet succède à un autre, quand ils ne se superposent pas, et il en va de même des séries de maquettes, ainsi rendues obsolètes. Alors, sur le chemin de la benne à ordures, quelques photographies en sont prises pour en conserver un souvenir (subjectif et partiel parce que notamment bidimensionnel) plutôt que d'en constituer une véritable archive (laquelle prétend à la fois à l'objectivité et à l'exhaustivité).

Face à ces problématiques de conservation des maquettes physiques, de stockage, de préservation ou encore de réutilisation (pour valoriser un projet passé autant que pour nourrir un projet futur), la numérisation 3D peut apparaître aujourd'hui, aux yeux des architectes,

---

3. Parmi lesquels l'un des plus productifs actuellement est le ScanLAB (fondé en 2010) de la Barlett School of Architecture (source : <https://scanlabprojects.co.uk>).

4. Building Information Modeling ou Modélisation des Informations du Bâtiment.

5. «La maquette physique, vue comme objet tridimensionnel, semble quant à elle se suffire à elle-même pour être interprétée, sans avoir à faire appel à des conventions ou à des artifices graphiques autres que sa propre matérialité.» [11].

---

comme une technologie providentielle. Celle-ci permet effectivement de convertir les maquettes physiques en modèles numériques tout en préservant leur caractère tridimensionnel. Schématiquement, en tant que processus technique, la numérisation 3D est similaire à l'utilisation d'un scanner. Roberto Bottazzi a défini le fonctionnement de ce dernier par une « extraction d'un ensemble d'informations depuis le domaine du réel, transposé dans le champ des nombres binaires. » [5, p. 149]. La numérisation 3D permet donc l'obtention d'un avatar numérique à partir d'un modèle physique et donc, *a priori*, de résoudre les problèmes de stockage, de préservation ou encore de réutilisation.

En réalité, aucun de ces problèmes n'est véritablement résolu par le processus de numérisation 3D à lui seul. En effet, chacun d'entre eux est, au même titre que les maquettes physiques, transposé du monde physique au monde numérique. Le stockage des données numériques et leur préservation dans le temps en vue de leur réutilisation à long terme constituent des enjeux tout aussi problématiques, bien que peut-être moins visibles, que ceux cités précédemment. Pour autant, ces problématiques ne sont pas plus irrésolvables que les précédentes. De plus, à mesure que l'on investit par l'expérimentation le champ de recherche de la numérisation 3D apparaissent progressivement, non plus seulement des contraintes, mais aussi de nombreuses potentialités propres au monde numérique. Parmi elles, citons, par exemple, la possibilité d'une répliquabilité (reproduction à l'identique) et celle de la facilitation du partage de l'information.

Comme mentionné plus haut, notre recherche à partir de l'objet d'étude qu'a constitué la numérisation 3D des maquettes physiques s'est en partie appuyée sur une série préalable d'expérimentations. Parallèlement, des sources (en particulier des guides d'utilisation édités par les logiciels de traitement photogrammétrique [3]) ont facilité la prise en main du processus. Cette recherche a également bénéficié du retour d'expérience d'utilisateurs fréquents de la numérisation 3D. Parmi eux, on dénombre encore peu d'architectes et davantage de spécialistes de ladite pratique mais aussi des chercheurs en sciences humaines et sociales (SHS, notamment des archéologues) auxquels ce mémoire de recherche doit beaucoup<sup>6</sup>. Enfin, des articles et ouvrages publiés ayant posé, depuis le tournant du XXI<sup>ème</sup> siècle, les bases d'un récit historique encore en train de s'écrire autour du recours aux outils numériques dans le processus du projet d'architecture ont largement nourri notre réflexion<sup>7</sup>.

C'est d'ailleurs la lecture d'ouvrages, moins centrés sur la technicité d'un processus et davantage sur ses différents emplois, qui nous a permis de formuler notre hypothèse principale de travail : la numérisation des maquettes physiques sous forme de données 3D (c'est-à-dire à la fois le processus et son résultat) permet d'interroger le projet à travers ses différentes dimensions (en particulier la conception, le partage et l'archivage). Au-delà de constituer une solution technique à un problème matériel, la numérisation 3D apparaît comme un nouvel outil pour les architectes et, plus largement, comme une nouvelle interface entre un monde physique et un monde numérique à la croisée desquels se situe aujourd'hui la pratique de l'architecture.

Afin de vérifier la validité de cette hypothèse, il convient, dans un premier temps, d'élucider les problématiques liées à la technicité du processus de numérisation 3D des maquettes. Cet éclaircissement a pour objectif de rendre non seulement intelligible mais aussi plus accessible la numérisation 3D. De cette mise à disposition d'un processus découle

---

6. On peut déjà citer le rôle central, en matière de recherche et de diffusion de la connaissance, joué par le Consortium 3D (CST3D), créé en 2014 à l'initiative conjointe de la Très Grande Infrastructure de Recherche (TGIR) Huma-Num, du Centre informatique National de l'Enseignement Supérieur (CINES) et du laboratoire Archéovision.

7. Citons notamment celui dans lequel nous avons le plus souvent pioché des informations pour s'être penché à la fois sur les enjeux du scanner 3D et de la base de données : Roberto Bottazzi, *Digital Architecture Beyond Computers. Fragments of a Cultural History of Computational Design*, Londres, Bloomsbury, 2018.

---

un questionnement sur ses usages potentiels, ici limités à la discipline architecturale. Trois domaines principaux, que la numérisation 3D peut éclairer d'un jour nouveau, seront successivement abordés : le processus de conception, le partage de la documentation liée au projet d'architecture et l'archivage de cette même documentation. Enfin, l'évocation de ces trois domaines d'application du processus de numérisation 3D nous amènera à nous interroger sur les caractéristiques des données numériques 3D et sur les contraintes liées à leur manipulation.

## 1.2 Méthodologie

### 1.2.1 Photogrammétrie ou lasergrammétrie ?

Si l'on souhaite poursuivre l'un des objectifs de cette recherche, rendre accessible la numérisation des maquettes physiques, un éclaircissement technique, après une mise en perspective historique, constitue un préalable nécessaire. Comme évoqué plus haut, le processus de numérisation 3D est dépendant de trois éléments techniques : un matériel de captation, un appareil de visualisation et un logiciel de traitement. On se propose d'abord de trancher la question technologique, laquelle détermine les choix du matériel (captation), de l'appareil (visualisation) et du logiciel (traitement), évoqués quant à eux dans la sous-partie suivante.

Le tableau dépeint par Bottazzi des tentatives successives de retranscription du réel depuis la Renaissance peut nous conduire à percevoir cette histoire comme une évolution linéaire, où chaque invention a définitivement remplacé la précédente. Or, cette impression de linéarité peut être relativisée aujourd'hui par l'offre plurielle, rien qu'en matière de matériel de captation. En réalité, cette multiplicité des techniques peut immédiatement être réduite aux deux principales : la photogrammétrie et la lasergrammétrie.

Le recours à la numérisation 3D dans le domaine de l'architecture étant peu documenté d'un point de vue purement technique, il faut souligner ici que c'est le champ des sciences humaines et sociales (SHS) et, parmi elles, en particulier celui de l'archéologie (affranchi des logiques industrielles et commerciales) qui nous renseigne le mieux sur la praticité de ces deux techniques de captation 3D. En plus de leur souci de transparence et de leur volonté pédagogique, les archéologues sont aussi des utilisateurs plus expérimentés que les architectes en ce qui concerne le processus de numérisation 3D. Si Bottazzi a effectivement daté de 1981 le premier recours à cette technique par des architectes, on peut citer en contre-poids le relevé photogrammétrique de la Salle des Taureaux de Lascaux, réalisé quant à lui dès le début des années 1970 [26].

Cependant, il ne s'agit pas seulement de faire nôtres les conclusions établies par les archéologues mais de réfléchir à ce qu'implique leur transposition dans le milieu architectural. Par exemple, les enjeux relatifs au relevé d'une fresque pariétale préhistorique ne sont pas exactement les mêmes que ceux relatifs à la numérisation 3D d'une maquette d'étude (échelle, degré de précision). En ce sens, l'ingénieur d'études Michel Maumont souligne « qu'il est nécessaire de définir clairement les objectifs scientifiques. C'est la finalité des besoins qui doit induire les produits à élaborer et donc la technique la plus efficiente à mettre en oeuvre pour les réaliser, au-delà du simple fait de fabriquer des images de synthèse sophistiquées qui risquent d'occulter toute interrogation. » [26]. Ce sur quoi insiste ici Michel Maumont, c'est sur l'importance de définir nos besoins pour ensuite seulement déterminer nos moyens. Au moment de préférer une technique à une autre, il s'agit donc de garder à l'esprit notre objet de recherche : la numérisation 3D des maquettes physiques par des non-spécialistes (les étudiants en architecture et les architectes eux-mêmes).

Parmi les deux techniques les plus couramment employées en SHS, la photogrammétrie s'appuie sur le principe de la corrélation de photographies, c'est-à-dire sur le repérage d'élé-

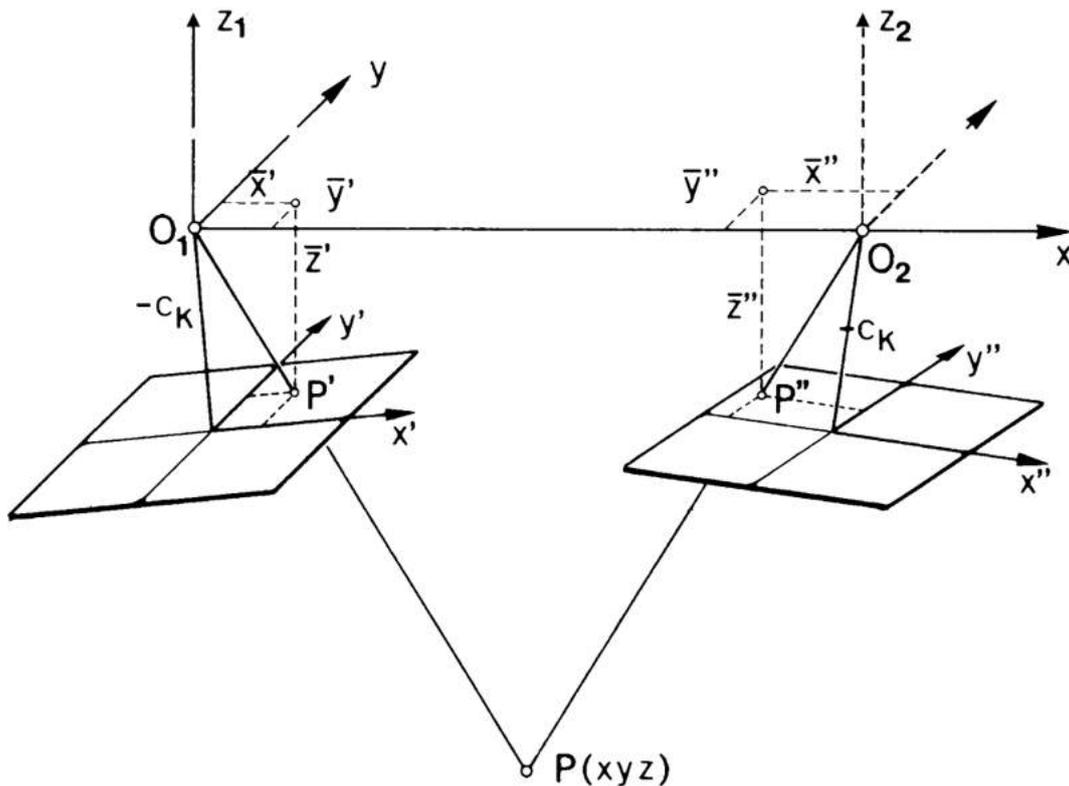


FIGURE 1.1 – Schéma de principe de la photogrammétrie [26]

ments invariants (en l'occurrence, des pixels) sur plusieurs images. (Cf. Figure 1.1) Cette reconnaissance, même si elle peut être volontairement prise en main pour plus de précision, est aujourd'hui un processus automatisé grâce aux logiciels de traitement photogrammétrique. Derrière son apparente superficialité, la captation photogrammétrique consistant en une série de prises de vue, il s'agit en réalité d'une « technique rigoureusement exacte, c'est-à-dire que tous les points saisis par la méthode ont une définition mathématique. » [26].

Pour les SHS, le double avantage de la photogrammétrie réside, d'une part, dans « l'enregistrement de l'image (donc de l'objet) avec toutes ses caractéristiques (topographique, spatiale et archéologique) » [26], et, d'autre part, dans le fait que cette technique « sollicite les caractéristiques de la même image pour le calcul du modèle numérique et pour la texture photographique. » [26]. Lorsqu'il s'agit de transposer l'utilisation de cette technique de captation à des fins architecturales, ces deux spécificités de la photogrammétrie demeurent avantageuses.

Face à cela, en plus de problématiques liées spécifiquement à l'archéologie (comme la contrainte d'un recul suffisant sur le site de captation, en particulier dans les différentes cavités explorées), la photogrammétrie concède quelques inconvénients constants, quel que soit le domaine d'application. Parmi eux, on peut souligner un degré de technicité important et une technique relativement chronophage au niveau des prises de vue (nécessaire superposition suffisante des photographies, éclairage constant). Par conséquent, cette technicité est associée par les SHS à des coûts de prestation relativement élevés.

L'autre technique de captation 3D couramment employée en SHS, en particulier pour des relevés terrestres (sites archéologiques) [13], la lasergrammétrie, repose quant à elle sur l'utilisation d'un capteur laser. Celui-ci se compose généralement du laser lui-même, d'un moteur et d'une capacité de stockage des données collectées. Le moteur permet de balayer

---

la zone à numériser, c'est-à-dire de diriger automatiquement le laser de manière à obtenir des mesures de distance et d'angle, lesquelles permettent finalement de relever un site ou un objet à travers une série de points aux coordonnées connues.

À nouveau, concernant la lasergrammétrie, nous ne bénéficions que du retour d'expérience des archéologues. Selon eux, « le principal atout de la lasergrammétrie est sa rapidité d'exécution dans la saisie de points ainsi que sa relative facilité de mise en application. [...] Utilisables par des non-spécialistes, certains systèmes de saisie laser se louent aujourd'hui, avec seulement quelques heures de formation. » [26]. En effet, contrairement à la photogrammétrie, le moment décisif de la captation est automatisé, ce qui permet un relevé davantage homogène que des prises de vue manuelles.

À l'inverse, la lasergrammétrie présente le défaut de sa qualité principale : une prise de vue automatisée est totalement tributaire des réglages et de la performance du matériel, en l'occurrence du capteur laser. Par ailleurs, Michel Maumont nous alerte sur le format propriétaire des nuages de points obtenus grâce à un capteur laser qui « contraint à acquérir le logiciel de traitement de la même firme [que celle du capteur laser] afin de pouvoir exporter en format universel DXF et ASCII. » [26]. L'enjeu de la texturation, c'est-à-dire l'application d'une texture sur le modèle 3D, pourrait également être mentionné en défaveur de la lasergrammétrie (puisque le capteur laser n'acquiert que des données radiométriques) mais aujourd'hui nombre d'entre eux sont dotés d'un appareil photographique permettant l'enregistrement simultané des textures. Enfin, en ce qui concerne la préoccupation des coûts par les SHS, la baisse progressive des prix permet d'envisager l'acquisition d'un tel matériel pour une utilisation autonome (contrairement au recours à des prestataires pour la photogrammétrie)<sup>8</sup>.

Finalement, la lasergrammétrie semble la technique privilégiée par les SHS dans la mesure où elle l'emporte sur la photogrammétrie à l'issue d'une évaluation à quatre critères : « leurs capacités à répondre à des demandes (en termes de résultats) ; leur facilité de mise en oeuvre (compétences requises) ; leur coût ; et dans certains cas d'urgence, leur rapidité d'utilisation. » [26]. S'il s'agit de transposer ces critères d'évaluation au domaine architectural, ceux-ci demeurent tout à fait valables. Cependant, notre objet d'étude, s'il se situe effectivement dans le champ architectural, réside spécifiquement dans l'accessibilité du processus de numérisation 3D. De fait, si les quatre critères mentionnés plus haut sont pertinents, certains le sont plus que d'autres dans le cadre de notre recherche, en particulier celui du coût. Même s'il faut souligner l'acquisition récente par l'École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais de deux capteurs lasers, leur nombre et leur disponibilité ne satisfont pas totalement notre aspiration à une pratique démocratisée. Par ailleurs, contrairement aux inconvénients inhérents à la lasergrammétrie (format propriétaire, dépendance au calibrage de l'appareil), ceux de la photogrammétrie, liés à une captation manuelle (haut degré de technicité, technique chronophage, conditions de captation), nous semblent, dans une certaine mesure, palliables.

## 1.2.2 Matériel, appareil et logiciel

Michel Maumont nous rappelle que « le relevé en 3D n'est pas une seule entité : c'est une élaboration – une chaîne opératoire – à partir de points tridimensionnels saisis, jusqu'à un produit défini préalablement suivant les besoins et les applications. » [26]. Comme mentionné plus haut, cette chaîne opératoire nécessite par ailleurs l'utilisation d'au moins trois éléments techniques : un matériel de captation, un appareil de visualisation et un logiciel de

---

8. « Depuis les années 1990, la concurrence commerciale a permis de faire évoluer ce matériel à la fois dans ses capacités techniques et dans son coût à l'achat. Nous pouvons considérer que le coût de ce matériel a chuté de 50% depuis 10 ans. » [26].

---

traitement.

Dans la sous-partie précédente, nous avons défini la photogrammétrie comme étant la technique la mieux adaptée à une numérisation 3D accessible des maquettes physiques. Contrairement à la lasergrammétrie, ce choix ne contraint pas à l'utilisation d'un logiciel de traitement prédéterminé par la marque du matériel de captation. En effet, le matériel de captation photogrammétrique consiste en n'importe quel appareil photographique et notamment celui intégré à un téléphone portable.

Lors d'un entretien avec Yulia Donetskaya (chercheuse au laboratoire GSA), celle-ci nous a même recommandé l'utilisation des caméras des téléphones portables plutôt que des véritables appareils photographiques (comme un réflex numérique). En effet, les moindres possibilités de réglage des premières apparaissent comme un avantage sur les seconds lorsqu'il s'agit d'obtenir une série de prises de vue la plus homogène possible. De plus, le traitement photogrammétrique, en plus de s'appuyer sur le principe de la corrélation, peut recourir aux coordonnées GPS des prises de vue afin d'améliorer leur alignement, la localisation GPS des photographies étant plus répandues sur les téléphones portables (connectés à Internet) que sur les appareils photographiques. Au-delà de ces aspects techniques, le recours à un simple téléphone portable en guise de matériel de captation s'inscrit dans une logique d'accessibilité du processus de numérisation 3D.

À l'autre bout du spectre de la chaîne opératoire que constitue la numérisation 3D, se trouve l'appareil de visualisation. Celui-ci constitue le support matériel du traitement photogrammétrique puis de visualisation et d'utilisation des données numériques 3D. Même si nous reviendrons plus longuement sur l'enjeu que constitue cette visualisation des données 3D, on peut néanmoins déjà affirmer que n'importe quel ordinateur permet actuellement la visualisation de ces données, et même les téléphones portables eux-mêmes. Aujourd'hui, la visualisation des données ne constitue donc pas un élément discriminant. En revanche, la performance de ce support matériel en est un au regard des capacités systèmes requises pour faire fonctionner le logiciel de traitement photogrammétrique. Toutefois, s'il est capable de supporter l'utilisation d'un logiciel de CAO (utilisé quotidiennement par les architectes et ce dès l'école) le matériel en question peut également supporter l'utilisation d'un logiciel de traitement photogrammétrique. À titre d'exemple et d'information, l'un des logiciels signale dans son guide d'utilisation qu'est requise la configuration minimale suivante pour son bon fonctionnement : « Windows XP, Mac OS X Snow Leopard, Debian / Ubuntu ; Processeur Intel Core 2 Duo ou équivalent ; 2 Go de RAM » [3].

Enfin, demeure la véritable question du choix du logiciel de traitement photogrammétrique. Au début de l'année 2021, un billet de blog spécialisé dans la 3D dressait la liste des « vingt-quatre meilleurs logiciels de photogrammétrie » [39]. Malheureusement, là où l'offre est la plus diversifiée, c'est-à-dire au niveau des logiciels de traitement photogrammétrique, les retours d'expérience font aujourd'hui encore défaut (de la part d'architectes mais aussi de chercheurs en SHS, lesquels privilégient la lasergrammétrie).

Au regard de notre préoccupation de l'accessibilité, le critère de gratuité du logiciel de traitement photogrammétrique nous permet d'effectuer une première sélection (même si la majorité d'entre eux sont gratuits ou mettent à disposition une version gratuite). Une seconde sélection s'avère donc nécessaire. Celle-ci se base sur la capacité du logiciel à permettre à la fois un traitement automatisé et un autre manuel, correspondant à notre double objectif d'accessibilité d'une part et de performance d'autre part. Ce traitement photogrammétrique, à la fois automatique et manuel, est notamment proposé par trois logiciels : Mesh-

---

room<sup>9</sup> (gratuit et ouvert), 3DF Zephyr<sup>10</sup> (version d'essai gratuite) et Agisoft Metashape<sup>11</sup> (version d'essai gratuite).

Lancés respectivement en 2010 et 2014, Agisoft Metashape et 3DF Zephyr semblent aujourd'hui surplomber le marché du traitement photogrammétrique professionnel. À travers leur version d'essai respective, ils permettent à chacun de s'essayer à une numérisation 3D professionnelle, relativement intuitive dans sa version automatique et quasi illimitée dans ses possibilités dans sa version manuelle. Face à ces deux mastodontes, Meshroom a été mis à disposition des utilisateurs amateurs par l'association AliceVision en 2010. Soucieuse, elle aussi, de « démocratiser »<sup>12</sup> la numérisation 3D, son logiciel, Meshroom est gratuit, libre de droit et surtout, le plus simple d'utilisation.

Malgré des fonctionnements très similaires dans leur principe, les caractéristiques propres à chacun de ces trois logiciels nous contraignent à n'en retenir qu'un seul pour la suite de notre recherche qui vise à simplifier le processus de numérisation 3D. Par ailleurs, de la même manière que des logiciels de CAO comme Rhinocéros 3D et son plug-in Grasshopper sont enseignés de façon transversale à l'ENSA Paris-Malaquais, nous pensons qu'une même logique doit être adoptée pour un logiciel de traitement photogrammétrique. Or, Yulia Donetskaya propose déjà un enseignement en Licence, « Relevé 3D - Vers les techniques du relevé tridimensionnel dans le patrimoine », où elle initie les étudiants à la numérisation 3D grâce au logiciel Agisoft Metashape. De fait, pour ce qui concerne les recommandations pratiques de cette recherche, celles-ci renverront également à ce logiciel de traitement.

### 1.2.3 Expérimentations

D'une part et comme défini précédemment, la numérisation 3D consiste en un processus technique, c'est-à-dire en une succession d'étapes permettant l'obtention d'un avatar numérique. D'autre part et comme mentionné plus haut, ce processus technique nécessite également des outils de trois ordres : matériel, appareil et logiciel. Par conséquent, la numérisation 3D est conditionnée par un grand nombre de facteurs, ce qui a nécessité de délimiter préalablement notre domaine d'expérimentation.

En ce sens, les questions d'ordre matériel, appareil et logiciel, lesquelles auraient pu donner lieu à des tests comparatifs ont été tranchées *a priori* et dans l'objectif de rendre accessible ladite pratique. Ainsi, une fois la photogrammétrie préférée à la lasergrammétrie, nous n'avons eu recours lors de nos expérimentations qu'à un seul et même matériel de captation (un téléphone portable<sup>13</sup>), qu'à un seul et même appareil (un PC portable<sup>14</sup>) et qu'à un seul et même logiciel (Agisoft Metashape<sup>15</sup>). Ces choix ainsi fixés et maintenus lors de l'ensemble des expérimentations présentent l'avantage de permettre, voire même de faciliter, la comparaison des résultats obtenus. Cependant, ils présentent à l'inverse le désavantage de contraindre ces mêmes résultats au cas particulier ou, au mieux, à une certaine exemplarité, plutôt qu'à prétendre à une quelconque généralisation ou démonstration.

Au-delà des outils, la numérisation 3D consiste en différentes actions à réaliser. En réalité, celles-ci peuvent être réduites à deux ensembles : d'une part, la captation des données photogrammétriques, d'autre part, le traitement de ces données. Nous avons justifié précédemment le choix du logiciel Agisoft Metashape par la possibilité qu'il offre d'un traitement

---

9. <https://alicevision.org/>

10. <https://www.3dflow.net/>

11. <https://www.agisoft.com/>

12. <https://alicevision.org/>

13. Apple ; iPhone 6s ; Appareil photo 12 Mpx.

14. Asus ; Processeur Intel(R) Core(TM) i7-8550U CPU ; RAM 8,00 Go ; Système d'exploitation 64 bits.

15. Standard 64 bits ; Version 1.7.2.

---

automatisé des données. Concrètement, l'utilisateur n'a qu'à importer sa série de photographies dans le logiciel et lancer le traitement (paramétré par défaut) pour obtenir, quelques heures plus tard, une version numérique et tridimensionnelle de sa maquette physique.

En amont et à la différence de ce traitement photogrammétrique automatisé, la captation des données photogrammétriques se caractérise par sa subjectivité, au sens de la nécessaire implication de l'opérateur. Cette étape nous est donc apparue pertinente à investiguer par l'expérimentation de manière à la stabiliser au mieux, elle dont, à la fois, le rôle est déterminant et que l'implication d'un opérateur soumet aux aléas. Même s'il ne s'agit à ce jour que de prospective, on peut évoquer ici un futur, plus ou moins lointain, où cette étape sera elle aussi automatisée grâce à la robotique.

Toutefois, l'automatisation de la captation des données photogrammétriques ne palliera pas l'ensemble de ce qui conditionne cette étape du processus de numérisation 3D. En effet, si cette automatisation permettra de régulariser les prises de vue, elle nécessitera toujours d'assurer à ses prises de vue des conditions environnementales optimales de captation. Ces conditions, en particulier l'éclairage du modèle physique, ainsi que leurs variations, ont constitué le second champ d'expérimentation de cette recherche.

Enfin, l'objet d'étude de la présente recherche ne consiste pas en la seule numérisation 3D, en tant que processus technique valant pour lui-même, mais bien en la numérisation 3D des maquettes physiques, c'est-à-dire en un processus cantonné à un certain type d'objet. De fait, le troisième et dernier champ d'expérimentation de cette recherche a été orienté vers les maquettes physiques elles-mêmes et leurs caractéristiques matérielles.

Finalement, quelque que soit le champ d'expérimentation (stabilisation de la captation des données, optimisation des conditions de captation et adéquation du modèle et du processus), son investigation a consisté à faire varier un paramètre déterminant (respectivement le nombre et la position des captures, l'éclairage du modèle ainsi que son échelle et sa matérialité) pour finalement comparer les résultats obtenus pour chaque variation et en dresser des conclusions.

## **1.3 Résultats**

Quelques exemples signifiants de numérisation 3D de maquettes physiques produits dans le cadre de cette étude sont directement manipulables en suivant ce lien : <https://skfb.ly/orOA9>. (Cf. Figure 1.2)

### **1.3.1 Stabilisation de la captation des données**

La stabilisation de la captation des données photogrammétriques vise à pallier les aléas relatifs à la subjectivité inhérente à cette étape du processus de numérisation 3D. De la série d'expérimentations réalisée, on peut premièrement avancer que la quantité de prises de vue permet de relativiser leur qualité, voire même que la première (la quantité) prévaut sur la seconde (la qualité). Cette observation empirique ne fait qu'illustrer la nature même de la photogrammétrie, laquelle s'appuie sur la corrélation des images, c'est-à-dire sur leur degré de superposition. (Cf. Figure 1.3) Deuxièmement, ces expérimentations ont permis de stabiliser un schéma de positionnement des prises de vue qui, là aussi, ne fait qu'illustrer le principe même de fonctionnement de la photogrammétrie par corrélation d'images. Au fil des expérimentations, nous avons adopté un positionnement systématique des captures dessinant trois cercles (comparables à trois méridiens d'un globe), constitué chacun d'une série linéaire de captures (dont le rythme serait comparables aux parallèles dudit globe). Bien au-delà de l'ambition de cette recherche, l'enjeu que constitue l'automatisation de la

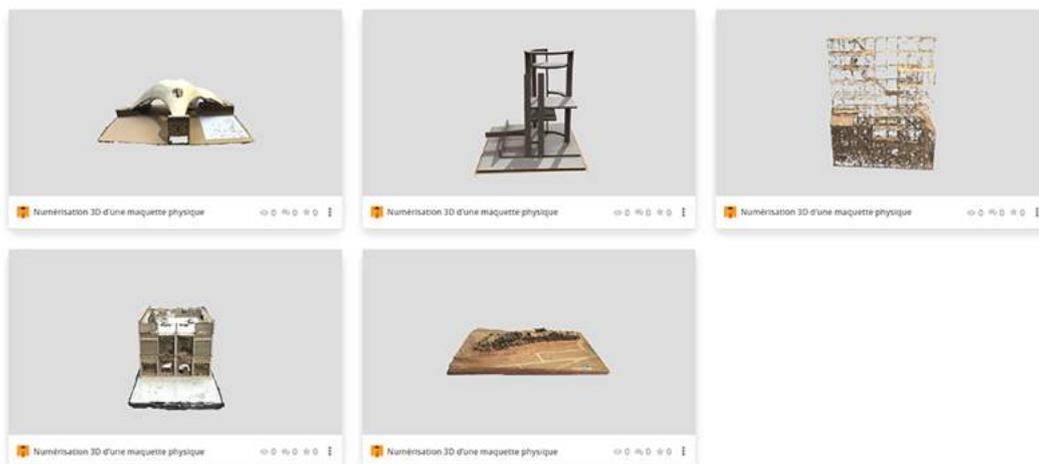


FIGURE 1.2 – Collection de maquettes numérisées depuis l’interface Sketchfab

Source : <https://skfb.ly/orOA9>



FIGURE 1.3 – Série de cinquante-deux prises de vue autour d’une maquette physique en vue de sa numérisation 3D par photogrammétrie

---

captation des données photogrammétriques se situe sans doute dans le déplacement robotisé du matériel de captation selon le schéma ici établi. (Cf. Figure 1.4)

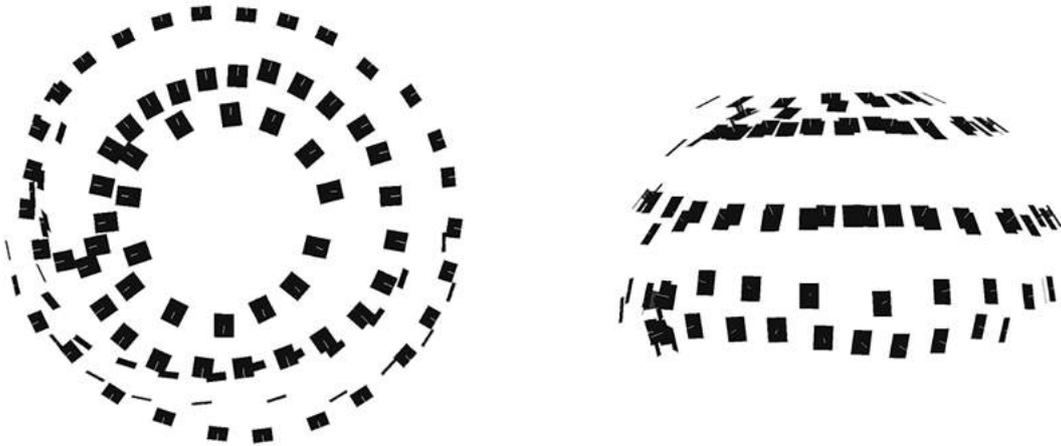


FIGURE 1.4 – L’alignement automatique des prises de vue dans le logiciel de photogrammétrie explicite le schéma de positionnement adopté, en plan (à gauche) et en élévation (à droite) autour d’une maquette physique

### 1.3.2 Optimisation des conditions de captation

La stabilisation de la captation des données à travers un schéma de positionnement et un nombre de prises de vue ne permet pas, à elle seule, de garantir une captation optimale des données photogrammétriques. En effet, cette étape du processus de numérisation 3D est également soumise à son environnement, caractérisée notamment par la qualité et le niveau de son éclairage. Malgré de nombreuses configurations d’éclairage artificiel, celui-ci n’a jamais permis d’atteindre les conditions optimales offertes par une captation en extérieur et sous un ciel nuageux. (Cf. Figure 1.5) Les deux principaux écueils de l’éclairage du modèle au moment de sa numérisation consistent en des ombres et des contre-jours, lesquels s’opposent à l’homogénéité de l’ensemble des prises de vue dont le degré détermine la qualité du traitement photogrammétrique. Le seul contraste admissible doit se situer entre le modèle et son environnement, par exemple, quant à leur gamme respective de couleurs, plutôt qu’entre des parties du modèle.

### 1.3.3 Adéquation du modèle et du processus

Enfin, il est apparu, au fil des expérimentations, que la matérialité des maquettes physiques détermine *a priori* la qualité de leur version numérisée. Malgré une captation des données stabilisée et dont les conditions sont optimales, un modèle constitué de matériaux transparents, translucides ou réfléchissants, ne pourra être numérisé grâce à la photogrammétrie. Des matériaux mats, peu soumis à l’influence de la lumière (dont on a vu qu’elle conditionnait la qualité des prises de vue) assurent ainsi une meilleure numérisation que des matériaux brillants. Par ailleurs, on a pu observer que l’échelle du modèle déterminait elle aussi le degré de performance du processus de numérisation. Ainsi, la photogrammétrie se heurte au haut degré de détail qui caractérise certaines maquettes d’architecture. Si la volumétrie générale est systématiquement restituée de façon satisfaisante, il faut conclure ici que ces expérimentations, telles que menées, illustrent une relative inadéquation entre l’échelle des maquettes physiques et le processus de numérisation 3D. (Cf. Figure 1.6)

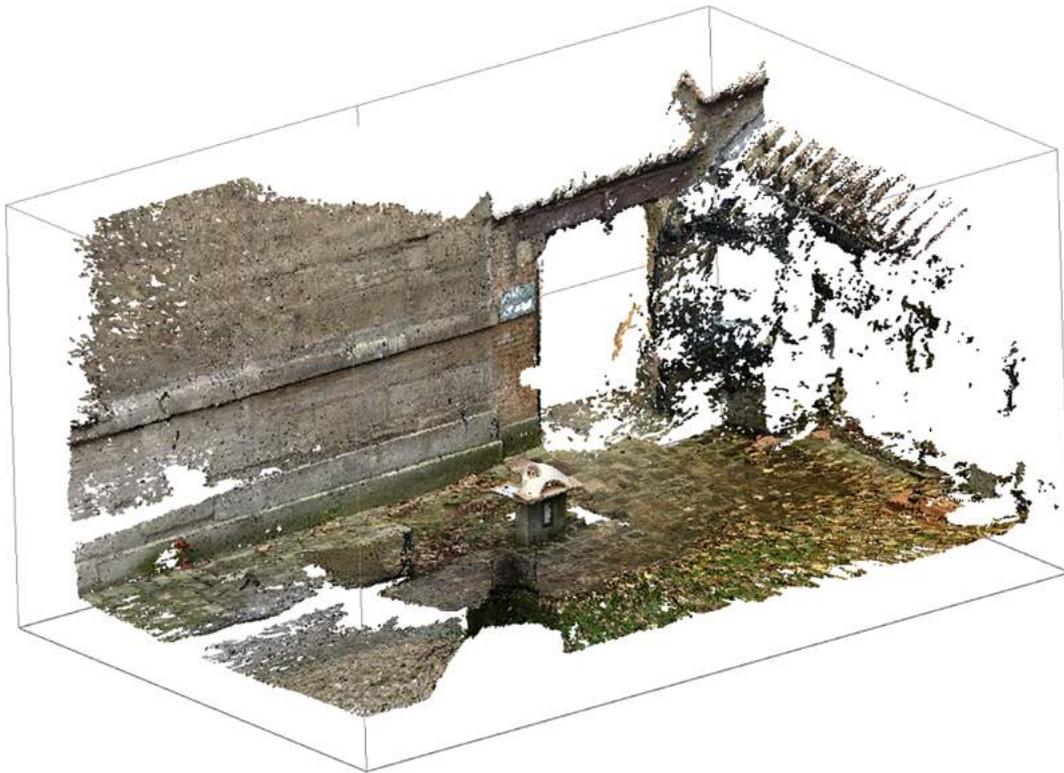


FIGURE 1.5 – La maquette physique (au centre) restituée par le logiciel de photogrammétrie dans un environnement optimisé de captation : extérieur et en contraste avec elle

#### 1.4 Un processus, plusieurs pratiques

Les parties précédentes ont permis de définir la numérisation 3D des maquettes physiques avant tout en tant que processus technique. Celui-ci désormais explicité et, peut-être, plus accessible, il convient à présent d'interroger ses usages, à la fois connus et potentiels. Certes, certains d'entre eux ont déjà été mentionnés : en particulier dans le champ architectural à travers les exemples des pratiques du projet au sein d'agences telles que SOM ou Gehry Partners, nous aurons l'occasion d'y revenir. En introduction, il a également été fait mention de problématiques matérielles et communes, notamment celle du stockage, auxquelles le processus de numérisation 3D peut fournir une réponse adaptée. Cependant, au-delà de ces utilisations fonctionnelles et relativement ordinaires de la numérisation 3D,



FIGURE 1.6 – Un résultat peu concluant de numérisation 3D d'une maquette physique sans doute dû à l'échelle des tourillons en balsa de 2 mm de diamètre

Accès au modèle 3D : <https://skfb.ly/orMrV>

---

on se propose d'investiguer le champ des possibles ouvert par ce processus dans le domaine de l'architecture. Depuis la pratique du métier d'architecte jusqu'à la constitution d'un fonds d'archives d'agence, les potentiels recours à la numérisation 3D des maquettes physiques sont nombreux et, surtout, permettent d'interroger nos conceptions et pratiques quotidiennes du projet. Au cours de notre recherche, trois enjeux se sont distingués parmi les potentialités offertes par la mise en pratique de ce processus : au niveau de la conception, à celui du partage et au niveau de l'archivage. Ces trois moments qui ponctuent un projet d'architecture peuvent être questionnés par le recours à la numérisation 3D. Il s'agit d'explicitier quels changements elle peut induire tout autant que les résistances qu'elle peut rencontrer ou encore les tendances qu'elle peut permettre d'entériner.

#### 1.4.1 Numériser pour concevoir / Concevoir pour numériser

On cherche ici à définir le rôle que peut jouer la numérisation 3D des maquettes physiques dans le processus de conception architecturale. Pour ce faire, on se propose d'abord de repérer temporellement le moment opportun de son intervention au coeur de ce processus. Cependant, ce repérage temporel est entravé par le fait que le projet d'architecture ne consiste pas en un processus intellectuel strictement linéaire, de l'ébauche au rendu, de l'esquisse sans échelle au détail technique à l'échelle 1 :1. Il est davantage constitué d'allers-retours entre les différents niveaux de précision du projet, de pistes poursuivies puis abandonnées et peut-être réempruntées plus tard. Il en va de même des outils de la conception. Le dessin, par exemple, peut être employé à la fois comme point de départ à travers un croquis de création et comme point d'arrivée à travers une perspective de démonstration. La maquette, elle aussi, peut servir à la recherche d'une volumétrie autant qu'à la communication finale du projet. Par conséquent, il n'existerait pas *a priori* de phase du projet d'architecture davantage prédestinée qu'une autre à l'utilisation de la numérisation 3D.

Néanmoins, certains semblent cantonner la maquette physique à son seul usage de recherche volumétrique [37]. En ce sens, ces derniers avancent un argument étymologique : le mot français, apparu qu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, serait dérivé de l'italien *macchietta* qu'ils traduisent par esquisse (*sketch*) [37, p. 18]. Nous aurons l'occasion de revenir sur cette question étymologique mais on peut d'ores et déjà souligner que cette traduction ne fait pas l'unanimité, d'autres remontant jusqu'au mot latin *macula* désignant une tâche [11]. Cependant, même ceux qui favorisent la racine latine, lorsqu'ils rapportent des « pratiques projectuelles qui recherchent justement l'épuisement de solutions par la surabondante construction de maquettes » [11], mettent en avant le recours à cet outil aux prémices de la conception dans le but de fixer une volumétrie.

Cette manière de considérer la maquette physique avant tout comme un outil d'étude est corroborée par les récits faits du processus de conception dans un grand nombre d'agences. Par exemple, on peut lire que « pour l'architecte, ces maquettes physiques incarnent symboliquement son autorité, matérialisent son acte créateur et le définissent en tant qu'auteur. Elles constituent aussi des objets presque inviolables, voire sacrés, et garantissent à l'architecte, à travers leurs manifestations, une certaine considération de ses collaborateurs. » [11]. Cette sacralisation de la maquette d'étude, observée chez Gehry Partners [29], justifie le recours par ses collaborateurs à la numérisation 3D, laquelle garantit la répliquabilité du modèle (copie à l'identique), considérée comme la véritable oeuvre de l'architecte. Cette conception de la maquette comme oeuvre, dont on ne cherche que la mise à l'échelle 1 :1, est également illustrée par l'utilisation faite de la numérisation 3D par l'agence SOM pour l'agrandissement de la sculpture de Miró. Là encore, une fois le modèle physique fixé, la suite du processus de projet ne consiste qu'à en construire une version identique quant à sa forme et ne variant que par ses dimensions.

---

Par ailleurs, il est signifiant que ces deux exemples connus de numérisation 3D de maquettes physiques par des architectes relèvent soit d'une véritable sculpture (Miró), soit d'une tendance sculpturale de l'architecture (Gehry). Plus récemment, c'est l'installation *Incidental Space* de l'architecte Christian Kerez, présentée dans le Pavillon Suisse de la Biennale de Venise de 2016, qui a incarné un nouvel emploi du processus de numérisation 3D dans le champ architectural. À l'issue d'un travail de recherche volumétrique effectué à l'aide d'une centaine de maquettes physiques, l'une d'entre elles a été numérisée, agrandie, modifiée puis imprimée en négatif de manière à obtenir le moule de l'installation finalement construite. Au cours du processus de projet de chacun de ces trois exemples, la numérisation 3D intervient seulement une fois la volumétrie fixée en maquette physique et en amont de sa rationalisation grâce à des outils numériques (dimensionnement structurel, triangulation de surface).

En matière de processus de conception, la maquette numérisée, obtenue grâce à la numérisation 3D, incarne donc un transfert, sans altération de la volumétrie, du monde physique au monde numérique. Dans le premier, la matérialité de la maquette physique permet une recherche de la forme à la manière d'un modelage relativement artisanal et sculptural. Dans le second, la maquette numérisée constitue un support pour des calculs complexes et informatisés visant à la concrétisation du projet. Numérisée, la maquette peut également constituer le support d'un travail collectif (à l'inverse de la maquette physique) en prétendant au statut de maquette BIM et en intégrant à la conception d'autres acteurs que les seuls architectes (bureau d'étude, entreprise, maîtrise d'ouvrage) [17, 27].

Finalement, la numérisation 3D a été perçue jusqu'ici dans notre discours seulement au service de la conception, ou plutôt, d'un certain mode de conception dans lequel la répliquabilité d'un modèle physique constitue un enjeu majeur [34]. À l'inverse et au sein des mêmes agences déjà mentionnées, la conception peut elle aussi se mettre au service de la numérisation 3D. L'exemple qui illustre le mieux l'anticipation de la numérisation 3D dans le processus de conception est à nouveau donné par Bottazzi. Celui-ci rapporte effectivement que l'agence Gehry Partners a changé sa palette de matériaux destinés à la fabrication de maquettes d'étude en vue de leur numérisation 3D<sup>16</sup>, certains matériaux favorisant ou, au contraire, entravant la captation numérique.

Même si un tel changement peut sembler anecdotique et sans impact réel sur l'issue du projet d'architecture, il touche néanmoins au mode d'expression de l'architecte. En ce sens, on peut lire que « chacune de ces maquettes physiques prouve, à travers leur matérialité et la diversité de leurs expressions, la construction d'une multiplicité de langages permettant d'asseoir un discours architectural singulier. » [11]. La maquette physique participe donc, au même titre que l'ensemble de la documentation produite au cours d'un projet d'architecture, d'un langage propre à un praticien. Utilisateurs fréquents de la numérisation 3D, les collaborateurs de l'agence Gehry Partners se sont donc résolus à modifier leur vocabulaire au profit de ce processus. De la même manière, certaines agences seraient contraintes de modifier leur langage pour recourir au processus de numérisation 3D. Une architecture de la transparence, caractéristique d'une agence comme SANAA, par exemple, dont les projets sont traduits par des maquettes d'étude intégrant du plexiglas empêchent, en l'état, tout recours à la numérisation 3D. En effet, les différents guides d'utilisation édités par les logiciels de traitement photogrammétrique soulignent que le processus de numérisation 3D est compromis par la présence d'« objets non texturés, brillants, réfléchissants ou transparents » [3]. À travers nos différentes tentatives de numérisation 3D d'une maquette intégrant du plexiglas, nous avons effectivement constaté l'impossibilité pour le logiciel de traitement photogrammétrique d'aligner les différentes prises de vue et, par conséquent, de produire

---

16. « While working on the Lewis House, the office also had to change the range of materials to use for the construction of working models » [5, p. 173].

---

le modèle 3D. Cet échec illustre finalement la manière dont un outil de conception, *a priori* mis à son service, peut en réalité contraindre une partie du processus de projet (la recherche volumétrique à partir de maquettes physiques) au profit d'une autre (la transposition d'une volumétrie fixée en maquette du monde physique au monde numérique).

#### 1.4.2 Numériser pour partager

L'écriture de cet article est à inscrire dans le contexte singulier d'une crise sanitaire où l'enseignement à distance s'est vu généralisé à des disciplines, comme l'architecture, ne s'y prêtant pas spontanément. En effet, le studio de projet, à la base de l'enseignement de l'architecture, se caractérise par des échanges entre étudiants et professeurs autour et à partir d'une documentation retranscrivant l'avancée du projet. Progressivement, étudiants et professeurs sont parvenus à s'approprier de nouveaux outils de manière à transposer, plus ou moins efficacement, ces discussions du monde physique au monde numérique.

Face à cela, la résistance de la maquette physique à cette transposition du physique au numérique l'a, en partie, exclue du processus de conception au profit de la maquette numérique, plus facile à partager à distance puisque nativement numérique. Concrètement, une fois partagée, une maquette numérique peut ainsi être manipulée conjointement par tous les participants d'une même visioconférence, transposition concrète et efficiente dans un monde exclusivement numérique de la manipulation réelle des maquettes physiques. En revanche, en amont de la diffusion, du point de vue de la conception et de la recherche volumétrique notamment, la maquette numérique n'offre pas la souplesse, l'approximation ou encore l'aléatoire d'une maquette physique. Par conséquent, dans ce contexte singulier d'enseignement de l'architecture à distance, il est apparu véritablement nécessaire, comme trente ans auparavant chez Gehry Partners, d'automatiser la transposition de recherches volumétriques effectuées à partir d'une maquette physique à travers une maquette numérique.

Il s'agit à présent d'interroger la maniabilité des maquettes une fois celles-ci numérisées. Le statut privilégié de l'outil maquette en matière de médiation tient à sa facilité d'appréhension par la manipulation (observateur fixe, maquette mobile) et, lorsque celle-ci n'est pas permise (comme dans un contexte de conservation), par la visualisation (observateur mobile, maquette fixe). Même si la réalité virtuelle permet d'ores et déjà à l'observateur d'être mobile dans un monde virtuel, la manipulation apparaît encore nettement plus accessible. Pour conserver leur pertinence une fois numérisées, les maquettes doivent donc être manipulables. Comme mentionné plus haut, cela est notamment possible lors d'une visioconférence où l'un des participants ne partage aux autres que son écran à partir duquel est diffusé le modèle numérique.

Au-delà du seul cadre des visioconférences, se pose la question du partage des maquettes numérisées, c'est-à-dire de leur manipulation à travers non plus seulement l'appareil à partir duquel elles ont été générées mais à partir de tous les appareils. En somme, la diffusion des maquettes numérisées pose la question de l'interopérabilité des données 3D. La solution la plus évidente à cette problématique consiste à recourir au format PDF, lequel supporte les données 3D. Cependant, la consultation des données 3D contenues dans un fichier PDF nécessite le téléchargement préalable dudit document. Cela ne pose aucun problème majeur dans le cadre d'un échange ciblé où le destinataire est identifié et le contenu du fichier identifiable.

En revanche, la diffusion au format PDF, sans aperçu de contenu, s'avère davantage problématique dans le cadre d'une base de données où le contenu de chaque fichier doit donc être explicité (grâce, par exemple, à des métadonnées à renseigner). En réalité, la manipulation des données 3D sans leur téléchargement préalable a récemment été rendu possible par différentes plateformes d'échange de données 3D. Le développement et l'essor de ces der-

nières est à rapprocher de ceux de l'impression 3D, pour laquelle est nécessaire le partage des modèles tridimensionnels comme, auparavant, le partage des images bidimensionnelles pour l'impression 2D traditionnelle.



FIGURE 1.7 – Martijn Stellingwerff passant en revue grâce à la réalité virtuelle les maquettes numérisées de ses étudiants [34]

Celle que nous avons choisie dans le cadre de cette recherche afin de diffuser quelques exemples de numérisation 3D de maquettes physiques, Sketchfab<sup>17</sup>, permet justement la manipulation des données 3D sans leur téléchargement préalable et gratuitement. C'est également la plateforme choisie par Martijn Stellingwerff, professeur à l'Université de technologie de Delft, pour son séminaire sur les maquettes ouvert aux étudiants du monde entier<sup>18</sup>. Celui-ci va jusqu'à recourir à la réalité virtuelle lors du passage en revue des projets de chacun des étudiants. (Cf. Figure 1.7)



FIGURE 1.8 – Manipulation depuis un téléphone de la maquette numérisée du Krak des Chevaliers de la Cité de l'architecture [35, 36]

Pour conclure cette sous-partie consacrée au partage des maquettes numérisées, il faut mentionner le recours de plus en plus fréquent à la numérisation 3D des maquettes physiques par les institutions culturelles dans l'objectif de valoriser leurs collections. Les maquettes de ville, en particulier, ont fait l'objet de nombreuses campagnes de numérisation

17. <https://sketchfab.com/>

18. « With so many participants from all over the world it would be great to share ideas by showing sketches on your Weebly portfolios. » [34].

---

3D et de diffusion de leurs avatars numériques depuis les années 2010 [8, 6, 18, 9, 16]. Là encore, la numérisation 3D est orientée *a priori* vers le partage du modèle physique. Dans la synthèse réalisée par Christine Chevrier, Gilles Halin et Kévin Jacquot, on peut ainsi lire que : « La diffusion peut ainsi répondre à l'enjeu d'accessibilité qui, réalisée sur internet et dans le navigateur, permet d'atteindre un public large. Le visualiseur Sketchfab est très populaire et permet l'annotation des modèles virtuels. » [8]. D'ordre dystopique ou non, ces différents exemples accèdent à l'hypothèse d'un futur tout numérique que la numérisation 3D participe à bâtir. (Cf. Figure 1.8)

### 1.4.3 Numériser pour archiver

Le recours à la numérisation 3D des maquettes physiques par les institutions culturelles (parmi lesquelles des musées mais également des bibliothèques [10]) ne se justifie pas seulement par leur volonté de partager leur collection mais également d'en assurer une certaine forme de pérennité. Cet archivage d'objets tridimensionnels a par ailleurs constitué le point de départ de cette recherche : face, d'une part, à la surabondance des maquettes produites au cours d'un cursus en école d'architecture et, d'autre part, à l'impossibilité de les stocker physiquement, par quels moyens peut-on en garder une trace pertinente avant de se débarrasser de l'original ?

L'un des enjeux de ce questionnement réside dans le degré de pertinence du souvenir créé et conservé de l'objet tridimensionnel amené à disparaître. En effet, l'outil maquette se caractérisant d'abord par son volume, sa tridimensionnalité, une photographie peut-elle réellement prétendre constituer une archive fidèle de l'original ? C'est dans ce contexte que la numérisation 3D nous est d'abord apparue comme un outil pour archiver les maquettes physiques.

On peut se demander si cet enjeu d'archivage, intimement lié à la fois à l'enseignement en école d'architecture et, plus particulièrement, à un enseignement dispensé dans des locaux relativement exigus (et sans doute destinés à l'être davantage), demeure pertinent au-delà de ce contexte scolaire particulier. Au fil de nos recherches, cet enjeu d'archivage considéré dans un contexte professionnel, celui de la pratique de l'architecture en agence, s'est finalement avéré même plus préoccupant que considéré dans le cadre seulement scolaire. En ce sens, la constitution puis la conservation des archives d'architectes constituent à la fois un impératif légal relatif à la responsabilité décennale du praticien [12], un outil décisif dans l'avènement d'un nouveau paradigme d'entretien et de réhabilitation [31] ou encore une base aux travaux historiques [19].

Toutefois, aussi utile que puisse paraître l'archivage de la documentation d'un projet, ce processus se heurte à la variété de cette documentation et, notamment, à la problématique déjà évoquée de la conservation des objets tridimensionnels que constituent les maquettes. En réalité, si la numérisation 3D permet de dématérialiser le modèle tout en conservant sa caractéristique tridimensionnelle, la pérennisation de ces données 3D n'est, *a priori*, pas plus certaine que celle du modèle physique lui-même. En effet, les problématiques de conservation (pérennisation, stockage) ne sont que transposées par la numérisation 3D du monde physique au monde numérique. Par conséquent, il convient de se demander dans lequel de ces deux mondes, numériques et physiques (considérés abusivement distincts), les contraintes inhérentes à l'archivage des objets tridimensionnels peuvent être le plus facilement résolues.

De l'aveu même des archivistes des centres d'archives d'architecture, en proie avec de nouvelles formes de documentation du projet, la pérennisation des données numériques 3D ne fait pas encore l'objet de protocoles établis et reconnus [21, 33]. Parmi les utilisateurs de maquettes numériques 3D, en plus des acteurs du BTP, on en trouve issus de l'ingénierie,

---

aéronautique ou automobile, de la culture (au travers de chantiers institutionnels de numérisation d'œuvres), ou encore issus de la recherche en Sciences Humaines et Sociales (SHS). Le secret industriel limite la diffusion des processus et des méthodes employés dans les secteurs aéronautiques et automobiles, même en ce qui concerne la pérennisation des données issues de maquettes numériques 3D.

En revanche, les chercheurs en SHS ne sont pas tenus au même impératif du secret. Au contraire même, puisqu'en bons chercheurs, tenus à la rigueur scientifique, à la transparence de leurs activités, à la diffusion de leurs connaissances ainsi qu'à la pédagogie, ils rendent accessibles leurs processus et méthodes, notamment en ce qui concerne la pérennisation des données issues de maquettes numériques 3D.

Ces chercheurs en SHS, confrontés à une problématique similaire à la nôtre quant à la pérennisation de leurs données, se sont regroupés au sein du Consortium 3D (CST3D). Celui-ci a été créé en 2014 à l'initiative conjointe de la Très Grande Infrastructure de Recherche (TGIR) Huma-Num, du Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur (CINES) et du laboratoire Archéovision. Ce consortium a pour but affiché « de rendre possible l'archivage des modèles 3D » [15] auxquels les archéologues, notamment, ont de plus en plus recours. Ce but, ils l'ont atteint notamment à travers la rédaction d'un article scientifique, « L'archivage pérenne des modèles numériques 3D pour les SHS » [15], et d'autres publications qui figurent parmi les sources principales de notre recherche [2, 7, 14].

De manière synthétique, leur mode de pérennisation *a priori* repose sur l'élaboration d'un Plan de Gestion des Données (PGD) et son application systématique en parallèle de leurs chantiers de captation tridimensionnelle des vestiges archéologiques. Ce plan repose sur cinq opérations : convertir, distinguer, renseigner, organiser et nommer. Finalement, même si l'écart peut paraître grand entre les pratiques et les objectifs des chercheurs en SHS et les architectes, l'adaptation de la méthode de pérennisation *a priori* des premiers apparaît comme une occasion de parfaire celle des seconds.

Pour conclure cette partie consacrée à l'archivage permis par la numérisation 3D, ou peut-être davantage l'ouvrir, on peut s'interroger plus généralement sur la distinction entre la sauvegarde et l'archivage. Tandis que la première consiste en la copie et le stockage d'un ensemble de données, le second relève du processus qui a pour triple ambition de « conserver, rendre accessible et préserver l'intelligibilité » [15]. Même si les contraintes techniques inhérentes à la pérennisation des données numériques 3D sont contournées, grâce notamment aux méthodes issues des SHS, on peut se demander s'il est souhaitable de généraliser la numérisation 3D des maquettes physiques en vue de leur archivage. Il faut sans doute rappeler ici que l'archivage consiste d'abord en un processus de sélection des données, jugées dignes d'être ensuite conservées, partagées et préservées quant à leur intelligibilité.

Pour s'en convaincre et face au risque d'un recours systématique à la numérisation 3D des maquettes physiques (nourri par le mirage d'un stockage numérique illimité), il s'agit peut-être d'entendre la mise en garde des premiers destinataires de ces archives, les historiens, face au danger du « trop de mémoire » [4] où à encore à l'impératif de mémoire [30]. Et, si cela ne suffit pas, on peut apercevoir quelques instants la dystopie que constitue l'incapacité à oublier d'un personnage fictif comme Ireneo Funes qui avoue que sa « mémoire, monsieur, est comme un tas d'ordures »<sup>19</sup>.

---

19. Jorge Luis Borges, *Funes ou la mémoire*, dans *Fictions. Œuvres complètes*, Paris, Gallimard, Bibliothèque de la Pléiade, t. I, 1993J, p. 514 [28].

---

## 1.5 Conclusion

L'un des premiers objectifs de cette recherche consistait à rendre accessible la numérisation 3D des maquettes physiques, en particulier aux étudiants en école d'architecture. Cela s'est d'abord traduit concrètement à travers le choix d'une technologie de numérisation 3D, la photogrammétrie, ainsi que d'outils (matériel, appareil et logiciel) eux-mêmes sélectionnés pour leur accessibilité. De la sorte, les expérimentations menées dans le cadre de cette recherche et ici restituées peuvent être facilement reproduites et, surtout, poursuivies. Au-delà des contraintes purement matérielles, cette mise à disposition du processus de numérisation 3D tient également à son intelligibilité à laquelle les recommandations énoncées plus haut cherchent à contribuer.

Cependant, ces recommandations demeurent, à ce jour, cantonnées à cet article et donc réellement disponibles qu'à travers sa lecture (paradoxalement plus longue que celle du mode d'emploi des logiciels de photogrammétrie). Par ailleurs, le format universitaire de cette restitution, même s'il permet d'argumenter et d'étayer notre propos, ne participe pas totalement de cet objectif de mise à disposition de ce nouvel outil pour le projet d'architecture considéré dans son temps long (du moment de la conception, éventuellement collaborative, à celui de l'archivage).

De fait, il nous faut énoncer ici la nécessité de prolonger notre objectif théorique initial par son pendant pratique qui consiste en la diffusion de ces résultats à l'image des pratiques observées en SHS en matière de pérennisation des données 3D. Pour ce faire, une simplification et une synthèse du propos apparaissent indispensables pour, ensuite, adopter un format et un mode de diffusion les mieux adaptés : un poster affiché dans les écoles d'architecture, un guide diffusé par e-mail ou encore un article disponible sur Internet. À ce propos, il faut tout de même mentionner ici notre tentative passée de synthétisation de nos résultats en vue de leur diffusion. Celle-ci, peu concluante, a surtout illustré à la fois l'écueil de la réduction excessive du propos et celui d'une exhaustivité peu engageante. Il reste donc à trouver le bon compromis en matière de fond et le juste mode de communication pour ce qui est de la forme.

D'un point de vue historique, on a pu constater que la diffusion des résultats en matière de retranscription du réel ont présidé à la recherche depuis la Renaissance. Or, depuis que cette pratique s'est, en partie, poursuivie dans le champ architectural et au sein d'agences d'architecture, cette logique de diffusion de l'information s'est perdue pour la première fois au profit d'une logique de concurrence entre les acteurs de cette recherche. Il convient donc de réinscrire la poursuite de cette longue quête de retranscription du réel dans le domaine public.

Parallèlement, une diffusion informelle du traitement de cet objet d'étude a d'ores et déjà permis d'en démontrer l'intérêt relatif auprès d'étudiants et d'enseignants. (Cf. Figure 1.9) Ainsi, des maquettes réalisées çà et là ont été numérisées afin d'en conserver la trace, sinon perdues chaque année, et de diffuser celle-ci auprès des promotions d'étudiants suivantes. Toutefois, cet intérêt s'est porté jusqu'ici davantage sur le résultat de la numérisation 3D plutôt que sur le processus lui-même. En ce sens, il apparaît qu'à terme, si la pratique de la numérisation 3D des maquettes numérisées est véritablement entérinée, une réflexion, qui n'a pas été menée dans le cadre de cette recherche, devra l'être au sujet de la constitution d'une base de données 3D propre aux écoles d'architecture.

Il est effectivement apparu nécessaire, au fil de cette recherche, de penser conjointement le processus de numérisation 3D et la gestion des données numériques 3D, au sein d'une base de données. Cette mise en évidence ne s'est néanmoins pas accompagnée d'une mise en pratique. Nos expérimentations ont ainsi été exclusivement consacrées à l'optimisation du processus de numérisation 3D plutôt qu'à la gestion des données numériques 3D dont la



FIGURE 1.9 – Résultat de la numérisation 3D d’une maquette réalisée dans le cadre de l’enseignement *Form finding* dispensé par T. Ciblac à l’ENSA Paris-Malaquais

Source : <https://skfb.ly/orOZY>

pérennisation et le stockage constitue des enjeux importants. Il reste donc encore à investir par l’expérimentation le champ de la base de données numériques 3D. Car, au-delà de simples expérimentations ou grâce à elles, la constitution d’une proto-archives pour l’ENSA-Malaquais pourrait en constituer l’une des issues pratiques. Celle-ci permettrait le dépôt et la consultation de maquettes numérisées produites dans le cadre de l’école sur plusieurs générations d’élèves.

Enfin, alors que nous n’avons discuté à travers cet article que de trois manières de tirer parti des maquettes numérisées (concevoir, partager et archiver), sur la base de précédents connus et observés, on peut imaginer que ces usages seront amenés à se multiplier à l’avenir. Au vu du recours croissant des jeunes générations d’architectes aux outils numériques, depuis l’école et jusqu’à l’agence, et même jusqu’au centre d’archives, l’utilisation des techniques de numérisation 3D tend sans doute à se généraliser. Il reste à savoir si cette utilisation courante du scanner 3D, comme celle antérieure du scanner 2D, générera de nouveaux usages ou bien si les contraintes inhérentes à ce processus entraveront sa démocratisation.

# Bibliographie

- [1] 3DFLOW : 3Dflow 3DF Zephyr. User Manual. Version 4.5. *3Df*, 2019. URL <http://3dflow.net/zephyr-doc/3DF%20Zephyr%20Manual%204.500%20English.pdf>.
- [2] Violette ABERGEL, Pascal BENISTANT et Laurent BERGEROT : Les recommandations du Consortium 3D SHS. *Consortium 3D SHS*, 2019. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01683842v4/document>.
- [3] AGISOFT : Agisoft photoscan. manuel de l'utilisateur. professional edition. *Agisoft*, 2015. URL <https://www.agisoft.com/pdf/>.
- [4] François BÉDARIDA : Une invitation à penser l'histoire : Paul Ricoeur. La mémoire, l'histoire et l'oubli. *Revue historique*, 3(619):731–739, 2001. URL <https://www.cairn.info/revue-historique-2001-3-page-731.htm>.
- [5] Roberto BOTTAZZI : *Digital Architecture Beyond Computers. Fragments of a Cultural History of Computational Design*. Bloomsbury, Londres, 2018.
- [6] Stéphanie BOUSQUET : *La numérisation 3D de maquettes et de plans-reliefs*. Mémoire de Master 2, Université Toulouse II - Jean Jaurès, septembre 2012. URL <https://stefaniebousquet.files.wordpress.com/>.
- [7] Mehdi CHAYANI, Caroline DELEVOIE et Xavier GRANIER : Le Conservatoire National des Données 3D SHS : publier et conserver des données 3D créées pour des recherches en SHS. *La Lettre de l'InSHS*, pages 10–12, septembre 2020. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03023485>.
- [8] Christine CHEVRIER, Gilles HALIN et Kévin JACQUOT : Numérisation et valorisation de maquettes anciennes de villes. Synthèse des projets. *In Situ. Revue des patrimoines*, juin 2020. URL <http://journals.openedition.org/insitu/27738>.
- [9] Anthony COCCIOLO : Digitally Archiving Architectural Models and Exhibition Designs : The Case of an Art Museum. *Practical Technology for Archives*, mai 2015. URL <https://practicaltechnologyforarchives.org/issue4/>.
- [10] Évelyne COHEN et Pascale GOETSCHER : Les chantiers du numérique à la BnF (1990-2018). *Sociétés & Représentations*, 2(46):191–200, février 2018.
- [11] Émilien CRISTIA, François GUÉNA et Pierre-Paul ZALIO : Quand le BIM met la maquette à l'épreuve du numérique. *SHS Web of Conferences*, octobre 2018. URL <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701007>.
- [12] Ordre des ARCHITECTES : La responsabilité décennale. *Ordre des architectes*, 2006. URL <https://www.architectes.org/la-responsabilite-decennale>.
- [13] Bernadette DEVILAT : Recording of Heritage Buildings : From Measured Drawing to 3D Laser Scanning. *Protocols*, pages 236–240, 2016.

- 
- [14] Boris DINTRANS : Le concept d'archivage numérique pérenne. *CINES*, janvier 2016. URL <https://www.cines.fr/archivage/un-concept-des-problematiques/>.
- [15] Bruno DUTAILLY, Sylvie EUSÈBE et Valentin GRIMAUD : L'archivage pérenne des modèles numériques 3D pour les SHS. *Consortium 3D SHS*, juillet 2019. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02195914/document>.
- [16] Kristine K. FALLON : *Collecting, Archiving and Exhibiting Digital Design Data*. Art Institute of Chicago, Department of Architecture, Chicago, 2004.
- [17] Clotilde de GASTINES : Modélisation - Le BIM prend le virage de la rénovation. *Le Moniteur*, octobre 2020. URL <https://www.lemoniteur.fr/article/>.
- [18] Kévin JACQUOT : *Numérisation et restitution virtuelle des maquettes de la collection de Louis XIV*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, février 2014. URL <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750670/document>.
- [19] Richard KLEIN, Sylvie LE CLECH et David PEYCERÉ : À quoi servent les archives d'architectes ? *Colonnes*, 6(35):80, juin 2019.
- [20] Carole KOCH, David PEYCERÉ et Florence WIERRE : *Architecture et archives numériques. L'architecture à l'ère numérique : un enjeu de mémoire / Architecture and Digital Archives. Architecture in the Digital Age : a Question of Memory*. Infolio, Gollion, 2008.
- [21] Sylvie LE CLECH : *Mission d'étude sur les archives d'architectes*. Ministère de la Culture, Direction générale et Inspection des patrimoines, Paris, 2018.
- [22] Bruce LINDSEY : *Digital Gehry. Material Resistance / Digital Construction*. Birkhäuser, Bâle, 2001.
- [23] Greg LYNN : *Archéologie du numérique. Peter Eisenman. Frank Gehry. Chuck Hoberman. Shoji Yoh*. Centre Canadien d'Architecture / Sternberg, Montréal / Berlin, 2013.
- [24] Greg LYNN : *Lewis Residence*. Centre Canadien d'Architecture, Montréal, 2014.
- [25] Caroline MANIAQUE, Éléonore MARANTZ et Jean-Louis VIOLEAU : Archiver l'enseignement de l'architecture. *Colonnes*, 5(34), mai 2018.
- [26] Michel MAUMONT : L'espace 3D : de la photogrammétrie à la lasergrammétrie. *In Situ. Revue des patrimoines*, avril 2012. URL <http://journals.openedition.org/insitu/6413>.
- [27] Julie NICOLAS : Building Smart France poursuit activement la promotion du travail en open BIM. *Le Moniteur*, janvier 2021. URL <https://www.lemoniteur.fr/article/>.
- [28] Leticia OTERO : Jorge Luis Borges et Paul Valéry : Ireneo Funes et Edmond Teste ou deux visions monstrueuses de l'idéal. *Revue de littérature comparée*, 4(320):475–490, avril 2006. URL <https://www.cairn.info/revue-de-litterature-comparee-2006>.
- [29] Sydney POLLACK : *Sketches of Frank Gehry*, 2006.
- [30] Charles REAGAN : Réflexions sur l'ouvrage de Paul Ricoeur : La mémoire, l'histoire, l'oubli. *Transversalités*, 2(106):165–176, février 2008. URL <https://www.cairn.info/revue-transversalites-2008-2-page-165>.

- 
- [31] Maxime Roumain de la TOUCHE : *L'intégration du scanner 3D dans le processus BIM (Réhabilitation)*. Mémoire en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur, Conservatoire national des arts et métiers, juillet 2014. URL <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01179621/document>.
- [32] Dennis SHELDEN : *Digital Surface Representation and the Constructability of Gehry, Åds Architecture*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, septembre 2002. URL <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/16899>.
- [33] SIAF, Cité de l'architecture et du PATRIMOINE et PASS TECHNOLOGIE, éditeurs. *Le traitement des archives numériques d'architectes, le Fonds de l'architecte Adrien Fainsilber. Rapport final*. Cité de l'architecture et du patrimoine, Paris, 2014.
- [34] Martijn STELLINGWERFF : *Models in Architecture. Design through Physical & Digital Models*. TUDelft, 2017. URL <https://ocw.tudelft.nl/courses/>.
- [35] Etienne TELLIER : *Download our Free 3D Model Kit of a Statue from Palmyra's Museum*. *Syrian Heritage Revival*, octobre 2016. URL <http://syrianheritagerevival.org/modele-3d-portrait-palmyre/>.
- [36] Etienne TELLIER : *Numériser la maquette du Krak des Chevaliers de la Cité de l'architecture*. *Syrian Heritage Revival*, septembre 2016. URL <http://syrianheritagerevival.org/fr/numerisermaquette/>.
- [37] Bojan TEPAVCEVIC, Predrag SIDANIN et Milena STAVRIC : *Architectural Scale Models in the Digital Age. Design, Representation and Manufacturing*. Springer, Vienne, 2013.
- [38] Tony TUNG : *Indexation 3D de bases de données d'objets par graphes de Reeb améliorés*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Télécommunications, juillet 2005.
- [39] Max VON ÜBEL : *2021 Best Photogrammetry Software*. *ALL3DP*, février 2021. URL <https://all3dp.com/1/best-photogrammetry-software/>.
- [40] Florence WIERRE : *Les archives comme outils de représentation de l'oeuvre*. *Sociétés & Représentations*, 2(30):173–180, février 2010.
- [41] Wumengjian ZHU : *Make Models Great Again. Interactively generating simplified editable models from 3D-scanned dense meshes*. Mémoire de Master, Carnegie Mellon University, mai 2018. URL [https://kilthub.cmu.edu/articles/Make\\_Models\\_Great\\_Again\\_Interactively\\_generating\\_simplified\\_editable\\_models\\_from\\_3D-scanned\\_dense\\_messhes/7182911/files/13729121.pdf](https://kilthub.cmu.edu/articles/Make_Models_Great_Again_Interactively_generating_simplified_editable_models_from_3D-scanned_dense_messhes/7182911/files/13729121.pdf).



# De la possession à l'usage : allonger la durée de vie des produits de la construction

Par Myriem Rhmari Tlemçani<sup>1</sup>

*En Europe, un grand nombre de bâtiments construits pendant le boom d'après-guerre (1950 à 1970) atteignent la fin de leur durée de vie initiale. Leurs façades aujourd'hui détériorées et obsolètes représentent un gisement de matière conséquent dont il faut penser les possibilités de réemploi. Or, l'application de modèles économiques circulaires est une des conditions pour favoriser ce réemploi. Parmi ces modèles, le leasing est un système incitant au réemploi en déplaçant le schéma commercial basé sur la vente de produits à un système basé sur la prestation de services pour les biens immobiliers. En vue de l'optimisation et de la globalisation des pratiques de réemploi, l'objectif de ce travail est d'étendre le processus de ce concept à un champs maximal du parc immobilier. La méthode consiste à évaluer le potentiel de ce processus à être appliqué également à plusieurs matériaux de la construction. Pour la suivante recherche, la façade en bois constituera notre cas d'étude. Une revue de la littérature nous a permis de définir les conditions nécessaires au matériau pour intégrer un système leasing : pour que la mise en location des pièces puisse profiter au fournisseur, les produits doivent avoir une durée de vie en service relativement longue ou fournir un service au delà de leur matière propre via des systèmes intégrés. Sinon les pièces doivent présenter un fort potentiel de réemploi passant par une capacité à être démontées facilement. Un protocole d'évaluation du degré de démontabilité des produits de la façade bois entre eux selon leur typologie de connexion respective nous permet de constater que ceux-ci répondent à la deuxième condition uniquement. Si les avantages de la façades bois au sein d'une filière leasing semblent a priori limités au vu de son horloge naturelle, nous verrons que les technologies de transmission de l'information ont un rôle à jouer dans l'allongement de cette durée de vie. Par dessus ces conditions opératoires permettant de définir si une façade en bois dans son état technologique actuel est capable d'intégrer une filière leasing, il reste à comprendre les enjeux liés au droit de la propriété derrière la contractualisation du bail de la façade.*

*Mots-clés : réemploi ; leasing ; façade ; bois ; RFID*

---

1. Myriem Rhmari Tlemçani, née à Fès le 11 janvier 1999. Elle a complété ses deux cycles d'études : de Licence et Master à l'ENSA Paris Malaquais de 2017 à 2022.

---

## 2.1 Introduction

Le réemploi en construction est un sujet de recherche qui n'est pas récent. Des techniques pour sa mise en œuvre dans le secteur de la construction sont développées et établies. Des projets manifestes du concept sont réalisés. Pourtant nous n'observons toujours pas de mise en œuvre à l'échelle globale. Toutefois, ce serait la première étape vers la démocratisation de cette pratique et vers le développement de ses applications dans l'industrie de la construction. Le réemploi ré-interroge la logique de production d'architecture et celle de la chaîne de construction.

Aujourd'hui, cette chaîne se base sur la consommation de matériaux non renouvelables aboutissant alors à un schéma économique linéaire qui pose une problématique environnementale. Par inversion de la chaîne de production en construction, le réemploi rentre dans une logique économique circulaire. Ce deuxième modèle dissocie croissance économique et épuisement des ressources en minimisant les déchets et en augmentant la période d'utilisation des produits [15]. L'activité du réemploi opère alors un changement de point de vue sur ce que l'on considère à priori comme déchet pour l'envisager en tant que produit. C'est-à-dire que le déchet perd son statut pour acquérir celui de ressource. En France, les activités de construction, de réhabilitation et de démolition produisent 70% des déchets, soit 228 millions de tonnes par an [21]. La directive cadre européenne 2008/98/CE demande à horizon 2020 la valorisation de 70% des déchets de chantier, avec en priorité la prévention à la création de déchets [29]. L'objectif est donc de transformer ces composants d'ouvrages, communément destinés à la filière déchet, en une ressource pour construire, en les mettant à disposition des acteurs de la construction.

Dans cette perspective, le projet de loi relatif à la lutte contre le gaspillage et l'économie circulaire présenté le 10 juillet 2019 par le ministère de la transition écologique et solidaire fait évoluer le diagnostic déchets en incluant dans son champ le diagnostic ressources [31]. Le diagnostic déchets vise à déterminer la nature, la quantité et la localisation des matériaux et produits de construction qui donneront lieu à des déchets à évacuer et éventuellement à recycler. À celle-ci s'ajoute le diagnostic ressource qui lui est une phase de « démontage sélectif » avant démolition, au cours de laquelle les matériaux et éléments de construction désignés pour leur potentiel de réemploi (et qui échapperont donc à la filière déchet) sont démontés soigneusement puis préparés en vue d'une remise en œuvre. « Les déchets de la construction deviennent [ainsi] des ressources et la ville une mine urbaine à exploiter pour permettre son propre renouvellement » [7]. Différentes approches existent afin de palier ce bilan. En effet, trois méthodes de revalorisation d'un produit en fin de vie sont à distinguer : Le recyclage<sup>2</sup>, la réutilisation<sup>3</sup> et le réemploi<sup>4</sup>.

Toutes permettent de réduire la consommation de ressources naturelles et de matières premières, mais à mesures différentes. Dans le cadre de la protection de l'environnement, la directive 2008/98/CE, émise par le Parlement et le Conseil Européen le 19 novembre 2008, met en place une hiérarchie de traitement des déchets : prévention, réemploi, valorisation matérielle et recyclage, valorisation énergétique, élimination et enfouissement [29].

Cette hiérarchisation met en avant le premier objectif qui est de maintenir les produits au maximum dans leur état afin de diminuer leur énergie grise. Nous nous intéresserons au réemploi des composants individuels<sup>5</sup> issus de chantiers de déconstruction. Ceux-ci

---

2. Recyclage : "toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins." [31]

3. Réutilisation : "toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau." [31]

4. Réemploi : "toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été connus" [31]

5. Il existe quatre catégories de réemploi : adaptatif, la relocalisation, d'éléments non destinés au secteur de

---

peuvent être structurels (fondations, poteaux, poutres) ou non structurels (bardages, escaliers, briques) [24].

S'attarder sur ce type de réemploi est d'autant plus pertinent en ce qu'il concerne la plupart des bâtiments et est en ce sens le plus urgent à étudier dans le but d'une massification du réemploi de produits de la construction dont l'objectif est de rendre compétitifs les produits issus du réemploi aux produits neufs sur le marché. Pour se faire il s'agit de s'assurer que les produits conservent leur valeur une fois arrivés en fin de vie du bâtiment en conservant leur intelligence intrinsèque afin qu'ils soient exploités de manière cohérente avec leur conception, c'est-à-dire en gardant leurs fonctions d'origine [32].

En Europe, un grand nombre de bâtiments construits pendant le boom d'après-guerre des années 1950 à 1970 atteignent la fin de leur durée de vie initiale [2]. Leurs façades aujourd'hui détériorées et obsolètes représentent un gisement de matière conséquent dont il faut penser les possibilités de réemploi. La façade nécessite effectivement une attention particulière car davantage de services y sont intégrés, ce qui signifie que plus de matériaux, de ressources et de main-d'oeuvre sont investis dans ce produit. Notons que le service qu'offre un système de façade est ce qui fournit les valeurs pour les propriétaires et les utilisateurs. Lorsque les valeurs de service d'une façade ou de ses composants diminuent avec le temps, c'est la fin de leur durée de vie et ils deviennent alors des déchets. La durée de vie en service d'un système de façade est la durée pendant laquelle le système et ses composants sont en état de fonctionnement pour les performances et fonctionnalités requises et prévues. En raison de deux processus distincts : la détérioration et l'obsolescence, la valeur de service d'un système de façade diminue après la construction et pendant l'utilisation.

D'une part, la détérioration est causée par la diminution des performances physiques du système et de ses composants. En effet, le mur extérieur étant le plus exposé aux intempéries, c'est l'élément qui se détériore le plus rapidement dans un bâtiment. D'autre part, l'obsolescence est due aux changements de technologies et aux conditions esthétiques [16]. Des interventions spécifiques de maintenance et de remise à neuf sont nécessaires pour pallier la détérioration physique des systèmes de façade afin de conserver leurs performances attendues. En ce sens, la construction et la rénovation de l'enveloppe d'un bâtiment représente une partie significative du coût du cycle de vie de ce dernier [16]. De ce fait la façade devrait pouvoir suivre les transformations successives d'un bâtiment sans créer de déchets et sans causer d'impact environnemental. La durabilité esthétique et technique d'un système de façade exige donc qu'il soit conçu pour faciliter la reconfiguration et la restructuration en fonction des demandes changeantes au cours du cycle de vie.

Par ailleurs, à cause de la haute fréquence de ces reconfigurations, (sur une durée de vie de 50 ans d'un bâtiment, la façade subit des transformations tous les 10 ans [3]) il faut augmenter le potentiel de réemploi de ces éléments en pensant des modèles opératoires et économiques adaptés. En effet, l'application de modèles économiques circulaires est une des conditions pour favoriser ce réemploi.

Parmi ces modèles, le leasing<sup>6</sup> est un système incitant au réemploi en déplaçant le schéma commercial basé sur la vente de produits à un système basé sur la prestation de services pour les biens immobiliers. Actuellement, un modèle qui se base sur des coûts d'investissements initiaux plus faibles domine encore largement le secteur et définit la plupart des processus d'approvisionnement. Un tel système favorise la mise sur le marché de produits plus simples, moins performants ou qui nécessitent un effort de maintenance plus

---

la construction, de composants individuels [22]

6. Leasing : équivalent anglais de « location » et terme général définissant la pratique qui déplace le modèle commercial basé sur la vente de produits à un système basé sur la prestation de services, dans lequel la matière peut être récupérée et réemployée puisque ses fabricants qui en demeurent propriétaires gagnent à lui donner une seconde vie.

---

élevé. Ce système demande par ailleurs un investissement initial plus élevé et aboutit finalement à un TCO<sup>7</sup> important.

Par opposition, dans le cadre d'un modèle de type leasing, le client n'est plus propriétaire de l'enveloppe du bâtiment et de ses services intégrés, mais les loue à un prestataire de services dans le cadre d'un contrat de performance à long terme. Plutôt que d'acheter les panneaux de façade en tant que produit, le client loue les services de performance énergétique et de confort d'utilisation fournis à son bâtiment par ce nouveau système de façade. Cette stratégie veut diminuer l'investissement initial requis pour la rénovation et la construction d'enveloppes de bâtiments. Par ailleurs, la location de façades pourrait, entre-temps, accélérer l'adoption par le marché des nouvelles technologies du bâtiment et optimiser le réemploi et le recyclage des composants et des matériaux dans l'industrie de la construction, en gardant ces technologies entre les mains de leurs fabricants.

Les modalités de ce nouveau concept sont en cours de développement pour les façades en aluminium par les chercheurs de l'université de Delft (TUD) aux Pays-Bas dans le cadre d'un projet pilote qui porte le nom de « Façade Leasing » ou « Façade-as-a-Service ». Celui-ci qui vise à explorer comment les multiples parties prenantes dans l'industrie de la construction situées à différents niveaux de la chaîne de valeur peuvent travailler ensemble pour louer des façades grâce à l'utilisation de contrats de service à long terme. En septembre 2016, un consortium d'entreprises, allant des fournisseurs de composants aux fabricants de façades, a installé un projet pilote de remplacement temporaire d'une partie de la façade du bâtiment EWI de l'Université.

L'équipe de recherche de la TU Delft est donc notamment préoccupée par deux objectifs distincts. Premièrement, un tel projet est motivé par des objectifs environnementaux et de durabilité. En effet, par la dématérialisation de cette partie de l'industrie de la construction en déplaçant le modèle commercial actuel vers des systèmes de produits-services, les produits de construction peuvent être récupérés et réemployés, réduisant ainsi l'impact environnemental. Deuxièmement, cette recherche vise à améliorer les performances énergétiques de la façade par l'intégration de technologies. En regard aux visées de notre recherche, nous considérerons ce précédent du point de vue de son premier objectif.

En vue de l'optimisation et de la globalisation des pratiques de réemploi, l'objectif serait d'étendre le processus de ce concept à un champs maximal du parc immobilier en vérifiant le potentiel de ce processus à être appliqué également à d'autres matériaux de la façade. Pour la suivante recherche, la façade en bois constituera notre cas d'étude. Nous cherchons alors à répondre à la question suivante : comment augmenter le potentiel d'une filière leasing en faveur du réemploi pour les façades en bois ?

Pour se faire, nous approcherons d'abord la question du côté juridico-économique pour comprendre les enjeux liés à la contractualisation d'un bail de façade. Puis nous procéderons à l'estimation du potentiel d'intégration des éléments de la façade à un système de prestation de service par l'identification des produits qui la composent et les manières avec lesquelles ils sont assemblés entre eux afin d'évaluer leur capacité à être démontés sans porter atteinte à leur qualité pour définir leur réemployabilité. Une revue de la littérature démontre les conditions nécessaires au matériau pour intégrer un système leasing : pour que la mise en location des pièces puisse profiter au fournisseur, les produits doivent avoir une durée de vie en service relativement longue ou fournir un service au delà de leur matière propre via des systèmes intégrés. Sinon les pièces doivent présenter un fort potentiel de

---

7. Total Cost of Ownership (TCO) : équivalent anglais de "coût total de possession. C'est une estimation des dépenses associées à l'achat, au déploiement, à l'utilisation et au retrait d'un produit ou d'un équipement. Le TCO peut être calculé comme la somme entre prix d'achat initial et les coûts d'exploitation sur toute la durée de vie de l'actif.

---

réemploi passant par une capacité à être démontées facilement. Un protocole d'évaluation du degré de démontabilité des produits de la façade bois entre eux selon leur typologie de connexion respective nous permet de constater que ceux-ci répondent à la deuxième condition uniquement. Si les avantages de la façades bois au sein d'une filière leasing semblent à priori limités au vu de son horloge naturelle, nous verrons que le numérique a un rôle à jouer dans l'augmentation de cette durée de vie. Par dessus ces conditions opératoires permettant de définir si une façade en bois dans son état technologique actuel est capable d'intégrer une filière leasing, il reste à comprendre les enjeux liés au droit de la propriété derrière la contractualisation du bail de la façade. Nous verrons que la possibilité de mise en place d'un système qui engage un tel changement de paradigme dans le secteur de l'immobilier et dans le système juridique actuel paraît jusque là peu probable.

## 2.2 Méthodologie

Au vu des deux champs de discipline que touche la problématique de cette recherche, les méthodes de recherche sont diverses. D'abord, l'analyse du modèle économique circulaire dans lequel s'insère la filière leasing et la mesure de son éventuelle mise en oeuvre dans le système juridique actuel se fait à travers une revue de la littérature. Quant à l'aspect opératoire de l'étude et dans le but d'évaluer la possibilité d'application de ce nouveau modèle économique à un champ étendu de la construction, nous l'analysons du point de vue d'un autre matériau que l'aluminium étudié aujourd'hui. Nous procéderons donc à l'étude d'un cas, en l'occurrence, la façade bois. Le potentiel d'intégration d'un matériau à une filière leasing passant par ses possibilités de réemploi, la méthode consiste donc à appliquer au cas d'étude des critères d'évaluation du degré de démontabilité des composants de la façade, déjà établis par la littérature en prenant toujours comme modèle de référence pour la comparaison la façade en aluminium au coeur de la recherche de la TUD.

Par définition, le leasing est un modèle qui privilégie l'usage à la possession. Il trouve ses fondements dans les principes de l'économie circulaire (EC) qui émerge en réponse au défi de ressources matérielles posé par la demande croissante en volume et en innovation technologique. Cette sous-discipline de l'économie combine les sujets économiques conventionnels et la théorie de la croissance économique avec la philosophie du développement durable[33]. La logique économique derrière la pensée de l'EC : l'augmentation des prix des matières premières, combinée au concept de fourniture de services de Stahel (1982, 2006), sont supposés ensemble garantir le comportement multi-cyclique de la matière [35].

Plus spécifiquement, ce concept s'applique à l'industrie de la construction notamment sous son quatrième pilier<sup>8</sup>[1] : celui de l'économie de la fonctionnalité. L'un des premiers rapports sur cette thématique a été commandité par le Club de Rome.

Le rapport rendu à cette occasion par Orio Giarini et Walter Stahel, intitulé *The limits to Certainty : Facing Risks in the New Service Economy* [23] suggère de déplacer les espaces de plus value économique. Le modèle proposé par Stahel et Giarini opère d'un tournant qui favorise des activités économiques productrices de plus-value qui ne nécessitent pas la consommation de matière. À ce propos Stahel explique : « l'économie de la fonctionnalité [...] vise à optimiser l'utilisation (ou la fonction) des biens et services, se concentre sur la gestion des richesses existantes, sous la forme de produits, de connaissances ou encore de capital naturel. L'objectif économique en est de créer une valeur d'usage la plus élevée possible pendant le plus longtemps possible, tout en consommant le moins de ressources

---

8. L'économie circulaire possède sept domaines d'action : l'approvisionnement durable, l'éco-conception, l'écologie industrielle et territoriale, l'économie de la fonctionnalité, la consommation responsable, l'allongement de la durée d'usage et le recyclage

---

matérielles et d'énergie possible. Le but est d'atteindre ainsi une meilleure compétitivité et une augmentation des revenus des entreprises [...] » [39].

En effet, la perspective économique de l'EC est principalement contenue dans le concept de « prestation de services » [20]. Cela signifie que les producteurs (ou les fournisseurs) conservent les droits de propriété des produits de construction et des matériaux encapsulés dans ces produits tandis que leur chiffre d'affaires est lié à l'usage de ces biens par les clients qui ne paient « que » pour les services que ces produits fournissent y compris le contrôle et la maintenance. Ceci est censé profiter à toutes les parties concernées et même à l'économie dans son ensemble [20]. Le paiement à l'utilisation (per-per-use<sup>9</sup>) et le crédit-bail opérationnel (operational lease<sup>10</sup>) sont les exemples les plus utilisés dans un système de prestation de services (Product-Service-System / PSS) [35].

« Un PSS est constitué de produits tangibles et de services intangibles conçus et combinés de façon à être capables de satisfaire conjointement les besoins spécifiques des PSS et consiste à faire passer la cible de l'innovation d'une conception orientée uniquement produit ou service à une stratégie de conception d'un ensemble intégré de produits et de service » [42]. Un PSS définit de nouvelles formes contractuelles, combinant la vente d'un produit manufacturé et la prestation d'un service continu qui visent à satisfaire les requêtes du client par la vente d'une formule sur mesure [22]. Remarquons que les PSS se pratiquent de différentes façons.

Une première classification a été explorée par Tukker en 2004 : Soit, en s'orientant explicitement vers les services en annexant au produit une série de facilités supplémentaires (contrats de maintenance, formules de financement, systèmes de conseils...). Soit en s'orientant sur l'usage ; c'est-à-dire en passant par des logiques alternatives de propriété et d'accès aux produits (leasing, locations, objets partagés...) où l'utilisateur ne dispose pas d'un accès illimité et individuel. Ou encore, en s'orientant sur l'atteinte de résultats précis via la sous-traitance, le paiement à l'usage et les résultats fonctionnels (le consommateur spécifie son objectif et le prestataire de services est libre de proposer la formule qu'il juge la plus adéquate pour répondre à ce besoin) [22]. La dépendance vis-à-vis du produit diminue d'un modèle à l'autre, par ordre respectif, ainsi que la liberté du fournisseur de répondre aux besoins du client. Dans le cas du réemploi des composants de la façade c'est le deuxième qui nous intéresse.

À ce sujet, l'application des logiques PSS au secteur du bâtiment peut se faire selon deux approches distinctes. La première est une démarche fragmentée. Celle-ci continue à impliquer la grande diversité d'acteurs propres au secteur de la construction qui indépendamment proposent des formes de PSS différentes. La deuxième est une approche centralisée où l'ensemble du processus de construction est géré par un nombre réduit d'acteurs.

Dans ce dernier cas les bâtiments sont assimilés à une forme de service « total », dont une entreprise unique est responsable in extenso. Dans ce schéma, toutes les parties prenantes au sein de la chaîne de valeur travaillent en collaboration pour assurer ensemble toutes les étapes du processus. Par exemple, puisque les activités de re-fabrication sont dépendantes d'un flux continu de produits usagés, les commerciaux chargés des opérations de leasing sont chargés d'informer les équipes de re-fabrication des prévisions sur les quantités d'équipements qui seront retournés en fin de contrat [44, p.11].

Les modalités du PSS sont étudiées par la TUD pour le cas de la façade aluminium

---

9. Pay-per-use : terme anglais signifiant « paiement à l'utilisation ». C'est un modèle économique où l'utilisation d'un produit ou d'un service est mesurée et les clients sont facturés à chaque fois qu'ils utilisent le service

10. Operational lease : terme anglais signifiant « crédit-bail opérationnel ». C'est un contrat qui permet l'utilisation d'un actif mais ne confère pas de droits de propriété sur ce dernier.

laquelle constitue notre base de référence pour l'évaluation de l'étude de cas. Il s'agit là donc de se pencher sur son protocole de dé-construction au sein d'un modèle leasing afin de pouvoir estimer celui de la façade bois par analogie. Le projet pilote de la TU Delft travaille sur les modalités d'implantation d'une filière leasing pour un système de façade intégré. En ce sens, leur prototype propose plusieurs typologies de panneaux auxquels sont intégrés de plus en plus d'appareils performant des services différents (Add-ons) comme des brises soleil, des éléments de climatisation, des produits de médiation de l'information...etc. (Cf. Figure 2.1)

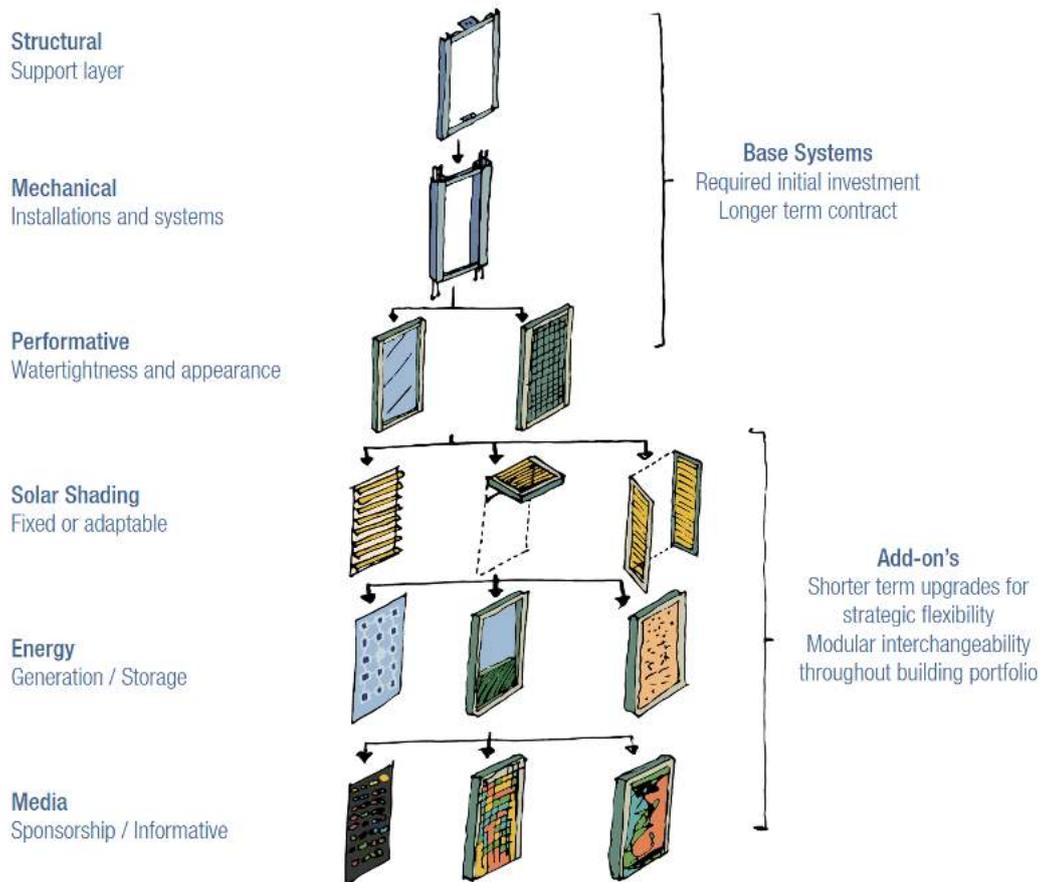


FIGURE 2.1 – "Add-ons" des différents panneaux de la façade aluminium PSS [4]

Parmi cette palette, le panneau de base est celui qui correspond à la structure aluminium uniquement. C'est celui auquel nous nous intéresserons pour la suite de la recherche en prévision de l'étude comparative avec la façade bois qui ne présente pas de système intégré. Il sera effectivement celui dont les termes du contrat sont de plus longue durée puisque son obsolescence technologique est inférieure à celle des appareils. Même si elle fait partie d'un bâtiment entier, la production d'une façade est un processus complexe en soi [27].

Différents acteurs doivent se mettre en place pour enfin installer la façade, demandant tout un processus de fabrication et d'assemblage. Les architectes et ingénieurs sont en contact permanent avec le client pour développer le projet, à la différence du fournisseur de façade qui n'est pas lié aux étapes initiales. Il est cependant impliqué dans des relations à long terme avec les clients et les consultants pour la location des produits et leur assemblage sur site. Si dans un système conventionnel une société de dé-construction est engagée par l'investisseur de façade pour récupérer la façade, dans un modèle de leasing le fournis-

seur est déjà responsable de son démontage. Dans ce cas, ce dernier est déjà en possession de toutes les informations nécessaires à la collecte de produits et identifie directement les éléments à démonter sans avoir besoin de passer par une étape de tri conventionnelle pour définir la prochaine destination d'un produit. Il est lui même cette destination. Une fois le produit récupéré, celui-ci est reconditionné pour bénéficier d'une deuxième utilisation (dans ce cas, un client a déjà loué la façade pour un projet spécifique) sinon il est stocké par le fournisseur.

Ce processus peut se diviser selon les étapes suivantes : la dé-construction qui consiste en un démontage correct de la façade qui est la clé pour le reste du processus. Au vu de la modularité de la façade aluminium, celle-ci présente une première facilité pour son désassemblage. Le processus commence par l'extraction du brise-soleil extérieur, vissé à l'interface en bois. Le panneau est ensuite démonté de l'interface en bois y étant connecté par des vis. Un tel cadre sert d'intermédiaire entre le panneau du mur rideau et la structure principale. Une fois le panneau retiré, les couvercles en aluminium qui enveloppent l'interface en bois et les colonnes structurelles sont arrachés de façon destructive puisque cloués. Viennent ensuite les couches fonctionnelles qui apportent protection thermique et étanchéité à l'ensemble du système : la membrane EPDM, l'interface bois en dessous, l'isolant rigide et les joints en silicone. Ils sont tous mis au rebut et mis en décharge. Le dernier élément est la colonne d'acier supplémentaire ajoutée pour l'installation du panneau, qui est reliée par un support à la dalle de béton [33]. (Cf. Figure 2.2)

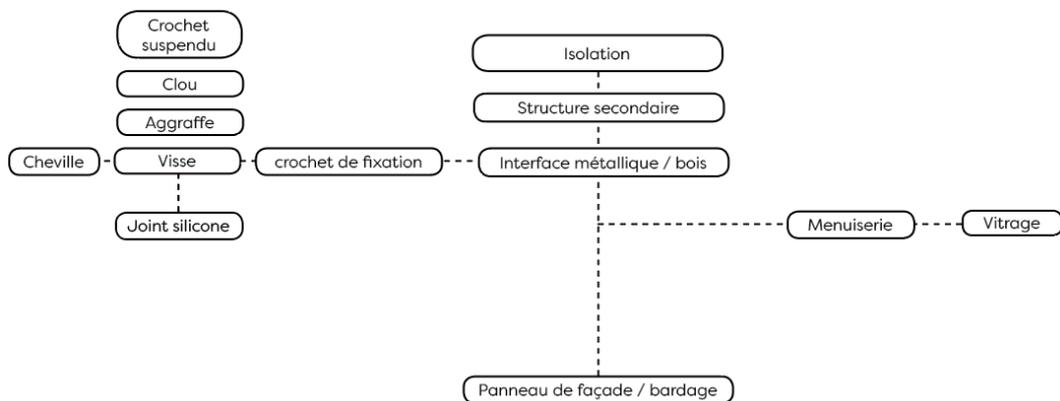


FIGURE 2.2 – Diagramme des relations entre les éléments de la façade bois

La deuxième étape est celle de la collecte. Celle-ci comprend le transport du panneau de son point de démontage à son point de collecte. Celui-ci peut impacter l'état du panneau et donc son indice de réversibilité. Compte tenu de ses dimensions, le panneau serait laborieux à déplacer à travers le système d'échafaudage et les ascenseurs [33].

Enfin, la remise sur le marché est la dernière étape du processus et elle concerne le reconditionnement du panneau. D'abord il s'agit de démonter le produit et ses pièces pour un traitement approprié. Dans ce cas, les vitrages sont d'abord démontés du cadre principal. Ensuite la remise à neuf des composants séparés est effectuée. Le produit est enfin remonté et expédié à son prochain emplacement. Dans ce cas, un nouveau client loue la façade, propriété du fournisseur qui est aussi l'investisseur de la façade [33]

Notons que la qualité représentative du bâtiment EWI qui a servi à l'étude, en tant qu'architecture moderniste est celle qui en a fait une cible adéquate à la recherche à la TUD. En effet, ce type de bâtiment ayant une structure en aluminium atteint rapidement l'obsolescence technique. De plus il affiche un degré de standardisation et de modularité qui en fait la cible idéale pour une action de rénovation, et donc pour la mise en oeuvre

d'un nouveau modèle économique tel que celui proposé par ce dernier projet. Toutefois, étant donné la problématique de systématisation et de globalisation posée par les pratiques du réemploi, il nous semble nécessaire de nous demander à présent si l'application d'un tel processus de rénovation peut se transposer à d'autres typologies de façades dans le but d'étendre ce modèle (ou du moins de tendre vers son extension) à l'ensemble du parc bâti en limitant le champs de recherche aux composants de la façade bois.

D'abord, par définition la façade est la couche qui est immédiatement en contact avec l'extérieur (bardage monté sur une structure secondaire et menuiseries). En ce sens elle se différencie de l'enveloppe (mur extérieur, isolant, structure primaire) dont la façade est un composant parmi d'autres. Ensuite, pour continuer le parallèle avec la façade aluminium notre définition de la façade bois s'arrête au bardage monté sur une structure aluminium et aux menuiseries. Nous évaluerons ainsi leur possibilité de réemploi en considérant les manières avec lesquelles ils sont assemblés entre eux uniquement sans s'étendre au domaine de l'isolation et de la structure primaire qui représentent une deuxième couche d'éléments liés entre eux.

Suivant un inventaire d'exemples parcouru [25], la façade plane ventilée recouvre la situation la plus courante du bardage, celle où ce dernier ne connaît ni changement de limite, ni changement de direction et ni de discontinuité [9]. La façade ventilée consiste à construire, devant le mur de façade principale, une structure en acier ou en bois sur laquelle est posé un revêtement. Par ailleurs, les typologies d'assemblage varient selon le type de structure secondaire : en bois ou en aluminium.

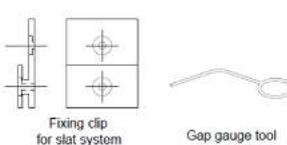
Components	Screws	
	Metal substructure	Wood substructure
 <p>Fixing clip for slat system</p> <p>Gap gauge tool</p>	 <p>metal screw for fixing clip DIN 7504 M3.5 - L:19mm</p> <p>SX3 screw for the top of the façade</p>	 <p>wood screw for fixing clip DIN 7505B M3.5 - L:25mm</p> <p>TWD-S-D12 screw for the top of the façade</p> <p>L20 W Adapter (for TWD-S-D12)</p> <p>Fixing nail for wood Ø2 - L=20mm</p>

FIGURE 2.3 – Types de joints selon le type d'ossature de la façade bois

L'objectif de cette recherche n'étant pas d'atteindre un certain degré d'exhaustivité, nous prenons comme cas d'étude un bardage monté sur une structure en aluminium.

La possibilité de transformation de la façade est d'autant plus nécessaire, lorsque les éléments et composants du système de façade deviennent des objets de location et ont la possibilité d'augmenter leur valeur au cours de leur vie [3]. En ce sens, l'estimation du potentiel d'une façade bois à intégrer une filière leasing passe entre-autres par celle de son degré de démontabilité ou de réemployabilité. En effet si le degré de séparabilité des éléments sans porter atteintes aux produits environnants est élevé alors cela augmente leur valeur en fin de vie et pourront ainsi potentiellement intéresser les fournisseurs par une propriété à long terme. Nous ne nous positionnons pas dans le cas de figure où l'on prévient la création de déchets bien que cette posture reste l'option privilégiée par rapport au réemploi et d'autres types de valorisation qui constituent une deuxième option selon l'EC.

En effet, la première position consisterait en une recherche dans le sens de la conception des pièces pour la construction de bâtiments futurs réversibles. Au contraire, nous nous plaçons dans une temporalité présente et réfléchissons à la réemployabilité du parc bâti actuel qui représente déjà une ressource. La méthode consiste ainsi à regarder avec moins d'attention l'évolution technologique de la façade afin qu'elle soit mieux réutilisable et de porter plus d'attention à la manière avec laquelle la façade dans son état actuel technologique peut

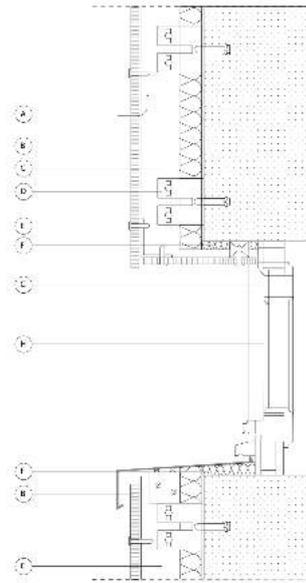
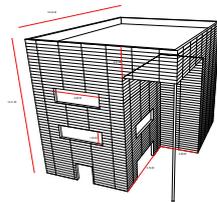
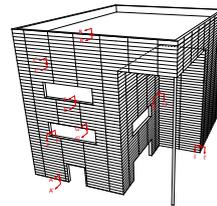


FIGURE 2.4 – Coupe démonstrative des composants de la façade bois telle que définie pour cette recherche

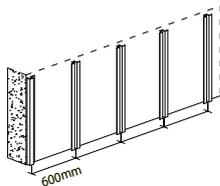
A. Cavité de ventilation B. Bardage C. Profilé métallique D. Crochet de fixation E. Vis F. Isolation G. Menuiserie H. Fenêtre vitrée (les éléments grisés sont ceux qui ne font pas partie de la définition faite)



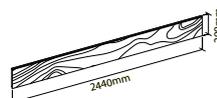
(a) Dimensions de la façade



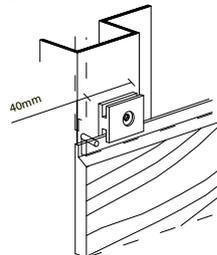
(b) Traits de coupes relatifs aux figures x à y



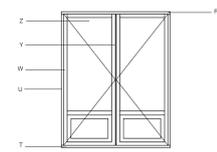
(c) Type d'ossature : aluminium



(d) Type de bardage : planche au profilé frisette



(e) Type de connexion : à vis et clips métalliques



(f) Menuiserie à deux vantaux

FIGURE 2.5 – Cas d'étude employé pour l'évaluation quantitative du degré de réemployabilité de la façade bois

être incorporée dans une méthode de réemploi systématique.

---

Afin de procéder à cette évaluation nous considérons les spécificités des produits bois de la façade en les mettant en parallèle avec le protocole de démontage de la façade aluminium pour en dégager les contraintes potentielles qui peuvent être rencontrées lors du démontage de celle-ci. Cette première évaluation concerne donc le processus de démontage en soi et les activités auxiliaires qu'il implique.

Selon la définition donnée de la façade bois nous pouvons établir un parallèle entre les panneaux de bardage et les menuiseries de la façade bois avec les panneaux du mur rideau en aluminium du projet pilote identifié. En ce sens, le protocole de démontage identifié pour la façade aluminium pourrait être calqué sur les produits bois à quelques exceptions près que nous discutons dans le prochain paragraphe.

Dans un deuxième temps, nous procédons à l'évaluation du degré de démontabilité des pièces d'une façade bois courante. Pour ce faire, nous nous appuyons sur des méthodes déjà établies dans la littérature. En effet, des méthodes théoriques ont été largement établies et vérifiées dans le domaine du réemploi et sont devenues des références de base pour faire l'évaluation de la réemployabilité des pièces. Cette étude utilise la méthode de Durmisevic pour concevoir et évaluer la réversibilité et le potentiel de réemploi du bâtiment et de ses éléments. Le modèle a identifié 8 principaux indicateurs de réversibilité. Les indicateurs sont définis de manière à permettre la compréhension de trois principales dépendances qui émergent au sein de chaque bâtiment ou produit : les dépendances fonctionnelles, les dépendances techniques et les dépendances physiques.

Ces indicateurs sont les suivants : Premièrement, l'indépendance fonctionnelle. Celle-ci évalue le niveau de séparation des fonctions qui ont des taux de renouvellement et des usages attendus différents. Deuxièmement, la systématisation indique la possibilité de regroupement des éléments en modules indépendants basés sur la fonctionnalité, l'assemblage / démontage et la coordination du cycle de vie des éléments. Troisièmement, la dépendance relationnelle est un indicateur du degré de minimisation du nombre de relations représentant les dépendances fonctionnelles et techniques entre les éléments d'un bâtiment. Quatrièmement, les éléments de base de la configuration : renseigne sur la conception de l'élément de base qui sert d'intermédiaire entre les éléments de la configuration. Cinquièmement, la coordination du cycle de vie des éléments ; c'est-à-dire la coordination de l'utilisation et du cycle de vie technique des éléments à l'intérieur des bâtiments par rapport à leurs séquences de démontage. Sixièmement, les séquences d'assemblage / démontage évalue la possibilité d'assemblages plus parallèles que séquentiels dans un bâtiment. Septièmement, la géométrie et morphologie : suggère une conception de la géométrie du bord du produit de façon à ce qu'elle permette de récupérer les éléments sans abîmer ou endommager les autres environnants. Huitièmement, le type de connexion suggère un type de connexion qui puisse permettre la séparation et la récupération facile des éléments [3]. Au vu de notre définition de la façade nous considérerons notamment le huitième indicateur : celui des types de connexions pour mener à bien notre évaluation (Cf. Figure 2.6).

Selon la classification faite par Durmisevic, il existe sept types de connexions, allant de la plus permanente à la plus flexible. La plus permanente est une connexion chimique directe. Par ordre de flexibilité croissante, celle-ci est suivie par des connexions directes entre deux composants préfabriqués, puis une connexion indirecte avec un troisième matériau chimique (exemple d'éléments soudés) et enfin des connexions directes avec un dispositif de fixation supplémentaire. Les plus flexibles sont les connexions indirectes, la moins flexible concerne des composants tiers dépendants. Par ordre de flexibilité croissante, celle-ci est suivie d'un assemblage par composants tiers indépendants, et enfin une connexion avec un dispositif de fixation supplémentaire, étant la plus adaptable des solutions. En bilan, nous remarquons qu'il est préférable d'avoir des composants supplémentaires reliant deux autres composants, car ils permettent une indépendance et une manipulation plus facile lors du

**TYPES DE CONNEXIONS, Durmisevic & Brouwer (2006)**

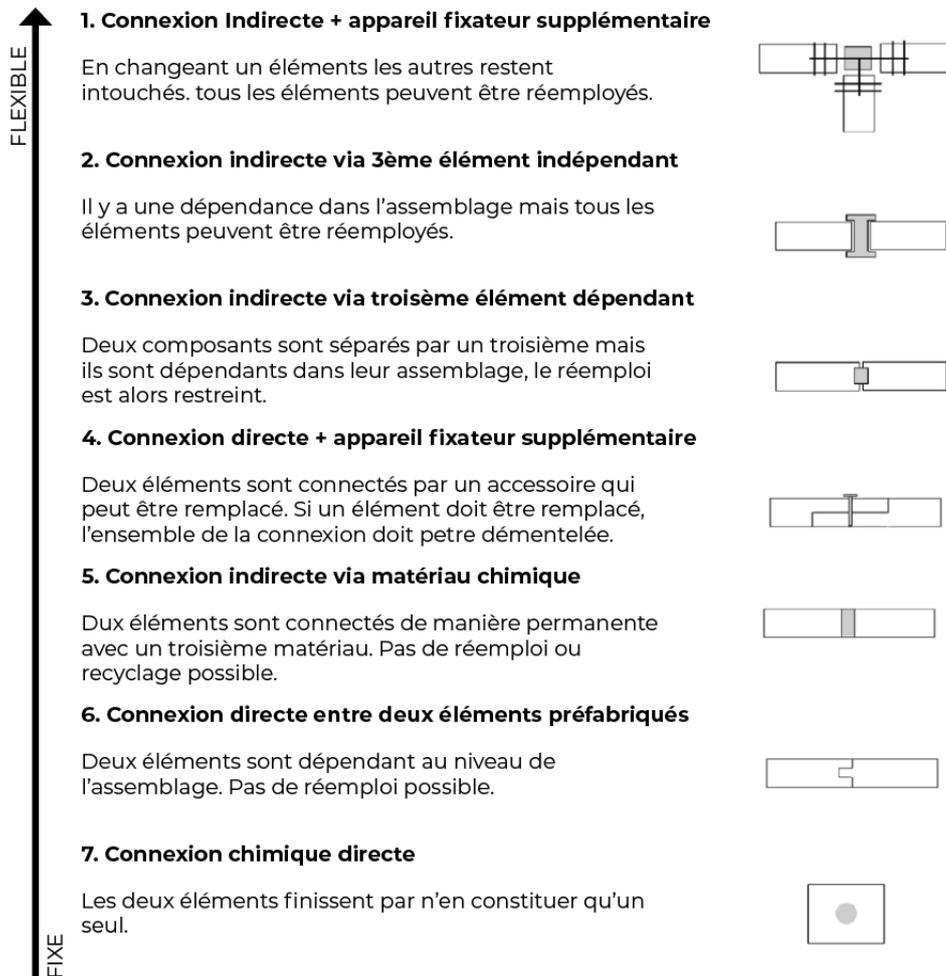


FIGURE 2.6 – Types de connexions [17]

montage et du démontage. La figure 6 formule les sept types de connexion graphiquement.

## 2.3 Résultats

### 2.3.1 Conséquences d'un modèle leasing et intérêt pour le réemploi

Cette dématérialisation de cette partie de l'industrie de la construction qui déplace le modèle commercial basé sur la vente de produits à un système basé sur la prestation de services, dans lequel les matériaux peuvent être récupérés et réemployés, réduit ainsi l'impact environnemental, puisque gardés entre les mains de leurs fabricants. En effet, la location de façades via l'utilisation de contrats de service à long terme est un processus continu dans lequel les composants du bâtiment sont constamment remplacés par de nouveaux plus efficaces, tandis que les anciens sont décomposés en pièces de rechange qui peuvent être réemployées pour produire la génération technologique suivante.

Ce concept émerge en réponse à la congestion dans le processus de rénovation actuel où

---

les entreprises chargées de développer et de fournir des technologies de façades n'ont aucun intérêt direct dans la performance à long terme de leurs produits, qui finissent régulièrement par être éliminés par le client en fin de prestation ce qui entraîne une production inutile de déchets et la perte de produits, de matière et de valeur. Les boucles industrielles circulaires sont ainsi facilitées, car les fournisseurs qui conservent la propriété de leurs produits sont fortement incités à en tirer le maximum de valeur lorsqu'ils atteignent la fin de leur durée de vie tout en innovant dans des pratiques commerciales et de gestion favorisant une production de haute qualité, basée sur la durabilité et les performances plutôt que sur le coût initial le plus bas.

En effet, toute forme de conservation multi-cyclique des ressources garantie par des contrats ou par un modèle d'entreprise appliqué permet d'éviter la destruction du capital incorporé (par exemple travail et énergie) constituant un objectif implicite des pratiques de réemploi. Du point de vue de la gestion des ressources, un modèle de location des biens pérennisant la propriété du produit au fournisseur émancipe d'une part le marché du principe d'obsolescence programmée puisque les produits dont il conserve la propriété deviennent donc une forme de capital. Ainsi, l'intérêt du fournisseur / producteur à rallonger au maximum la durée de vie de ses produits est augmenté au sein d'un schéma économique de prestation de services. En conservant la propriété d'un produit, le producteur conserve parallèlement la responsabilité de l'ensemble de son cycle de vie obligeant ainsi les producteurs à réfléchir à l'adaptabilité et à la réutilisabilité qui ne représentent alors plus des complications mais plutôt des incitations à réaliser des gains potentiels. Par conséquent on sort d'un modèle de concurrence et d'obsolescence programmée pour aller vers un modèle plus durable, plus coopératif et finalement plus transparent (le coût initial du produit comprends réparations, remplacements, consommables : eau, électricité, papiers ...). A contrario, dans un modèle économique classique, le coût global du produit reste flou. D'autre part, c'est une façon de contraindre les producteurs à livrer des produits optimisés d'un point de vue financier. Nous pouvons assimiler la logique consistant à confier à l'entrepreneur la charge de l'entretien du bâtiment à une forme de Responsabilité Élargie du Producteur (REP<sup>11</sup>).

Selon cette formule, il est en effet incité à fournir un bâtiment robuste, fonctionnel et économe. In fine ce n'est pas tant la possibilité de réemploi ou de recyclage qui est décisive pour arriver à un comportement multi-cyclique, durable des éléments, mais les modèles commerciaux des acteurs du marché qui permettent de le rendre évident. Concrètement l'objectif de l'EC est de tendre vers un système global où la conservation des matières premières conduit à un avantage économique [35]. Cette dernière assertion appuie l'étude de l'application d'une filière leasing aux produits issus du secteur de la construction dans le but d'augmenter leurs possibilités de réemploi.

### **2.3.2 Modèles linéaire et traditionnel : une nouvelle organisation des parties prenantes**

Par outil de comparaison les différences entre le modèle linéaire traditionnel et circulaire prospectif émergent. Celles-ci permettent d'en déduire les enjeux soulevés par un tel changement de paradigme dans le secteur de l'immobilier.

Premièrement, le modèle marchand traditionnel, actuel (des produits neufs) se constitue de la manière suivante : plusieurs et divers producteurs livrent les éléments produits à des constructeurs via un importateur. Ensuite, les constructeurs montent les éléments ensembles

---

11. REP : C'est dans le domaine de la gestion des déchets qu'est apparue cette notion. En Europe, ce principe est fixé par la directive 2008/98/CE qui déclare les principaux cadres réglementaires en matière de traitement des déchets. Le principe de responsabilité élargie repose sur une logique de « pollueur-payeur ». Les producteurs sont contraints d'assumer le coût du traitement en fin de vie de leurs produits polluants. Ces principes sont implémentés au moyens de taxes dédiées.

---

au sein d'un édifice selon des prescriptions établies par le concepteur, correspondant aux besoins d'un commanditaire. Nous pouvons noter que dans ce schéma, aucune des parties prenantes n'est responsable du traitement de cet ensemble en fin de vie. Ainsi, la responsabilité des divers acteurs s'arrête à la livraison du produit [22]. Dans le cadre de l'économie circulaire et suivant les principes de l'économie de la fonctionnalité ces relations sont repensées au sein de modèles économiques circulaires. Ceux-ci révisent les modalités liées à la responsabilité sur les produits via de nouvelles formules contractuelles lesquelles étendent la mission de l'entreprise à l'entretien et à la maintenance des bâtiments. Cette nouvelle formule économique s'accompagne d'un changement profond dans le rapport à la propriété reposant sur l'achat d'un service plutôt que d'un produit.

Deuxièmement, dans le modèle traditionnel, généralement, la consommation s'entend dans le sens de l'acquisition. C'est-à-dire que c'est la propriété qui conditionne le droit d'user d'un bien. Le modèle de leasing proposé se base au contraire sur l'idée selon laquelle la capacité d'un bien ne découle pas forcément d'une relation de propriété. Notons que souvent le consommateur via son achat cherche à satisfaire un besoin pouvant être découplé d'une logique de possession. Cette idée est conforme aux propos de Johan Van Niel d'après qui « la valeur d'un produit pour le consommateur réside dans les bénéfices qu'il retire de son utilisation, et non dans la possession du produit en question » [44, p.3].

Troisièmement, dans le modèle marchand traditionnel, les gains du producteur augmentent au prorata de la quantité de matière écoulee. Dans le nouveau modèle de prestation de services, le devenir des produits fournis continue à concerner leur fournisseur d'origine jusqu'à leur fin de vie voire au delà. En effet, ce concept semble d'une part être un élément clé dans l'allongement de la durée de vie d'un produit d'abord et d'un bâtiment sûrement. D'autre part, il procède d'un changement majeur par rapport au modèle économique linéaire traditionnel qui préconise au contraire la possession d'un produit à son utilisation fonctionnelle. Dans ce nouveau modèle économique il devient donc logique de s'attendre à ce que le service aille encore plus loin ; c'est-à-dire au delà de la vie de l'édifice.

Par conséquent, la structure du prix et celle du coût changent radicalement. Au delà de la faisabilité opératoire d'un tel modèle, il convient de questionner alors son impact sur le concept de propriété de l'édifice et de sa valeur. En effet, si l'on extrapole ce modèle de location à l'ensemble du parc immobilier il se heurte à des questions relatives au droit de propriété. Sachant que nos économies occidentales sont quasi-totalement bâties sur la propriété immobilière comme base de la richesse d'un pays, si dans quelques années un édifice n'est qu'un ensemble de leasing, les définitions du bien immobilier et de son rôle économique changent.

### **2.3.3 Droit de propriété et défis liés à ce nouveau modèle circulaire**

Aujourd'hui, être propriétaire d'un bien immobilier signifie pouvoir garantir avec celui-ci sa solvabilité financière. Lorsque ce bien immobilier est constitué de plusieurs parties chacune comprise dans un contrat de leasing différent, cette définition du bien immobilier est remise en question. Plus généralement, l'application des formules de PS au secteur de la construction soulève des questions d'ordres conceptuel, culturel et juridique parmi lesquelles, la question du sentiment de propriété et le droit de modifier. En effet, le phénomène de la « culture de la propriété » est pointé comme un obstacle au déploiement de certains principes de l'économie de la fonctionnalité [43, p.42]. Lorsqu'il en vient au logement, l'idéal de la propriété reste présent pour de nombreux consommateurs [22].

Dans ce contexte, l'application du schéma juridique donné par un modèle de leasing dissociant le droit d'usage de la propriété peut se confronter à des barrières culturelles. À cet égard, le « taux de propriété » est un indicateur adéquat des difficultés que risquent de

---

rencontrer des formules de ce type. Ce chiffre indique la proportion de résidences occupées par des propriétaires par rapport à l'ensemble de tous les propriétaires. En France ce taux est de 64,1% [40] ce qui reflète bien que la propriété occupe toujours une place importante dans l'imaginaire collectif et dans les pratiques des habitants. Par ailleurs, la mise en pratique des formules de PS pose la question du risque d'imposer une limitation au droit d'user d'un bien selon sa convenance.

En effet, cette nouvelle forme contractuelle dicte les possibilités de jouir d'un bien dont l'usager n'est plus le propriétaire. En ce sens il est légitime de douter quant à l'alignement des aspirations à la distinction et à la propriété privée avec les exigences de la production de masse et les formes contractuelles complexes au niveau des droits d'usage qu'impliquent les solutions des PSS. D'un point de vue juridique, un risque impliqué par un modèle de type leasing est celui du phénomène de capture des clients. C'est lorsqu'il n'est pas laissé au commanditaire une grande possibilité pour faire des modifications (à cause de la complexité et des coûts de main d'oeuvres) une fois que les démarches sont lancées. Ce phénomène a d'autant plus de chances d'avoir lieu dans le cas de projets conséquents comme celui de la construction d'un bâtiment, impliquant un contrat de prestation de service sur une longue durée. Si le client n'est pas satisfait d'un service il lui est presque impossible de changer de prestataire. Toute l'infrastructure appartient de fait à l'entreprise qui fournit. Elle est construite à l'aide de composants spécifiques et selon des systèmes d'assemblage propres à celle-ci. Ainsi, les possibilités de transformation passent obligatoirement par l'entreprise avec laquelle le commanditaire est engagé financièrement sur une longue période [22].

Par ailleurs, Le modèle traditionnel de propriété repose notamment sur la loi de l'accession [35]. C'est un terme qui signifie que le propriétaire du terrain est le propriétaire légal de tous les immeubles construits sur celui-ci. La règle de l'accession, telle qu'elle est appliquée à l'immobilier, remonte à la maxime superficies solo cedit en droit romain qui dit que la propriété de tout ce qui est construit sur ou dans la terre, suit la propriété de la terre. Le propriétaire initial des matériaux ne peut donc pas récupérer sa propriété. Donc un fournisseur ne peut pas revendiquer la propriété d'un produit vendu. Or, dans de nombreux systèmes juridiques, les éléments incorporés dans un bâtiment comme la façade ou le toit, ou les équipements d'une usine, sont considérés comme des « fixtures »<sup>12</sup> et donc considérés comme faisant partie de l'immobilier [35]. Cette règle existe dans le droit immobilier pour deux principales raisons : d'abord pour une question de sécurité juridique. En effet, pour les tiers, la propriété légale des objets serait difficile à déterminer si elle était basée sur des pièces isolées. Ce premier motif pourrait évoluer dans une direction différente dans un proche avenir grâce à l'utilisation de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) et d'interfaces plus standardisées.

Ces interfaces permettraient de marquer les composants en fonction du fournisseur (et éventuellement du propriétaire) grâce à une documentation BIM continue des composants du bâtiment. De plus, l'introduction de « technologies blockchain » introduisant des modèles de financement et de propriété radicalement différents de produits et services complexes pourrait améliorer cette condition. Ensuite, cette règle permet de maximiser et de préserver les valeurs immobilières dans la société. C'est-à-dire que si l'on part du principe que la somme des parties ensemble vaut plus que toutes les parties prises séparément, une fois que différents objets ont été joints, la loi doit empêcher la perte de la valeur ajoutée de l'unité.

---

12. Fixture : terme anglais pour définir un appareil / fixation / installation : un équipement ou un mobilier qui est fixé en position dans un bâtiment ou un véhicule.

---

### 2.3.4 Un potentiel de mise en pratique pour un client spécifique et une organisation d'entreprises renouvelée

Quatre domaines dont il faut repenser les modes de fonctionnement entrent en jeu dans la contractualisation de la façade aluminium et impliquent chacun des acteurs divers. Le premier concerne la dynamique de la demande de la part des promoteurs et propriétaires immobiliers. Le deuxième s'agit de la nécessaire réorganisation des produits et des processus tout au long de la chaîne d'approvisionnement, engageant les fournisseurs. Le troisième domaine est celui du financement et interroge les méthodes de répartition des ressources financières comblant l'écart entre le coût d'investissement initial et les frais de service à long terme. Enfin, la gouvernance questionne l'innovation réglementaire nécessaire pour séparer la propriété du bâtiment et de la façade.

Par ailleurs, ce projet pilote a démontré que la contractualisation du bail de façade a plus de possibilité d'exister en s'adressant à un profil de client particulier et via la réorganisation du modèle de l'entreprise actuel. D'une part, le profil de client identifié par la recherche est celui du propriétaire utilisateur (ou propriétaire occupant). En effet, dans le secteur du bâtiment la demande est représentée par les organisations qui possèdent et/ou utilisent des bâtiments (et des terrains). Lorsqu'il y a une intervention ou une transaction, ils deviennent des clients qui paient pour des produits et/ou des services. En tant que propriétaires d'immeubles, les clients se concentreront sur la valeur résiduelle<sup>13</sup>, les coûts du cycle de vie et le retour sur investissement. En tant qu'utilisateurs de ces bâtiments, les clients se concentreront sur la manière dont leur performance organisationnelle est affectée par le bâtiment.

Par conséquent, explorer de nouveaux modèles de contrats de bail opérationnel dans le secteur de l'immobilier devient plus intéressant lorsque les perspectives du propriétaire et de l'utilisateur sont combinées dans un seul client. Ce n'est qu'alors que les valeurs stratégiques, fonctionnelles, financières et physiques doivent être prises en compte par une seule partie prenante [5]. D'autre part, le modèle développé propose une nouvelle organisation des fabricants de façade et fournisseurs de systèmes dans le sens de ce qui serait une entreprise étendue.

En effet, traditionnellement, dans la chaîne d'approvisionnement des façades, l'entrepreneur est l'intégrateur<sup>14</sup>. Les fournisseurs ainsi que les concepteurs jouent un rôle mineur. En outre, le rôle du client et les spécifications de la demande<sup>15</sup> sont dominants, avec des appels d'offres trop spécifiés axés sur des solutions techniques plutôt que sur des résultats [5]. Les entrepreneurs et donc les fournisseurs ont tendance à suivre la demande plutôt que de développer et de fournir des produits intégrés. « Façade leasing » projetée dans le sens où le rôle des entrepreneurs diminue. Cela offre l'opportunité à des groupes de fournisseurs de reprendre potentiellement le rôle d'intégrateurs.

Dans un tel scénario, le modèle commercial des coalitions de fournisseurs consisterait à développer des produits circulaires et à développer des services de location, de mise à niveau ou de reprise de ces produits. La chaîne d'approvisionnement des fournisseurs agirait alors comme une « quasi-entreprise » unique ou une « entreprise étendue » [5]. La « quasi-entreprise » pointe vers la notion de coalitions d'entreprises se comportant comme une seule entreprise. L'entreprise étendue pourra alors être le point de contact unique avec le client, le fabricant de façades et le prestataire de services. Dans la plupart des chaînes d'approvi-

---

13. Valeur résiduelle : "elle correspond à la valeur d'un bien à l'expiration de sa durée d'utilisation ou de location." [13]

14. Un intégrateur de systèmes (system integrator) est une personne ou une entreprise qui se spécialise dans le regroupement de sous-systèmes de composants en un tout et en s'assurant que ces sous-systèmes fonctionnent ensemble

15. Sur un plan économique, la demande désigne la quantité d'un produit ou d'un service demandé par les individus à un niveau de prix donné. La demande est intimement liée à l'offre.

---

sionnement, l'une des entreprises serait « l'intégrateur du système » qui dirigera et intégrera l'ensemble du système d'approvisionnement. En règle générale, il s'agit de la plus grande entreprise de la chaîne d'approvisionnement, prenant la majeure partie du risque financier.

Finalement, le modèle propose une transition de la recherche immobilière par étapes : dans un premier temps, seul le fournisseur de services doit s'engager dans des activités de prestation de services, tandis que les fournisseurs et sous-fournisseurs de deuxième niveau continuent de proposer des offres basées sur les produits. Un tel processus de réorganisation graduelle de la chaîne d'approvisionnement est considéré comme une proposition plus probable qu'un changement radical et intersectoriel.

### **2.3.5 spécificités et contraintes des produits de la façade bois en regard à son démontage**

Premièrement, l'état des produits bois présents dans un bâtiment à déconstruire diffère selon les traitements qu'il a subi ou non. Par exemple, le bois imprégné est considéré comme dangereux et ne peut en aucun cas être réemployé avec d'autres catégories de bois [45]. Dans l'état actuel des techniques de tri, l'hétérogénéité des déchets de bois représente un défi majeur pour les acteurs engagés dans leur valorisation [45]. Étant donné les difficultés pour distinguer et collecter les bois non imprégnés, il importe dès lors de développer et d'optimiser la collecte et le tri de ces produits. Ceci ne constituerait pas un problème dans une temporalité future où le fournisseur reste le même depuis la livraison du produit jusqu'à son réemploi. Mais dans le cas d'éléments bois non informés de façades traditionnelles du parc bâti actuel cette question reste problématique et conduit à une étape intermédiaire au moment de la collecte qui est celle du diagnostic.

Enfin, dans le cas du mur rideau en aluminium, des panneaux de mêmes dimensions sont répétés composés d'un cadre en aluminium dans lequel s'emboîte un vitrage. Pour la façade bois, le bardage et les menuiseries sont deux éléments distincts dont les méthodes de prélèvement différent étant donné leurs connexions respectives. Une menuiserie étant composée de dormants connectés aux éléments muraux, et d'ouvrants / vantaux plus facilement démontables que les dormants [18], leur méthode de dé-construction consiste en un arrachement destructif, un dés-emboîtement et un dévissage. Leur détérioration peut survenir à la dépose ou lors de leur acheminement. De plus, au vu de leurs caractéristiques géométriques différentes (éléments surfaciques et éléments longs) ces deux ne suivent pas la même filière de réemploi aussi bien que la fourniture de chacun suit une filière à part (ils sont compatibles mais pas produits par le même producteur) et par conséquent impliqueraient deux contrats de leasing différents. Ainsi, au moment de la dé-construction, encore une fois, une nouvelle étape en réponse à ce propos émerge : celle de la mise en relation des différentes parties prenantes (différents prestataires de services) préalable à la dé-construction. Par analogie au processus relatif à la façade aluminium, celui de la façade bois se composerait des étapes suivantes : mise en relation, dé-construction, contrôle, collecte, réemploi.

### **2.3.6 Degré de démontabilité des produits de la façade bois**

À la manière d'un métré, le tableau suivant (Cf. Figure 2.7) fait l'inventaire des pièces composant la façade bois telle que définie dans la méthodologie, tout en précisant leur quantité respective. Celle-ci permet de calculer la proportion que chaque élément occupe sur la façade en rapport à l'ensemble ("TOTAL") afin de définir finalement le taux de façade récupérable. Pour un résultat le plus représentatif possible, des proportions respectives de chaque élément, dans le cas d'une façade hybride (ossature aluminium et bardage bois) dont les épaisseurs de produits ne sont pas du même ordre (1mm pour le métal, 8 mm à 5 cm pour le bois), nous avons choisi de prendre comme unité de mesure la masse (en g) puisqu'elle

nous a paru la plus juste afin de comparer deux matériaux dont les propriétés relatives sont largement différentes. En effet, la masse  $M=V \cdot P$  (avec  $V$  : le volume (en  $cm^3$ ),  $P$  : la masse volumique (en  $g/cm^3$ ) et  $M$  (en g)) prend en compte la masse volumique propre à chaque matériau :  $P_{bois} = 0.35g/cm^3$  et  $P_{aluminium} = 2.7g/cm^3$ .

Au delà des résultats auxquels il nous permet d'arriver, ce tableau met en place une méthode que l'on peut réitérer pour une définition plus large de la façade (qui prendrait par exemple en compte la structure secondaire et l'isolation) ou encore pour d'autres typologies de façade. Cette liste recueille trois catégories de produits : les joints et fixations métalliques, les produits bois de finitions et les éléments de support en aluminium. Étant donné la méthode d'évaluation choisie, il nous a semblé pertinent d'organiser l'inventaire selon les différentes parties de la façade. En effet selon qu'il s'agisse d'un angle, du couronnement, de la base ou du corps de façade, des variations au niveau des assemblages apparaissent et des éléments s'ajoutent ou disparaissent.

COMPOSANT	VOLUME À L'UNITÉ (cm³)	MASSE (g)	NOMBRE DE PIÈCES	MASSE TOTALE (g)	PROPORTION PAR RAPPORT À L'ENSEMBLE DE LA FAÇADE (%)	DÉTAIL CONSTRUCTIF	TYPE DE CONNEXION	INDICE DE RÉEMPLOYABILITÉ			
<b>JOINT HORIZONTAL</b>											
1,00 Bardage	5660,80	1981,28	1096,00	2171482,88	-	Figure 11: coupe CC'	D	4			
2,00 Vis	-	-	-	-	-						
2,2 vis à écrou	0,01	0,03	4124,00	133,62	-						
2,3 vis de fixation au mur	0,01	0,03	2062,00	66,81	-						
<b>3,00 Structure secondaire</b>											
3,1 profilé aluminium en L	11,40	30,78	114,00	3508,92	0,13						
3,2 profilé aluminium en T	-	-	-	-	-						
<b>3,3 Profilés</b>											
3,31 crochet de support mural	-	-	2062,00	-	-						
4,00 clip de fixation	0,01	0,01	2062,00	27,84	-						
<b>MENUISERIE</b>											
8,00 Traverse haute	75,00	26,25	3,00	78,75	0,00	Figure 11: coupe JJ'	E	3,00			
9,00 Vantail	153,00	53,55	3,00	160,65	0,01		C	5			
10,00 Meneau	90,00	31,50	3,00	94,50	0,00		C	5			
11,00 Ouvrant	45,00	15,75	6,00	94,50	0,00		C	5			
12,00 Dormant	45,00	15,75	6,00	94,50	0,00		E	3,00			
13,00 Traverse basse	75,00	26,25	3,00	78,75	0,00		E	3,00			
14,00 Charmière	0,01	0,00	12,00	0,05	0,00		C	5			
15,00 joint élastomère	-	-	-	-	-		E	3,00			
16,00 Vitrage	2830,00	990,50	3,00	2971,50	0,11		A	7			
<b>TOTAL</b>											
Facade	-	-	-	2782473,37	-						
Vis	-	-	-	327,30	0,01						
clip de fixation	-	-	-	38,66	-						
Bardage	-	-	-	2765866,88	99,40						
Menuiserie	-	-	-	601,70	0,02						
<b>Taux de réemployabilité de la façade bois</b>											
somme des % de toutes les cellules vertes = 99,98%											

FIGURE 2.7 – Inventaire quantitatif des composants du cas de façade étudié pour le calcul de son taux de réemployabilité

Lien vers le détail : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03482479>

Toutefois, nous remarquons d'après les résultats finaux tirés de ce tableau (dernière colonne à droite) que ces changements n'impactent pas l'indice de réversibilité de façon significative. En effet nous notons un taux de réemployabilité de quasi 100% : seulement les menuiseries, dont les méthodes d'assemblage qui utilisent des colles présentent des cases rouges définissant un indice de réversibilité faible. Or dans le cas d'études ces éléments sont en faible quantité en rapport à l'ensemble des planches de bardage. Finalement, c'est surtout le type de structure secondaire (ossature en aluminium ou ossature bois) influant sur le type de joints (clous, vis, clips...) (Cf. Figure 2.3) et définissant ainsi le type de connexion selon la méthode Durmisevic (Cf. Figure 2.6) qui influent sur l'indice de réemployabilité de la façade.

Notons que dans le tableau une lettre est attribuée à chaque type de connexion donnée par la méthode Durmisevic et correspond à l'assemblage apparent sur le détail constructif de la colonne précédente. Par ailleurs, nous remarquons que les bardages eux-mêmes ont un indice de réversibilité élevé. Toutefois la manière avec laquelle ils sont assemblés reste décisive de leur possibilité de réemploi. En outre, si immédiatement nous pouvons penser que le bois a un temps de dégradation intrinsèque, des méthodes d'entretien et des agents appliqués en surfaces permettent d'allonger sa durée de vie. (Cf. Figure 2.8) Intégrer la façade

bois à un système de leasing où le service d'entretien est compris par définition prend alors d'autant plus de sens dans le cas d'une façade bois. En effet, chaque matériau de revêtement doit être entretenu pour atteindre sa durée de vie en service maximale. Aucun entretien entraîne une perte continue de fonctionnalité et une décroissance rapide (voir courbe 1) [28]. Rappelons qu'au vu de la définition de la façade bois donnée et qui se limite au bardage, une disparité existe dans les résultats. En effet, si le tableau montre une proportion à 99,98% occupée par les bardages et 0,02% occupée par les pièces métalliques c'est parce que ces dernières sont principalement des petits outils de connexion (vis, clips, oeuillets...) dont les dimensions sont presque négligeables à côté de celles des produits bois.

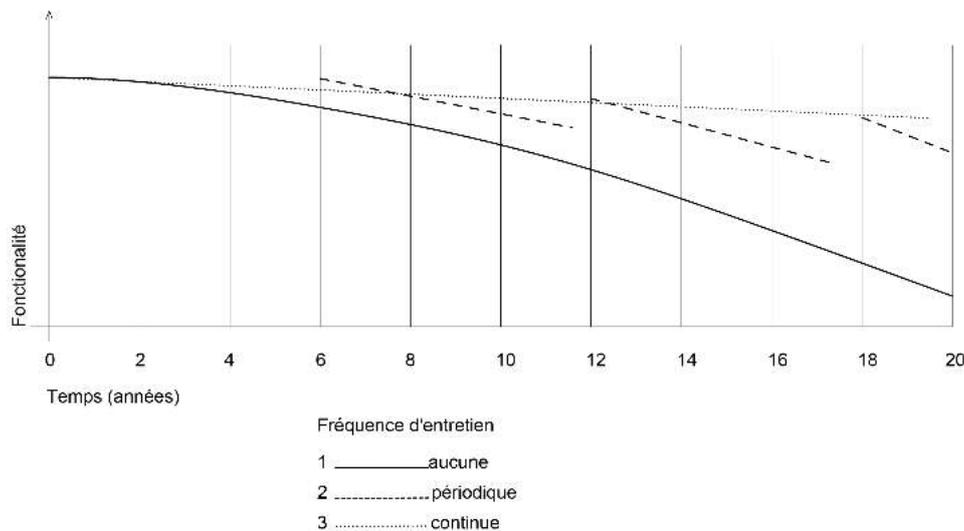


FIGURE 2.8 – Fonctionnalité de la façade bois en fonction de la fréquence d'entretien [25]

La rénovation dans ce cas implique le remplacement complet du revêtement qui ne remplit plus sa fonction ce qui n'est pas dans l'intérêt du fournisseur qui garde les droits de propriété. De la même manière, les menuiseries dans la façon avec laquelle elles sont fixées (emboîtement du verre dans le cadre, charnières entre ouvrants et dormants...) présentent aussi un indice de réversibilité élevé de 5 d'après le tableau. Cependant, ce résultat est à nuancer. En effet, nous avons vu que pour le cas des menuiseries les méthodes de dépose elles-mêmes vont influencer le potentiel de réemploi. Somme toute, selon notre tableau, il semblerait alors que dans le cas limité au bardage et menuiserie montés sur une structure aluminium aucune pièce ne devrait systématiquement être perdue lors du démontage. C'est notamment la capacité des vis à être dévissés par définition contrairement aux clous par exemple qui permettent cette possibilité. Enfin, la méthode d'évaluation elle-même présente certaines limites.

En effet, celle-ci repose sur un seul critère parmi les huit établis. Par exemple, selon si c'est un élément de jonction ou un élément surfacique ou un profilé le matériau diffère dans sa durée de vie ce qui n'est pas pris en compte. Enfin le réemploi de l'un ou de l'autre n'a pas le même impact. En effet le réemploi d'une vis ne compte pas autant que celui du bardage, de l'ossature ou des éléments de menuiserie. À ce propos, nous ajouterons que dans le cas étudié, l'évaluation aboutit à un indice et un taux de réemployabilité élevés (respectivement > 4 et 99,98%). Toutefois nous pouvons noter que dans ce même cas où la structure secondaire et les éléments de finition sont hybridés (bardage bois monté sur une ossature aluminium) les cycles de vie respectifs ne sont pas coordonnés. Or d'une part, théoriquement, selon le cinquième critère établi par la méthode Durmisevic, bien que la démontabilité soit facilitée par le type de connexion, l'indice de réversibilité, s'il prend en compte ce deuxième facteur risquerait de diminuer. D'autre part, dans la pratique en nous

référant au scénario de démontage de la façade bois ce même indice reste puisque l'élément ayant une durée de vie inférieure : le bardage bois est celui qui est accessible immédiatement étant situé en façade.

Ainsi, les méthodes d'évaluations sont à considérer ensemble et non indépendamment les unes des autres pour des résultats les plus précis possibles. Sur le cinquième critère de réversibilité, chaque couche a son cycle naturel et doit être adaptable en fonction de son cycle de vie. À ce propos, en 1994, Stewart Brand théorise le concept de *Pace Layering* [10] répartissant en couches distinctes l'ensemble du bâtiment (Cf. Figure 2.9).

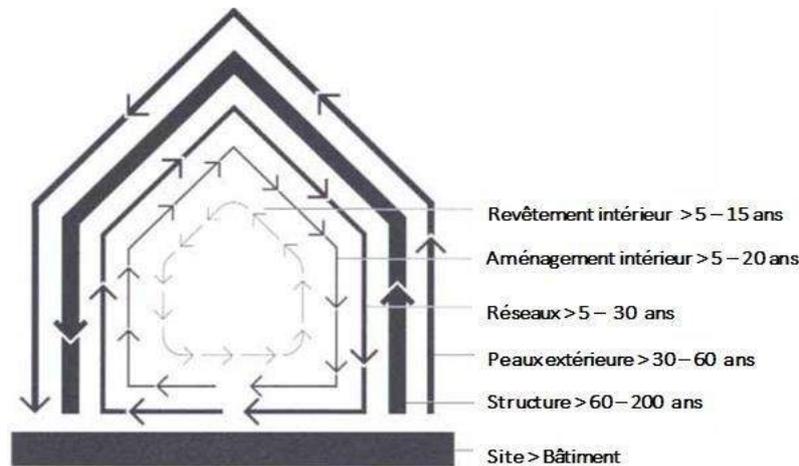


FIGURE 2.9 – Théorie « Pace Layering » [10]

Celui-ci prétend que les opportunités de récupération sont influencées par la répartition des « couches » des bâtiments. Il établit donc une hiérarchisation des couches en fonction de leur durée de vie. En effet, les couches constructives d'un édifice sont renouvelées selon des rythmes différents. Par exemple, les éléments de finition sont changés plus fréquemment que les équipements techniques, eux-mêmes étant changés plus fréquemment que l'ossature. Garder une certaine distinction entre ces couches permet, lors de la dégradation d'une des couches devant alors être remplacée, d'éviter de reléguer les couches plus pérennes.

Cette idéologie découle d'une hiérarchie définie entre les différentes couches en fonction de leur niveau de fonctionnalité et de leur usage. Par analogie, le système de hiérarchisation de S.Brand pourrait être repris spécifiquement pour les éléments de façades. (Cf. Figure 2.10) Finalement, nous avons étudié un exemple précis car l'objectif principal consiste en l'élaboration et l'application d'une méthode que l'on peut répéter à d'autres systèmes. Notons donc que si dans cet exemple les assemblages sont notamment constitués de vis, il existe par ailleurs des cas de façades où les jonctions se font par des clous, notamment dans les cas où le bardage est monté sur une structure secondaire en bois. Naturellement dans ce cas, l'indice de réversibilité se verra diminuer.

Ainsi, élargir le champ de recherche à l'isolation au moins préciserait probablement ce premier résultat obtenu en démontrant certaines irréversibilités contenues dans la façade bois telle qu'elle est actuellement conçue. Notons que la méthode d'évaluation reste la même et qu'il suffirait de compléter les cases du tableau par de nouveaux composants. Enfin, concernant la méthode employée, pour aller plus loin dans l'objectif de la systématiser et de l'automatiser, il serait judicieux de développer un algorithme qui pourrait directement reconnaître l'information géométrique qu'on lui transmet (dans le tableau : les détails constructifs) et d'identifier automatiquement à partir de là le type de connexion pour en déduire l'indice de réemployabilité.

Dans notre cas, nous avons tenté de traduire ce même concept à l'aide d'une infor-

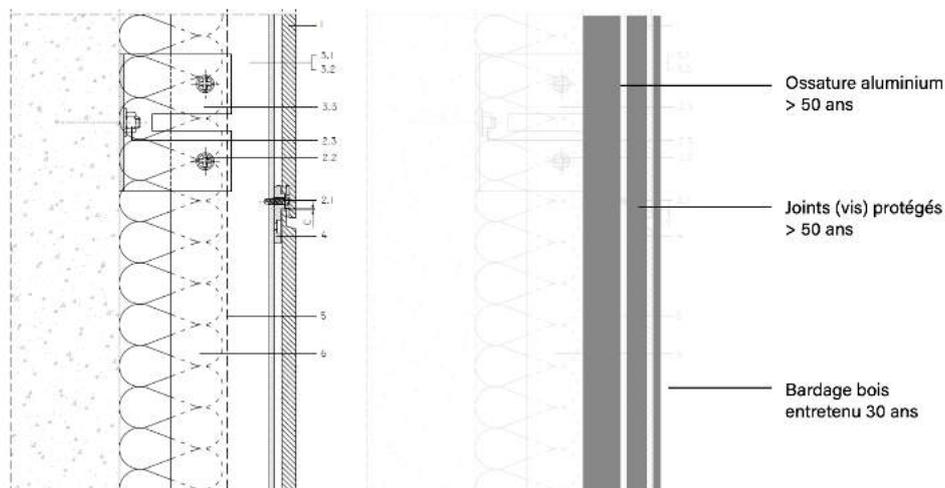


FIGURE 2.10 – Application du système de hiérarchisation de Brand aux éléments de la façade bois

De la même manière que Brand, les épaisseurs des couches sont proportionnelles à la durée de vie

mation littéraire sur le logiciel "Excel". En effet, le passage de l'avant dernière colonne (à droite) à la dernière colonne se fait selon la formule suivante : « =SI(Q3=«A»; «7»; SI(Q3=«B»; «6»; SI(Q3=«C»; «5»; SI(Q3=«D»; «4»; SI(Q3=«E»; «3»; SI(Q3=«F»; «2»; SI(Q3=«G»; «1»)))))) » qui permet d'afficher un indice selon la lettre correspondant au type de connexion puis d'afficher la case en vert dans le cas où cet indice vérifie sa possibilité de réemploi.

### 2.3.7 Des avantages à priori limités de la façade bois au sein d'une filière leasing

Pour qu'un produit se prête à intégrer une filière leasing il faut que dans un premier temps la mise en location des pièces puisse profiter au fournisseur. Cela passe par des produits dont la durée de vie en service est relativement longue ou qui fournissent un service au delà de leur matière propre (cas des systèmes intégrés de la TUD). Dans un deuxième temps, il faut que ces pièces présentent un fort potentiel de réemploi ; passant par une importante capacité à être démontés facilement. D'une part, selon ces critères, un modèle économique de type leasing peut être associé aux composants de la façade bois qui présentent un fort indice de réversibilité d'après la méthode d'évaluation appliquée. (Cf. Figure 2.7)

De plus, si le caractère modulaire de la façade en aluminium représentait une propriété en faveur de la mise en place d'un tel modèle, celle-ci peut se retrouver dans les produits bois à leur tour. En effet, par leur nature, les constructions en bois incitent à raisonner en éléments de construction basés sur des systèmes. Au cours des dernières décennies, les principes constructifs traditionnels ont été améliorés et complétés par de nouveaux systèmes [45]. Rappelons toutefois les limites de cette évaluation qui ne prend pas en considération tous les composants de l'enveloppe et qui s'est concentré sur un seul type d'ossature et donc de connexion parmi ceux possibles. D'autre part, le bois a son temps de dégradation qui lui est propre (Cf. Figure 2.8) et qui s'insère dans un système où ce temps domine par rapport à l'obsolescence technologique des pièces. En effet, la dégradation propre de la matière se fait dans un temps comparable à la durée de vie de l'édifice ce qui rend son réemploi moins intéressant.

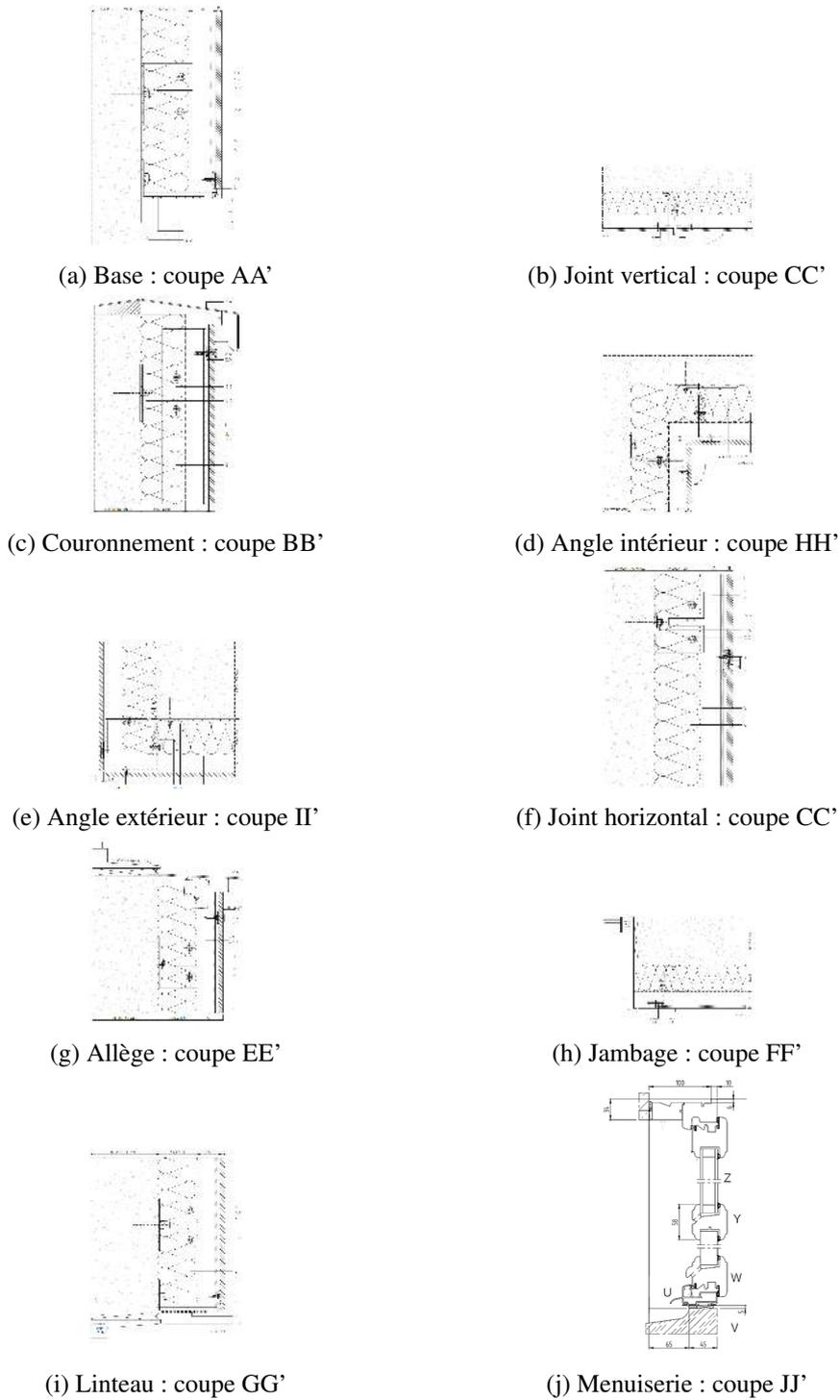


FIGURE 2.11 – Coupes sur les différentes parties de la façade bois

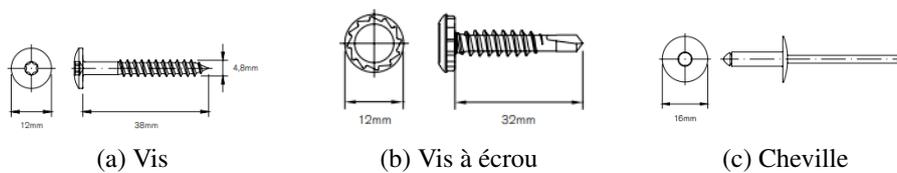


FIGURE 2.12 – Outils de connexion des éléments de la façade bois

---

Par ailleurs, les méthodes d'évaluation ont montré que la réemployabilité des pièces de la façade en bois est très élevée, cependant cet indice prend en compte uniquement le côté opératoire du processus. Si nous considérons l'intérêt que peuvent tirer les fournisseurs du bois dans le cas d'un modèle leasing par comparaison à la façade témoin en aluminium, l'on voit que ses spécificités contraignent l'application de ce modèle à ce matériau : d'abord à propos des menuiseries, dans la quasi-totalité des cas, les pièces trouvées sont de dimensions réduites [18] et la plupart des fois, faites en bois massif. C'est donc complexe d'atteindre un système idéal pour le réemploi de ces objets là [18] qui souvent finissent dans une filière de réutilisation moins valorisante du produit en question.

Enfin, des mécanismes innovants de financement de projets fondés sur les flux de trésorerie, tels que ceux utilisés dans le secteur de l'énergie éolienne, pourraient apporter une solution à l'obstacle au financement que représente le droit de propriété. Dans ce modèle, si les performances d'amélioration énergétique peuvent être soutenues de manière fiable par un corpus documenté de projets de rénovation énergétique, les revenus et la productivité résultant de la rénovation pourraient servir à garantir la trésorerie nécessaire pour couvrir le remboursement du prêt [35]. Cette alternative ne peut cependant pas avoir lieu dans le cas des façades en bois. En effet, le service que celles-ci fournissent s'arrête à leur statut de revêtement de surface. Dans ce cas de figure il n'y a pas de possibilité d'amélioration d'une quelconque performance, contrairement à la structure aluminium à laquelle peuvent être intégrés d'autres services supplémentaires. Par déduction, du point de vue opératoire, la façade bois semble présenter un fort potentiel de réemploi (dans quelques cas précis). Toutefois, son potentiel d'intégration à une filière leasing ne semble pas probable si l'on fait la comparaison avec la façade du projet pilote dont des technologies intégrées à la façade présentent des pièces pouvant être réemployées à de nouvelles fins voire à la réalisation des technologies de la génération suivante.

Le bois quant à celui-ci arrive en fin de vie non pas par obsolescence technique mais physique et qualitative. Il est en ce sens légitime de se demander en quoi la location des pièces profiterait au fournisseur. En conclusion, d'après notre étude comparative, dans la façade bois, le moteur de l'innovation dans la perspective du leasing a beaucoup moins de sens parce que la façade bois se dégrade beaucoup plus rapidement, au vu de son horloge naturelle qui limite la durée de vie du matériau. Effectivement, le bois a son temps de dégradation qui lui est propre et qui s'insère dans un système où ce temps domine par rapport à l'obsolescence technologique des pièces. Ainsi, les fabricants d'éléments de façade en bois n'ont pas de réel intérêt de se retrouver 30 ans plus tard avec des produits en bois qui ont 10 ans de vie utile.

Par opposition, un élément en aluminium est éternel et donc conservera toujours un potentiel de récupération qui lui est intrinsèque. Indépendamment de ses contraintes juridiques, le modèle économique étudié représente une approche efficace pour l'aluminium ainsi que tout autre matériau ayant une durée de vie matière très supérieure à la durée de vie technologique. L'application de ce même modèle à des matériaux comme le bois qui ont une durée de vie propre déjà trop courte paraît moins pertinente. Toutefois, nous noterons d'une part que le vieillissement du bois reste contrôlable par l'intermédiaire de vernis appliqués sur la façade. D'autre part, la nature même de la production des produits en bois permet de changer les pièces mal entretenues afin de permettre à l'ensemble de rester fonctionnel. En effet, une façade se dégrade car elle reste exposée au soleil et à la pluie. Néanmoins si elle est bien protégée par des produits chimiques ajoutés en surface cette dégradation peut être complètement empêchée. Évidemment il convient de pratiquer des sessions de maintenances successives et de façon systématique. Ces opérations vont de paire avec un schéma marchand dans lequel le propriétaire / fournisseur propriétaire (dans le cas du leasing) de la façade la met à disposition sur le marché en tant que service.

---

D'ailleurs, nous pourrions imaginer que les nouveaux modèles marchands suggérés par l'économie de la fonctionnalité dont la volonté est de faire des produits de construction de meilleure réemployabilité, puissent inciter à réaliser des projets de façade en bois qui ne seraient pas conçu de sorte à ce que celle-ci s'abîme pour raconter les traces du temps par sa matérialité, afin de servir un objectif de durabilité. Ce dernier point confronte une volonté architecturale, esthétique à un souci de circularité qui préfère protéger le bois pour augmenter sa durée de vie en service et ses possibilités de réemploi une fois arrivé en fin de vie du bâtiment.

## 2.4 Discussion

### 2.4.1 Alternative à l'obstacle juridique vis-à-vis du droit de propriété que représente un modèle leasing

Le manque de précédents pour le cas spécifique des façades ne permet pas de garantir le succès d'un tel modèle. S'ils devaient se généraliser, de tels principes mériteraient des expériences pilotes afin que leur faisabilité soit testée dans un cas concret où les principes théoriques se heurtent à la réalité du terrain et ses contraintes par rapport au droit immobilier et fiscal. Des contrats antérieurs élaborés pour des ascenseurs et des panneaux solaires appartenant à des tiers montrent que cela peut être fait en théorie, mais cela dépend de l'indépendance de la façade ou de certains de ses composants par rapport aux fonctions essentielles du bâtiment.

Certaines entreprises ont effectivement déjà implanté ce modèle : Philips, Mitsubishi Elevators, Alstom, Rolls Royce, Desso Interface et Desko. Cependant tous ces cas ne sont pas compliqués du point de vue du droit de la propriété, car ils concernent des non-fixtures. En d'autres termes, la règle d'accession ne s'applique pas dessus. Prenons l'exemple des ascenseurs Mitsubishi. Dans ce cas, la faillite à l'une ou l'autre extrémité du contrat de service peut être traitée par des moyens traditionnels : si le fournisseur déclare faillite, la valeur est détenue non seulement par l'actif physique (dans ce cas, l'ascenseur), mais aussi par le contrat de performance en cours dans lequel l'actif est inclus. On s'attend à ce que les droits du contrat puissent être achetés puis exploités par un autre fournisseur de services. En cas de faillite d'un client, la nature de l'actif limite la capacité du prestataire de services à le réclamer simplement sans entraîner de pertes importantes dues aux frais de démantèlement et de retraitement. Dans un tel cas, le contrat de service pourrait stipuler, par exemple, que le prochain propriétaire de l'immeuble (s'il doit être vendu pour rembourser la dette du client) doit continuer le contrat de service, ou acheter l'actif auprès du prestataire de services via un processus d'approvisionnement linéaire, traditionnel. Comme dit précédemment, au vu de la valeur intrinsèque minimale de la façade, ce type de contrat ne pourrait pas s'y appliquer.

Finalement, des contrats très spécifiques doivent être établis. Ces contrats doivent garantir que la valeur de la propriété est préservée au cas où l'une des parties collaboratrices aurait besoin de mettre fin ou de modifier son implication pendant les nombreuses années de la durée de vie du projet. À partir de là, nous pouvons faire l'hypothèse d'un autre modèle économico-juridique qui serait davantage porteur d'espoir pour une application future réelle venant notamment du fait d'être facilement applicable au sein d'un système juridique actuel. Contrairement aux obstacles liés au droit de propriété qu'induit la méthode leasing dont la possibilité de mise en place paraît être jusque là peu probable, à cause de toutes les réformes juridiques et économiques qu'elle impose.

Un modèle qui serait facilement accepté est celui où une loi obligerait le propriétaire d'un élément de le relocaliser dès que ce dernier arrive à sa fin de vie en service au risque de devoir s'acquitter d'un impôt sur la quantité de bois non réemployée. Donc à la fin de

---

la période où l'élément l'intéresse en tant que propriétaire ce dernier devrait le céder par contrat à nouveau à l'architecte qui le récupère. En effet, le fait d'être propriétaire d'un produit ne supprime pas les responsabilités civiles vis-à-vis de ce qui se passe dans celui-ci. En ce sens, lorsqu'un parti acquiert la propriété d'un édifice, ce dernier a le devoir de l'assurer, de l'entretenir et de garantir sa reprise à sa fin de vie. Ainsi, une responsabilité environnementale se mettrait en place et obligerait ces propriétaires à établir un contrat de maintenance et de récupération avec une société qui éventuellement serait la même société qui aurait produit l'élément initialement. Tout cela serait alternatif à un modèle de leasing qui est un modèle qui risque d'impacter fortement le concept de propriété privée et qui ne serait probablement jamais accepté dans la société occidentale qui, de plus, base la richesse d'un pays sur la propriété immobilière.

#### **2.4.2 Allongement de la durée de vie en service des produits bois par l'incrustation de la donnée**

Le fait que le bois ait un rapport à l'obsolescence technique différent que celui de l'aluminium questionne l'intérêt d'une application d'un modèle leasing à des produits en bois. En effet, dans le cas de ce matériau, les pièces en elles-mêmes se dégradent physiquement relativement au temps (dans ses deux sens : climat et durée) et non pas à cause des évolutions générationnelles technologiques. La question qui se pose donc est de savoir s'il est possible d'émanciper le bois de cette condition afin d'augmenter son potentiel à être intégré dans une telle filière. D'abord, ses caractéristiques physiques peuvent être améliorées par des agents chimiques et ainsi littéralement allonger la durée de vie du matériau. Par ailleurs, on entend par allongement de la durée de vie, celle en service à travers le (ré)usage du produit au sein de plusieurs cycles.

En effet, la possibilité de réemploi des éléments est un facteur essentiel pour leur mise en location. En ce sens, l'augmentation du potentiel de réemploi des produits bois passe par l'augmentation de leur valeur en fin de vie ; c'est-à-dire de leur réemployabilité. Or ce potentiel s'accroît avec l'information relative à chacun des éléments. En effet, aujourd'hui, le réemploi des éléments de la construction une fois arrivés en fin de vie est limité. Cette condition est due à l'inaccessibilité voire à l'absence d'information sur ces éléments : la qualité du matériau, sa résistance, ses propriétés, les techniques de construction employées pour sa mise en oeuvre et la manière dont les composants sont connectés entre eux ainsi que leurs cycles de maintenance ; qui sont toutes des données essentielles pour le bon reconditionnement des produits et de leur intégration à une filière de réemploi au moment de la dé-construction [26]. Cette information consiste à permettre une estimation juste de la qualité du produit. À l'opposé, l'absence ou le manque de données oblige à établir des estimations sur les stocks par approximations. Celles-ci, par mesures de sécurité, reposent sur des calculs avec de grandes marges réduisant alors les capacités réelles des produits en les considérant de manière générique plutôt qu'individualisée.

L'entreprise Bobi réemploi définit cette pratique comme « déclassement d'usage » : c'est lorsqu'un produit réemployé pour certaines performances est considéré lors de son second usage à 50% de ses performances initiales. Ce pourcentage joue ainsi le rôle d'un coefficient de sécurité. Toutefois, cette pratique dévalue le produit au fil de ses différents cycles, et conduit à la perte de son usage.<sup>16</sup> Naturellement, cette méthode diminue drastiquement les possibilités de réemploi et les gisements de matière. Ainsi, la possession d'information permettant d'accéder à des valeurs réelles sur les qualités et performances des produits permet de sauver une grande quantité de matière et de garantir sa possibilité de réemploi.

---

16. « lorsque le réemploi d'un matériau pour un usage similaire n'est pas possible, il reste la possibilité de dégrader complètement la fonction initiale du produit pour n'en garder que la matière. Cette matière peut ensuite être utilisée à titre décoratif ou pour de l'ameublement. » [37]

---

De cette façon, dans un système leasing le fournisseur gagne à se retrouver des années plus tard avec des tonnes de produits en bois de la même manière que dans le cas de l'aluminium (lequel la condition physique est assurée dans le temps).

En d'autres termes, la fiabilisation de la donnée permet d'assurer les capacités réelles d'un produit et peut donc être utilisée pour accroître la confiance dans celui-ci et favoriser son réemploi. En ce sens, la donnée attribuée au produit a une plus-value conséquente. D'abord, connaître les caractéristiques des éléments en amont de la déconstruction d'un bâtiment permet de déterminer dès lors la qualité de ces derniers et donc leur valeur. Ainsi, le temps que demande la contractualisation de leur mise en location est réduit. Par ailleurs, si un contrat est signé à priori au démontage des produits, le stockage de ces derniers est évité ce qui permet d'économiser en temps, en espace et en capital. De surcroît, sur un marché virtualisé actuel, la valeur des éléments est liée aux informations qui permettent de justifier cette valorisation [32, p.42]. Disposer d'une quantité importante d'information relative aux éléments permet alors d'exposer les caractéristiques et les procédés de fabrication, et ainsi d'en justifier la valeur.

Par ailleurs, dans le cadre d'un contrat de bail pour la façade, le réemploi des éléments se fait de manière rationalisée. C'est-à-dire que leur mise en œuvre pour un ré-usage se fait de façon identique à la mise en œuvre d'un élément neuf. Or celle-ci n'est possible que si l'information est contenue dans ces éléments. En effet, aujourd'hui même lors d'une initiative de réemploi le produit mal informé est donc réutilisé pour d'autres fonctions. Cette méthode de mise en œuvre est d'ailleurs à l'origine d'une connotation culturelle négative associée aux architectures réemployées « approximatives » et « marginales ».

En somme, un matériau qui vieillit lorsque mis en œuvre en façade, puisque exposé aux conditions extérieures et donc perd en valeur une fois arrivé en fin de vie ne pourra aspirer à intégrer un deuxième cycle d'usage dans le cadre d'un contrat de bail que si cette valeur est augmentée. Pour se faire, l'incrustation de l'information relative au produit remet ce dernier au même niveau de caractérisation qu'un élément neuf. Ainsi, sa remise en œuvre correspond aux capacités réelles du produit et n'est plus approximative. Le fournisseur, bailleur a donc tous les avantages d'être propriétaire de produits en bois autant qu'un autre matériau dont l'espérance de vie est plus élevée mais qui n'est pas informé. Il reste à savoir quelle information est essentielle pour arriver à cette fin et comment est-ce qu'on y accède. Les méthodes d'accès à cette information dépendent de la temporalité dans laquelle on se place. Si l'on pense à des moyens de réemploi des éléments du parc bâti actuel alors une seule approche est possible : celle qui consiste à retrouver l'information à partir d'un « diagnostic ressource » [6].

Celui-ci a pour objectif d'identifier, de quantifier, de localiser et de caractériser les produits au potentiel de réemploi présents dans la construction à démolir. Ce diagnostic commence par une vérification des performances d'un produit de seconde vie et de sa corrélation avec des domaines de réemploi possibles. La deuxième étape est la fiabilisation de la filière à déployer et du débouché, c'est-à-dire le projet récepteur. La troisième étape consiste à préparer le cadre administratif et d'assurances qui permettra d'intégrer le réemploi dans le projet récepteur. Quant à la mise en circulation de l'information collectée et formalisée avec les éléments, « des étiquettes produits pour assurer la traçabilité des éléments collectés et leur expertise » [6] sont employées. Celle-ci est la méthode la plus couramment employée par les acteurs du réemploi aujourd'hui étant donné qu'elle ne nécessite que peu d'outils spécialisés.

A contrario, dans le cas où l'on se projette dans une temporalité future où le réemploi serait anticipé, on peut penser des logiques de conservation de cette information à priori et de son affiliation à la matière pour ne pas avoir à déployer des efforts supplémentaires

---

pour sa recherche et sa récupération à posteriori ; soit au moment de la dé-construction du bâtiment. Cette dernière représente par ailleurs une approche plus systémique qui laisse entrevoir la possibilité de la globalisation de ces principes.

Deux typologies d'informations sont nécessaires au reconditionnement d'un produit. D'abord, les informations nominatives sont statiques et sont celles qui caractérisent le composant dans son état tel qu'il a été initialement mis en oeuvre, analogues à celles contenues dans la fiche technique traditionnellement délivrée par les fournisseurs et livrée avec le composant ; le fournisseur, la date de fabrication, la taille et le poids. Ces informations concernent aussi le(s) matériau(x) à partir duquel il est fabriqué, la méthode d'installation et le type de connexion, ainsi que le type de structure dans laquelle il a été déployé. Il peut également inclure des informations sur la capacité résiduelle inférée (c'est-à-dire la manière dont le composant devait se dégrader avec le temps en service) et des informations sur l'historique de réutilisation précédent, le cas échéant.

La deuxième typologie d'information concerne les informations d'historique de service et sont dynamiques. Il s'agit effectivement d'informations qui évoluent en fonction des sollicitations physiques et environnementales que subit le composant au cours de sa durée de vie. Celles-ci relatent les enregistrements successifs des conditions environnementales (température, humidité, exposition chimique, etc.), l'historique de chargement (contraintes, déformations, dommages accidentels) et d'autres informations permettant le calcul des propriétés résiduelles (par exemple, preuve de corrosion). Cette deuxième catégorie d'information permet une confiance beaucoup plus grande dans le produit au moment de l'estimation de son potentiel de réemploi.

Aujourd'hui, ces informations sur les bâtiments existants, la disponibilité des matériaux à réemployer et leurs caractéristiques respectives sont manquantes, incomplètes ou dispersées sans base de donnée unifiée pour un stock de matériaux. En outre, les plans et cahiers des charges qui sont les moyens les plus courants pour la collecte d'information, peuvent présenter des incertitudes voire des fausses données. En effet, l'on constate souvent des décalages entre les prescriptions et ce qui a réellement été exécuté [22, p.151]. Sur ces documents d'exécution, l'architecte indique seulement des instructions qui sont par la suite transmises aux entrepreneurs dont les interprétations peuvent différer lors du chantier. Ces plans contiennent effectivement des détails techniques homogènes théoriques qui ne correspondent plus à leur concrète réalisation. Il devient alors difficile de garantir la fiabilité des données recueillies. Par ailleurs, l'information est récupérée par des diagnostics ressources lesquels reposent sur des documents d'archives qui ne sont pas toujours disponibles. Cette méthode est finalement fastidieuse, longue, et nécessite une grande force de travail [22, p.151]. Ajoutons que celle-ci ne peut définir les caractéristiques intrinsèques des produits que par intrusion, échantillonnage et tests destructifs en laboratoire qui constituent des méthodes irréversibles à l'égard de la matière.

Les outils employés jusque là sont analogues et non résistants au temps. Ces procédés sont donc inefficaces pour assurer que les phases d'usages n'ont pas altéré la valeur des éléments déconstruits. En outre, cette approche documentaire s'apparente à un travail d'historien [22, p.153]. Elle demande en effet des compétences spécifiques et est particulièrement chronophage. Il s'agit alors d'un investissement important pour effectuer un travail dont l'issue est incertaine. De plus, les outils associés au réemploi sont principalement analogues, et dépendent d'une main d'oeuvre nombreuse et qualifiée. « Dans un contexte où les marges bénéficiaires sont faibles, cette approche n'est pas rentable » [22, p.151].

Finalement, les méthodes de récupération de l'information sont essentielles pour déterminer les potentialités de réemploi dans le parc immobilier contemporain, toutefois une information qui est retrouvée et qui est produite à posteriori renforce une approche linéaire

---

puisque celle-ci est réitérée à chaque intervention pour le réemploi alors qu'elle existe à priori. Ces méthodes représentent donc un investissement en temps et en force de travail : charge supplémentaire diminuant l'intérêt pour le fournisseur de posséder des produits issus du parc bâti actuel pour les mettre en location. Ces méthodes ne seraient donc pas viable dans un modèle économique de type leasing.

Par ailleurs, bien que la possession d'information est un facteur essentiel pour augmenter le potentiel de réemploi d'un produit et donc son intégration à une filière leasing, une information qui est retrouvée et qui s'appuie sur une requalification à posteriori des capacités des éléments demeure approximative ce qui continue d'induire la dépréciation d'un certain nombre de caractéristiques réelles des produits. Or la garantie de la qualité ainsi que les informations sur leur dégradation pendant la période d'usage sont justement ce qui permettrait au bois d'accroître sa valeur en fin de vie et d'intégrer ainsi un système leasing. Le potentiel de réemploi des produits est donc augmenté par ces méthodes de récupération de l'information mais pas encore suffisamment pour que ces produits soit compétitifs face aux éléments neufs. Enfin, si les documents fournis ne sont pas des plans « tels que construits » [36, p.150].

Le défi est donc de pouvoir transmettre et suivre l'information dans le temps et de pouvoir même stocker cette information sur les composants eux-mêmes dans une base de données ouverte et objective regroupant l'ensemble de ces informations avant qu'elles ne soient perdues. L'accès à cette base de données contribuerait à la diminution du temps de recherche et des coûts qui lui sont liés. En outre si les informations produites à priori sont celles que l'on conserve, le coût de cette pratique serait négligeable face à la plus-value qu'elle créerait. Ainsi, l'intégration du bois au leasing est plus probable de se faire dans une projection future où son réemploi serait anticipé et l'information sur les produits conservée. Dans cette perspective, le fournisseur, propriétaire de la matière a plus de bénéfices en la mettant en location puisqu'il a la garantie de la possibilité de son réemploi. Ce postulat questionne alors la possibilité de mise en place d'outils pour justement conserver cette fois-ci l'information relative aux produits au préalable de leur mise en oeuvre et durant leur phase d'usage. La problématique de la conservation de la donnée faisant naturellement émerger celle de son stockage, il est important d'identifier par ailleurs le canal de transmission de plus efficace pour la circulation des informations jusqu'aux étapes de démontage des produits de la construction.

Certaines technologies de transmission et de conservation de la donnée plus ou moins établies dans l'industrie de la construction ont été identifiées et représentent une première voie vers cet objectif. La première solution vers la conservation et la pérennisation de l'information consiste à développer l'accessibilité des maquettes numériques BIM.<sup>17</sup> La définition du BIM intègre à la fois un logiciel de gestion et de production de données, un modèle unique total du bâtiment, une plateforme de communication via une norme donnée par les IFC<sup>18</sup>.

L'information que peut contenir le BIM est d'ordre géométrique, spatiale et géographique, et renseigne sur les quantités ainsi que les propriétés des produits du bâtiment. Son format standard IFC (par opposition au format propriétaire : closed BIM) est intéressant

---

17. Le BIM, (Building Information Modeling) : terme anglais désignant maquette numérique du bâtiment, c'est une technologie dont le but est de produire des modèles de construction en permettant aux parties impliquées de communiquer par son biais.

18. "Les IFC sont un format d'échange de données ouvert (non- propriétaire) qui permet d'échanger des données liées à un projet BIM, quels que soient les outils informatiques des divers acteurs. IFC signifie Industry Foundation Classes, et peut se traduire aussi par Information For Construction. Les données fournies via les IFC peuvent porter sur de multiples aspects : site, bâtiment, étages, équipements et fonctionnalités, composants et liens entre eux, produits qui constituent les ouvrages... Ce qui compte c'est que ce format structure, organise et hiérarchise les informations, permettant ainsi de facilement les retrouver"[12]

---

dans cadre d'un modèle leasing en ce qu'il permet l'interopérabilité et la pérennité de ces maquettes [14, p.43].

À priori le BIM semble être adéquat pour la conservation de l'information sur les produits en vue de leur réemploi en regard à la complexité du modèle qu'il fournit : somme des informations produites par les diverses parties prenantes. Toutefois, le BIM reste une maquette dont l'usage s'arrête dès la livraison du bâtiment. Suite à cela, il devient alors un document d'archive dont la conservation à long terme paraît difficile. Or la durée de vie des produits est relative à celle des informations à ces maquettes elles-mêmes. De plus, la question de la fiabilité de l'information se pose. En effet, le BIM est une structure ouverte à une multitude d'acteurs engagés. Si cela permet l'élargissement du spectre de l'information et l'augmentation de sa quantité, cela peut aussi engendrer sa déformation. D'autre part, les décalages entre les plans d'exécution et la mise en oeuvre concrète sont assez courants. Si le modèle n'est pas actualisé en fonction alors l'information contenue prend une valeur négative plus problématique que son absence. Par ailleurs, cette information est relative à l'édifice dans sa globalité et non aux produits qui le composent individuellement puisque le rôle initial du BIM est tourné vers l'édification première du bâtiment ce qui risque de créer une complexité supplémentaire au moment du démontage du bâtiment en vue du réemploi. Cette complexité liée à des informations conservées superflues et redondantes ne correspond pas au niveau de détail nécessaire à la dé-construction des éléments de construction et peut, de plus, générer une augmentation des coûts de stockage. Enfin, l'association entre cette information et le produit auquel elle est relative n'existe pas. En effet, par définition, un modèle BIM représente un serveur géographiquement éloigné de l'édifice. Ainsi, lors de la dé-construction du bâtiment et du déplacement du produit dans un deuxième cycle de vie, le lien entre matière et information est rompu. Le BIM est alors une première solution vers la conservation de la donnée en faveur du réemploi mais reste limitée au premier cycle d'usage du produit.

Face à cette limite du BIM, les codes-barres<sup>19</sup> représentent des chemins d'accès imprimés sur les éléments. En effet, ceux-ci sont positionnés sur le produit directement et collaborent avec une base de données qui contient l'information relative à chaque produit à laquelle on accède par scan. Ainsi, les codes permettent une évolution de la catégorie d'information stockée. Contrairement au BIM qui centralise une donnée relative au bâtiment dans sa globalité, les codes-barres conservent une information individualisée. Cette localisation du chemin d'accès aux données sur le produit permet naturellement l'évolution de l'information contenue durant son cycle d'usage : pendant sa mise en oeuvre et lors de ses entretiens, puisque la complexité d'accès à celle-ci est réduite. Par ailleurs ces outils étant physiquement rattachés aux éléments, l'accès à l'information ne peut jamais être rompu théoriquement quelque soit le nombre de remises en oeuvre que subit ce produit. Cependant, étant donné leur faible capacité de stockage (4 bits), l'incrustation des informations directement sur le produit n'est pas possible ce qui impose l'externalisation de celles-ci vers une base de données. Ainsi, le risque de rupture du lien entre la matière et l'information qui lui est associée demeure à moindre mesure.

D'une part, pour résoudre la problématique du lien entre matière et information et arriver à un système où cette information ne se perd pas même lorsque le produit est déplacé pour ses ré-usages, le canal d'accès à la donnée ainsi que la donnée elle-même devraient être idéalement contenus dans l'élément auquel ils sont relatifs. Ainsi, « si l'information se perd c'est que le composant est lui-même perdu » [22, p.155].

D'autre part la durée des cycles d'usage des produits de la construction demande à ce

---

19. Un code-barres est la représentation d'une donnée numérique ou alphanumérique sous la forme d'un symbole constitué de barres et d'espaces dont l'épaisseur varie en fonction des symboles utilisés et des données ainsi codés [46]

---

que ce canal soit résilient et résistant au temps. Pour se faire, la technologie d'identification par radiofréquence (RFID) est une technologie de capteur sans fil, basée sur la détection de signaux électromagnétiques. Un système RFID typique comprend trois composants : une antenne ou une bobine, un émetteur-récepteur (avec décodeur) et un transpondeur (étiquette RF) programmé électroniquement avec des informations uniques. L'antenne émet des signaux radios pour que l'étiquette soit activée, permettant l'écriture ou la lecture de données [19]. Ce lecteur émetteur RFID, couplé à un PDA (Personal Digital Assistant), permet donc d'extraire les informations inscrites sur les puces directement depuis le site de chantier. De plus, sa capacité de stockage de données est bien supérieure à celle des codes-barres qui ne peuvent être que des chemins d'accès. Au contraire, les puces RFID stockent en elles-mêmes la donnée relative au produit dans lequel elle est incrustée et circule avec les produits tout au long de ses remises en oeuvre. À cette caractéristique s'ajoute celle de la capacité d'édition de cette information de manière instantanée au cours de la durée de vie en service du produit. Ces puces instaurent ainsi un modèle ouvert et participatif. C'est-à-dire que même si les parties engagées sont de différentes filières (maintenance / dé-construction / location...) si une base de donnée collective fiable existe, toutes ces informations sont accessibles au fournisseur propriétaire qui peut mieux garantir la qualité des pièces pour les remettre en location pour un nouveau client.

## 2.5 Conclusion

L'intérêt du réemploi en tant que méthode la plus durable pour la valorisation d'un produit en fin de vie a été largement démontrée dans la littérature. Sa pratique se fait selon deux temporalités faisant chacune émerger des enjeux différents. Le réemploi est soit anticipé et impose de revoir les méthodes de construction initiales du bâtiment en vue de sa dé-construction future. Sinon, il s'intéresse au parc bâti actuel. Dans ce deuxième cas, l'interrogation des méthodes de réemploi de la façade semble être prioritaire en ce qu'elle constitue un gisement important déjà là. En effet un tiers du parc immobilier européen a plus de 50 ans [2]. La façade représente ainsi un important gisement de matière. Les pratiques qui sont liées au réemploi sont quant à elle plus ou moins établies dans le secteur de la construction. Les moyens qui visent à les favoriser sont multiples. Elles sont d'ordre opératoire et économique. En effet, la méthode opératoire ne peut pas résoudre à elle seule les problématiques liées à la massification du réemploi. Pour qu'elles soient généralisées, ces pratiques doivent être soutenues par l'application de modèles économiques circulaires, parmi lesquels : le leasing.

Les fournisseurs qui conservent la propriété de leurs produits sont effectivement fortement incités à en tirer le maximum de valeur lorsque ceux-ci atteignent la fin de leur durée de vie tout en innovant dans des pratiques commerciales et de gestion favorisant une production de haute qualité, basée sur la durabilité et les performances plutôt que sur le coût initial le plus bas. En conservant la propriété d'un produit, le producteur conserve parallèlement la responsabilité de l'ensemble de son cycle de vie obligeant ainsi les producteurs à réfléchir à l'adaptabilité et au reconditionnement qui ne représentent alors plus des complications mais plutôt des incitations à réaliser des gains potentiels. Par conséquent on sort d'un modèle de concurrence et d'obsolescence programmée pour aller vers un modèle plus durable, plus coopératif et plus transparent. En ce sens, dans la théorie, ce modèle représente une voie vers la globalisation des pratiques du réemploi. Toutefois ce dernier reste aujourd'hui assez détaché de la réalité du terrain dans lequel il veut s'implanter. En effet, malgré ses potentiels, ce système est limité lorsqu'on le mesure dans le contexte juridique actuel des sociétés occidentales qui basent la richesse d'un pays sur la propriété immobilière. Ces limites sont notamment dues au droit de propriété qui régit la législation immobilière. S'il s'abstrait des contraintes juridiques, ce système aujourd'hui validé pour la façade en alumi-

---

nium mérite d'être interrogé sur ses possibilités d'application à d'autres matériaux dans une perspective de généralisation des pratiques.

La façade bois, par exemple, a des propriétés physiques largement différentes de celles de l'aluminium et représente alors un cas évident dont il faut questionner les potentiels d'intégration à une filière leasing, au même titre que l'aluminium. Pour qu'un produit se prête à intégrer une filière leasing il faut que dans un premier temps la mise en location des pièces puisse profiter au fournisseur. Cela passe par des produits dont la durée de vie en service est relativement longue ou qui fournissent un service au delà de leur matière propre. Dans un deuxième temps, il faut que ces pièces présentent un fort potentiel de réemploi ; passant par une importante capacité à être démontés facilement. Étant donné que la façade bois ne correspond pas à la définition d'un système intégré puisqu'elle se limite au bardage, deux conditions ont été vérifiées pour valider sa réemployabilité. La première est relative à son indice de réversibilité donné par les typologies de connexion des pièces renseignant sur leur facilité de (dé)montage. La deuxième concerne le matériau et ses propriétés physiques. La mise en place d'une méthode d'évaluation systémique nécessaire à cette analyse démontre que le bois présente un fort indice de réversibilité. Cependant, cette condition n'est pas suffisante et la dégradation propre de la matière dans le cas des produits bois se fait dans un temps comparable à la durée de vie de l'édifice ce qui rend son réemploi moins intéressant que celui de l'aluminium finalement. Néanmoins, il est possible d'émanciper le bois de cette condition afin d'augmenter son potentiel à être intégré dans une telle filière par l'augmentation de sa valeur une fois arrivé en fin de vie via l'incrustation de l'information à ces éléments. La donnée permet d'estimer la qualité réelle du produit au lieu de l'estimer avec des grandes marges qui réduisent la valeur réelle et engendre des déclassements d'usage.

Des éléments en bois accompagnés d'une information sur leur entretien acquièrent, en effet, une durée de vie supérieure, leur conférant ainsi un plus grand potentiel dans un modèle de leasing. Par comparaison, l'information (ou du moins celle sur l'état du produit) pour les éléments en aluminium n'est pas un impératif car ce matériaux par essence ne subit pas de dégradation significative durant sa période d'usage. En effet, après 20 ans de vie en service du bâtiment, les questions principales préliminaires au réemploi des produits ne sont pas relatives à son entretien. Au contraire, pour le bois la première préoccupation dans le cas des composants de façade naturellement exposés aux variables climatiques est de savoir s'il a fissuré, s'il a été bien entretenu, s'il a pris trop de soleil, s'il a pris trop d'humidité, s'il contient des moisissures et de quantifier cette usure. L'intérêt de posséder l'information dans ce cas de figure est de permettre aux repreneurs de prendre des décisions basées sur des données réelles plutôt que des données estimées depuis des statistiques génériques.

Par exemple, si toutes les informations précédemment mentionnées sont manquantes alors un entrepreneur n'investirait jamais dans une quantité de produits en bois qui auraient passé 30 ans sur une façade puisque d'après les chiffres, seulement un faible taux serait récupérable. En contre partie, si cette même quantité de produits en bois qui a passé 30 ans en façade est équipée d'une information attestant de leur entretien systématique et relatant des détériorations respectives à chaque composant et des pièces changées au fil des années de service, alors le entrepreneur est plus susceptible d'investir dans ce stock.

Quid de l'application de cette méthode à encore d'autres matériaux dans l'optique d'étendre la pratique du réemploi à un champ maximal du parc bâti ?



# Bibliographie

- [1] ADEME : Nos expertises, économie circulaire. <https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire>, 2021.
- [2] Azcarate Juan AGUERRE et Klein TILLMANN : Façade leasing pilot project at tu delft. <https://www.tudelft.nl/bk/onderzoek/projecten/green-building-innovation/facade-leasing/facade-leasing-pilot-project-at-tu-delft>, 2018.
- [3] Renata ANDROSEVIC, Elma DURMISEVIC et Maurizio BROCATO : Measuring reuse potential and waste creation of wooden façades. *IOP Publishing Ltd*, 2019.
- [4] J. F. AZCARATE-AGUERRE : *Façades as a Product-Service System : The potential of new business-to-client relations in the facade industry*. Thèse de doctorat, TU Delft, 2014. URL <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A0aca38e7-81ae-4ca7-9b1f-ffc0f2e33fc>.
- [5] Juan AZCARATE AGUERRE, Tillmann KLEIN, Alexandra den HEIJER, Ruben VRIJHOEF, Hendrik PLOEGER et Matthijs PRINS : Façade Leasing : Drivers and barriers to the delivery of integrated Façades-as-a-Service. *Real Estate Research Quarterly*, 2018.
- [6] BELLASTOCK : Repar #2. *Bellastock*, 2018. URL <https://www.bellastock.com/projets/repair-2/>.
- [7] BELLASTOCK : Actlab. <https://www.bellastock.com/projets/actlab/>, 2019.
- [8] J. BENOIT, M. BILLET, F. BOUGRAIN, G. SAUREL, LAURENCEAU, ADEME, BELLASTOCK et CSTB : Repar 2 : Le réemploi passerelle entre architecture et industrie. Rapport technique, Bellastock, 2019.
- [9] Jean-Claude BIGNON : *Le bardage en bois : architecture d'un produit*. CAUE du Nord, 1984.
- [10] Stewart BRAND : *How Buildings Learn : What Happens After They're Built*. Penguin Books, 1995.
- [11] Michael BRAUNGART et William MCDONOUGH : *Cradle to cradle. Remaking the way we make things*. Waterproof Durabook, 2002.
- [12] BUILDINGSMART : Qu'est-ce que le format ifc? *Mediaconstruct*, 2019. URL <https://buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/comprendre-format-ifc/>.
- [13] CAPITAL : Capital - actualités économiques, bourse & finance. <https://www.capital.fr/votre-argent/valeur-residuelle>, 2021.
- [14] Olivier CELNIK et Eric LEBÈGUE : *BIM et maquette numérique*. Eyrolles, librairie eyrolles édition, 2015. URL <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/bim-et-maquette-numerique-9782212142747/>.

- 
- [15] Samuel COPELAND et Melissa BILEC : Building as material banks using rfid and building information modeling in a circular economy. *Procedia CIRP*, 90(143-147), 2020.
- [16] Omer DENIZ et Ebru DOAGN : Building façade system for deconstruction. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 8, 2014.
- [17] Elma DURMIŠEVIC´ : *Designing for the Circular Economy*, chapitre Reversible building design, page 16. Taylor & Francis Group, 2018. URL <https://www.taylorfrancis.com/books/9781351623919/chapters/10.4324/978135113067-32>.
- [18] EMMAUS, CSTB et CSFE : Requalification & réemploi / réutilisation de composants de construction. Rapport technique, Conseil Régional Ile-de-France, 2017.
- [19] Perry FORSYTHE et Brad CAREY : Application of rfid in the prefabricated timber industry. In Marsha LAMB, éditeur : *AUBEA 2017 : Australasian Universities Building Education Association Conference 2017*, volume 1, pages 271–278, 2017. URL <https://easychair.org/publications/paper/h1Kx>.
- [20] The Ellen McArthur FOUNDATION : Towards the circular economy : Economic and business rationale for an accelerated transition. <https://www.greengrowthknowledge.org/research/towards-circular-economy-economic>, 2012.
- [21] Fédération française du BÂTIMENT : Déchets du bâtiment : savoir de quoi on parle. <https://www.dechets-chantier.ffbatiment.fr/>, 2019. URL <https://www.dechets-chantier.ffbatiment.fr/>.
- [22] Michaël GHYOOT, Lionel DEVLIEGER, Lionel BILLIET et André WARNIER : *Déconstruction et réemploi - Comment faire circuler les éléments de construction*. EPFL Press, presses polytechniques et universitaires romandes édition, 2018.
- [23] Orio GIARINI et Walter STAHEL : *The Limits to Certainty. Facing Risks in the New Service Economy*. Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [24] Mark GORGOLEWSKI : *Resource salvation, the architecture of reuse*. Wiley Blackwell, 2018.
- [25] Thomas HERZOG, Julius NATTERER, Roland SCHWEIZER, Michael VOLZ et Wolfgang WINTER : *Timber Construction Manual*. DETAIL, detail édition, 2003.
- [26] Eleni IACOVIDOU, Phil PURNELL et Ming K. LIM : The use of smart technologies in enabling construction components reuse : A viable method or a problem creating solution ? *Journal of Environmental Management*, 2018.
- [27] Tillmann KLEIN : *Integral Façade Construction*. A+BE - Architecture and the Built Environment, 2017. URL <https://books.bk.tudelft.nl/press/catalog/book/isbn.9789461861610>.
- [28] Josef KOLB : *Bois : Systèmes constructifs*. PPUR, 2012.
- [29] LÉGIFRANCE : Directive 2008/98/ce du parlement européen et du conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, art. 3. france. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000019818802>, 2008.
- [30] LÉGIFRANCE : Ordonnance n 2010-1579 du 17 décembre 2010 portant diverses dispositions d'adaptation au droit de l'Union européenne dans le domaine des déchets, art. 2. france. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000023246129/>, 2010.

- 
- [31] LÉGIFRANCE : Article r111-44 - code de la construction et de l'habitation. [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000024100516/2011-06-02](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000024100516/2011-06-02), 2011.
- [32] Thibault LÉNART : *Matière et information. Assurer la continuité des informations relatives aux éléments constructifs en vue du réemploi*. Thèse de doctorat, ENSAPM, Paris, 2019.
- [33] Javier Jair MONTEMAYOR LEOS : *Façade reverse logistics. Achieving circularity by application of reverse logistics strategies for curtain walls & window facade construction*. Thèse de doctorat, TU Delft, Delft, 2020.
- [34] Timothy O'RIORDAN : *Environmentalism*. Pion Ltd, 1981.
- [35] H. D. PLOEGER, M. PRINS, A. STRAUB et R. van den BRINK : Circular economy and real estate : alternatives for operational lease. *Proceedings of the International Research Conference 2017*, 2017. URL <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A7890a2e2-e326-4b93-9643-75a7748074b9>.
- [36] Paola SASSI : *Strategies for Sustainable Architecture*. Taylor & Francis, 2006.
- [37] SOPHIE : Le déclassé d'usage d'un matériau pour faciliter son réemploi. <https://www.bobi-reemploi.fr/2020/11/18/>, 2020.
- [38] Walter STAHEL : Product life as a variable : the notion of utilization. *Science and Public Policy*, 13:185–193, 1986.
- [39] Walter STAHEL : *The Performance Economy*. Springer, 2010.
- [40] EU-SILC survey. Eurostat-dta EXPLORER : Distribution of population by tenure status, type of household and income group. [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ilc\\_lvho02&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ilc_lvho02&lang=en), 2011.
- [41] Klein TILLMANN, Azcarate Juan AGUERRE et Alexandra DEN HEIJER : An approach to circular building renovation using product-service concepts. *Open Journal Systems*, 2018.
- [42] Ursula TISCHNER, M. VERKUIJL et Arnold TUKKER : Product service systems : Best practice document. *ResearchGate*, 2002.
- [43] Patrick VAN DEN ABEELE : Transitioning to a functional economy. *Bruxelles environnement*, 2014.
- [44] Johan VAN NIEL : *L'économie de fonctionnalité*. Thèse de doctorat, Université de Lausanne, 2007.
- [45] Johann WEBER, Theodor HUGUES et Ludwig STEIGER : *Timber Construction : Details, Products, Case Studies*. Birkhäuser Architecture, détail édition, 2000.
- [46] WIKIPÉDIA : Code-barres. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Code-barres&oldid=186350525>, 2021.



# Des procédures opérationnelles pour faciliter la déconstruction sélective et augmenter le potentiel de réemploi des structures porteuses

**Helin Kahraman**<sup>1</sup>

*Le secteur de la construction est l'un des principaux contributeurs de l'épuisement des ressources mondiales ainsi que de la production de déchets, notamment à cause de l'absence de prise en compte du réemploi des matériaux lors de la phase de construction et de démolition. Ces impacts risquent d'augmenter parce qu'une partie significative du bâti existant va être démolie prématurément et que de nouveaux bâtiments vont être construits à leur place, à cause de ses obsolescences fonctionnelles, sociales et économiques. Afin de faire face à cette problématique, en assurant le réemploi des éléments du parc du bâti existant, plusieurs recherches ont été conduites et des lois ont été votées en France. Cependant, ces avancées n'ont pas permis que l'ensemble des éléments des bâtiments soient effectivement réemployés et notamment les structures porteuses. Ces dernières sont connues pour avoir un faible potentiel de réemploi alors qu'elles sont encore aptes à remplir leurs fonctions et qu'elles sont responsables d'une grande part de l'impact environnemental des bâtiments. Malgré l'existence de nombreuses barrières économiques, sociales, réglementaires et techniques, cet article ne va se concentrer que sur les barrières techniques qui limitent le potentiel de réemploi de ces structures. Dans la mesure où le potentiel de réemploi est directement lié à la facilité de récupération, nous avons émis l'hypothèse que si l'on développe des procédures opérationnelles, qui aident autant les acteurs à récolter les informations nécessaires qu'à préparer leur propre directive de déconstruction sélective, nous pouvons faciliter la récupération des structures porteuses et augmenter leur potentiel de réemploi. Afin de vérifier la pertinence de cette hypothèse, et à la suite de l'étude documentaire, un cas d'étude mettant en œuvre les directives opérationnelles proposées par cet article a été réalisé sur le bâtiment Lenoir de l'ENSAPM qui va être démoli en juillet 2022.*

*Mots-clés : potentiel de réemploi ; déconstruction sélective ; structures porteuses ; procédure opérationnelle ; digitalisation*

---

1. Helin Kahraman, née à Ankara en 1998. Après une licence en architecture à l'ENSA Paris Malaquais, elle a intégré le département Digital Matters dans le cadre de son Master à l'ENSA Paris Malaquais. Actuellement étudiante en Master 2, elle prépare son PFE et effectue, en même temps, son stage de fin d'étude dans l'Atelier Jean Nouvel.

---

## 3.1 Introduction

En France, le secteur du bâtiment et travaux publics (BTP) est le plus grand producteur de déchets. Le BTP produit environ 247 millions de tonnes de déchets chaque année, ce qui représente deux tiers de la production nationale<sup>2</sup>. Selon une récente étude des Nations Unies, ces chiffres devraient connaître une hausse d'ici 2050 en raison de l'augmentation de la population urbaine. L'étude mentionnée estime que les deux tiers de la population mondiale vivront dans une région urbaine<sup>3</sup>. En conséquence, la valeur des terrains va augmenter dans les villes, tout en exerçant une pression économique et fonctionnelle sur les bâtiments existants ce qui va augmenter leur risque d'obsolescence. Cette obsolescence va certainement conduire à la démolition prématurée de plus en plus de bâtiments, afin de construire, à leur place, de nouveaux bâtiments<sup>4</sup>. Ainsi, la quantité de ressources utilisée pour des nouvelles constructions, aussi bien que la quantité de déchets produits dans les sites de démolition augmenteront de manière significative.

La recherche effectuée par Hannah Höfte, ancienne étudiante d'ENSA Paris-Malaquais, illustre parfaitement ces éventuelles démolitions prématurées avec l'exploration d'un cas actuel. Elle nous montre comment l'augmentation de la densité d'habitation dans une ville des Yvelines, a été provoquée par la construction d'une gare du Grand Paris. Ainsi des phénomènes de rentabilisation des surfaces à travers la démolition du parc bâti existant ont pu être observés [34].

Afin de prévenir la production de déchet liés aux démolitions prématurées causées par une telle obsolescence, plusieurs recherches ont été menées. Par exemple, les projets pilotes de Buildings as Material Banks (BAMB), qui font partie du projet Horizon 2020 créé par l'Union Européenne. À travers des recherches documentaires aussi bien que des projets pilotes, BAMB explore ce qu'on appelle les « Reversible Buildings » [23]. La recherche se porte donc sur le développement des protocoles de conception de nouveaux édifices à la fois structurellement et fonctionnellement flexibles et facilement transformables afin d'empêcher une éventuelle production de déchets.

Cependant, il faut souligner que seulement 1 à 2% de nouveaux bâtiments sont ajoutés au bâti actuel chaque année<sup>5</sup>. Ainsi, un grand nombre des bâtiments qui vont faire face à cette obsolescence dans les 50 prochaines années, et qui vont donc être démolis prématurément tout en produisant des déchets, sont des bâtiments qui ont déjà été construits. Par conséquent, il est plus qu'urgent de penser aux moyens qui permettraient de récupérer les composants du parc bâti existant afin de les revaloriser en tant que ressource dans la construction des bâtiments de demain. Pour ce faire, la France a adopté une nouvelle loi relative à la transition énergétique qui impose la revalorisation de 85% des déchets du BTP d'ici 2031<sup>6</sup>. Cette loi est cruciale pour réduire l'incidence considérable du BTP sur l'épuisement des ressources et l'accumulation des déchets au niveau national.

Dans le contexte actuel, il existe quatre méthodes qui permettent la revalorisation des déchets du BTP en tant que ressources de demain. Ces dernières sont : le réemploi, la réutilisation, le recyclage et l'upcycling [15]. Parmi ces méthodes, seul le réemploi maintient la

---

2. "Reuse of Building Element", FCRBE - Facilitating the circulation of reclaimed building elements in Northwestern Europe, accessed January 24, 2021, <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/>

3. "Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable," United Nations, accessed January 24, 2021, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-11/>

4. La démolition prématurée est le fait de démolir des bâtiments avant la fin de vie prévue, en d'autres termes, lorsqu'ils sont encore techniquement et structurellement performant.

5. Heurkens Erwin, "Managing Building Adaptation," (Notes de cours, TU Delft)

6. "Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire », Légifrance, accessed January 24, 2021, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041553759/>

valeur initiale des éléments en même niveau lorsqu'ils seront réutilisés. Car, seul le réemploi des éléments permet de préserver la quasi-totalité de l'énergie, de la main-d'œuvre et des matériaux incorporés, tout en offrant un large choix d'usage lorsque les éléments récupérés seront réutilisés.

Pour toutes ces raisons, il est désormais primordial d'assurer et maximiser le réemploi des éléments du parc bâti existant. Cependant, cet objectif que nous devons nous fixer est encore loin d'être atteint. Car, plusieurs éléments des bâtiments ne sont pas encore récupérés afin d'être réemployés et ils finissent donc par devenir des « déchets » même dans les chantiers de déconstruction sélective<sup>7</sup>. Compte tenu de ce fait, la réalisation de notre objectif de réemployer la totalité des éléments des bâtiments existants consiste tout d'abord à augmenter le potentiel du réemploi de ces éléments hautement dépréciés et abandonnés pour être démolis.

En vue d'augmenter le potentiel du réemploi de ces éléments, il faut dans un premier lieu les identifier. En se basant sur les observations des chantiers de déconstruction sélective au sein des entreprises de déconstruction telle que Rotor et Dussel, on obtient le diagramme ci-dessous. Ainsi, il montre bien que l'élément ayant le plus faible potentiel est la partie structurelle, notamment les structures porteuses du bâtiment. (Cf. Figure 3.1)

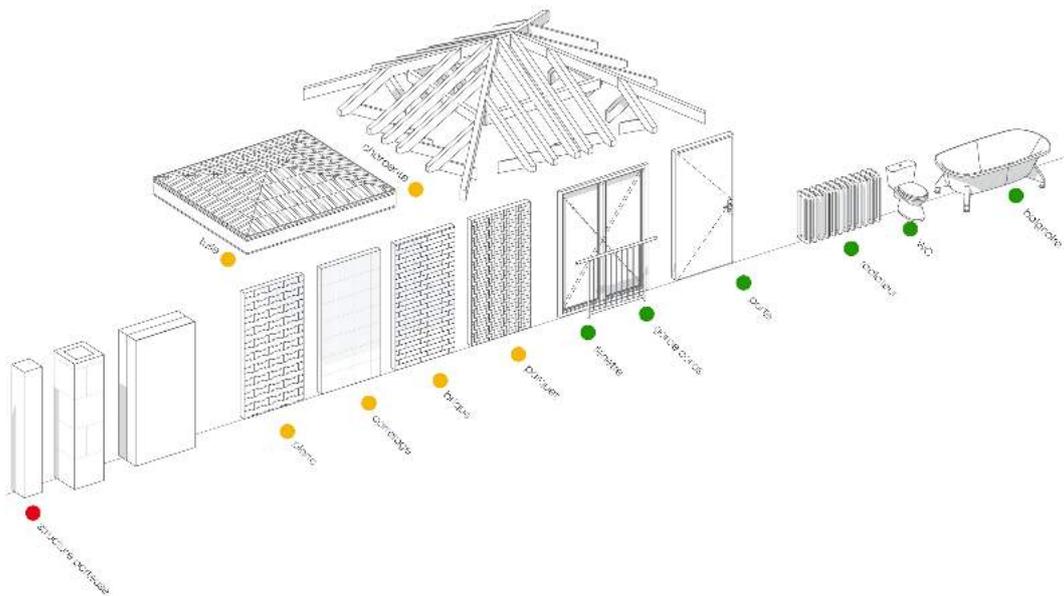


FIGURE 3.1 – Les composants d'un bâtiment, classés selon leur potentiel du réemploi. Rouge : potentiel faible, jaune : potentiel moyen, vert : potentiel élevé

Actuellement, il existe deux scénarios de fin de vie pour ces éléments qui assureraient les fonctions structurelles [28]. Soit nous les recyclons afin qu'ils puissent être utilisés comme matériau de remplissage pour les remblais ou de sous-couche pour les fondations des nouveaux bâtiments. Soit nous les déposons dans les sites d'enfouissement. Cependant, ces deux méthodes permettent juste de gaspiller un élément qui possède en fait une qualité significative qui peut être réemployée.

En effet, la durée de vie des éléments structurels est plus longue que la plupart des bâtiments. Cela veut dire qu'ils sont démolis prématurément même des années avant leur fin de vie prévue, alors qu'ils ont toujours leurs qualités techniques et fonctionnelles. La recherche

7. Dans le contexte actuel, pour qu'un élément d'un édifice existant puisse être réemployé, il faut d'abord le récupérer de cette édifice, de façon de conserver son intégrité. Cette procédure de récupération de manière plus soignée est appelée donc « La déconstruction sélective »

---

menée par Jan Brutting, doctorant au sein de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, montre clairement que 86% des bâtiments démolis étudiés, possédaient encore des structures bien fonctionnelles. Ainsi, leur démolition était due à l'obsolescence fonctionnelle et non pas aux dommages structurels [11].

La structure est responsable d'une part importante de l'impact environnemental des bâtiments. Donc, si la production et la démolition d'éléments structurels peuvent être réduites au minimum, en réemployant les structures dans de nouvelles constructions, l'impact en termes de  $CO_2$  sera considérablement réduit.

Ainsi, l'objectif principal de cet article est de développer des moyens pour augmenter le potentiel du réemploi de la structure porteuse des bâtiments existants. Pour ce faire, il est essentiel de tout d'abord questionner de quoi dépend le potentiel de réemploi d'un élément, quelles sont les barrières qui limitent ce potentiel et comment l'augmenter ?

L'étude menée par Elma Durmisevic et Pieter Beurskens donne des pistes pour expliquer pourquoi certains éléments ne sont pas réemployés [6]. En effet, l'étude montre qu'il existe trois indices pour évaluer le potentiel du réemploi d'un élément. Ces indices sont donc, dans l'ordre d'importance :

- la facilité de récupération ;
- la facilité de ré-application des éléments récupérés dans de nouveaux contextes ;
- la facilité de ré-manufacture des éléments récupérés.

Parmi ces indices indiqués auparavant, l'article se concentre sur le premier indice car il conditionne l'existence des deux autres. En effet, si l'élément n'est pas récupéré il est impossible d'évaluer sa facilité de réplication et de manufacture.

Afin d'assurer et de faciliter la récupération, il faut identifier les barrières actuelles qui pénalisent la récupération des éléments structurels. Selon l'état de l'art des recherches effectuées sur le réemploi des structures porteuses<sup>8</sup>, les barrières techniques qui nous empêchent d'envisager la déconstruction des structures porteuses et donc qui complexifie leur récupération sont :

- le manque d'information relative aux éléments structurels ;
- le manque de directives qui soutiennent et qui guident la déconstruction sélective afin de récupérer des éléments structurels.

Cela veut dire que comme on n'acquiert aucune information concernant la partie structurelle, on est incapable d'envisager une éventuelle déconstruction de cet élément et donc, on est incapable d'élaborer des directives qui aident les acteurs pour conduire la déconstruction sélective. Ainsi, cela complexifie la récupération et diminue donc en conséquence, le potentiel de réemploi des structures porteuses.

L'hypothèse de cette article est de développer une procédure opérationnelle, qui aide les acteurs à récolter les informations nécessaires et qui aide également à la préparation de leur propre directive de déconstruction, afin faciliter la déconstruction sélective des structures, et ainsi augmenter leur potentiel de réemploi. Nous supposons également que la digitalisation et l'intégration des outils technologiques pourront simplifier la mise en œuvre de ces procédures opérationnelles développées. Dans le but de vérifier la pertinence de ces hypothèses, deux procédures opérationnelles, une pour la récolte d'informations et une autre pour la préparation des directives de déconstruction ont été développées à travers une recherche

---

8. Dans le secteur privé, des agences d'architecture danoises, Effekt et 3XN, ont collaboré avec des bureaux d'études et des ingénieurs afin de développer un projet de recherche intitulé Ressource Blokken. Leur projet vise, tout d'abord à récupérer puis à réemployer des structures en béton préfabriqué venant des logements sociaux des années 1970, qui allaient être démolis d'ici 2030. Du côté académique, l'équipe dirigée par Olivier Tessmann, au sein de l'Université Technique de Darmstadt, a travaillé sur le développement de stratégies pour la récupération des structures porteuses en béton.

---

documentaire et ensuite ont été testé sur le bâtiment Lenoir de l'ENSAPM.

## **3.2 Méthodologie**

### **3.2.1 Procédures opérationnelles pour la récupération d'informations utiles à faciliter la déconstruction des structures porteuses**

Nous avons, dans un premier temps, fait une recherche documentaire qui nous a permis d'identifier la méthode actuelle de récolte d'informations, les informations utiles pour faciliter la récupération des structures porteuses et les outils numériques qui pourraient simplifier cette récolte d'informations. Une fois la recherche documentaire terminée et à partir de ses nouvelles informations, nous avons proposé une procédure opérationnelle qui permettra à la personne qui la suit de récolter, facilement, les informations nécessaires pour envisager la déconstruction des structures porteuses des bâtiments existants. Ensuite, la procédure opérationnelle a été appliquée et testée lors d'un cas d'étude sur le bâtiment Lenoir qui va prochainement être démolé.

#### **La méthode actuelle de la récolte des informations**

Dans le contexte actuel, l'acquisition de l'information se fait dans un premier temps hors site, et ensuite sur site [3]. L'acquisition de l'information hors site consiste à consulter les archives de l'architecte ou les archives municipales, consulter les anciens magazines afin de trouver des plans, des coupes et, si elles existent, des modélisations numériques de l'édifice concerné.

En effet, parmi ces derniers, seul les modélisations numériques, notamment des modèles Building Information Modeling (BIM), nous permette d'obtenir des informations mises à jour à propos du bâtiment. Cependant, comme la plupart des bâtiments existants qui vont être démolis d'ici 2050, sont des bâtiments construits avant la généralisation de la pratique du BIM et donc on ne dispose pas de « jumeau » numérique pour eux. Pour cette raison, le seul moyen d'acquérir, hors site, l'information relative aux bâtiments existants c'est de consulter les anciens plans. Ainsi, ces derniers, au contraire des modèles BIM, ne contiennent pas d'information actuelle et fiable dans la mesure afin de guider la déconstruction<sup>9</sup>. C'est la raison pour laquelle, pour un grand nombre de bâtiment existant, l'acquisition de l'information est faite sur le site. Cela veut dire qu'un groupe de professionnels se rend dans le bâtiment, en amont la déconstruction, afin d'effectuer un travail d'inventaire et d'acquisition d'informations relatives aux éléments du bâtiment concerné.

Actuellement, ce diagnostic est généralement fait manuellement, en prenant des mesures et des photos. Cela signifie que les éléments qui ne sont pas visibles à l'œil nu (la structure) ne sont généralement pas pris en compte lors de ce processus primaire en vue de la déconstruction sélective. Concernant ce fait, de nombreuses solutions high-tech qui digitalisent et parfois même automatisent ce processus afin d'intégrer plus d'éléments et d'augmenter la vitesse du processus ont été développées. Ainsi, cette digitalisation peut éventuellement faciliter l'obtention d'informations sur les éléments structurels.

Afin d'évaluer cette hypothèse, dans les parties suivantes, nous allons étudier en détails les nouveaux outils technologiques et leur potentiel pour la simplification du processus d'acquisition d'informations nécessaires pour faciliter la déconstruction sélective des structures porteuses des bâtiments existants.

---

9. Ibid

---

## **Les informations utiles à faciliter la récupération des structures porteuses ?**

Dans le but de développer des procédures opérationnelles pour la récolte d'information. Il faut tout d'abord identifier les informations nécessaires à acquérir. Cela signifie donc, les informations dont on a besoin pour envisager la déconstruction et récupérer les structures porteuses. À travers une recherche documentaire, elles ont pu être identifiées comme listées ci-dessous :

- l'Information concernant la localisation ;
- l'Information concernant sa composition géométrique ;
- l'Information concernant ses caractéristiques ;
- l'Information concernant son assemblage.

## **Les outils numériques qui simplifient la récolte des informations utiles à faciliter la récupération des structures porteuses**

Pour les bâtiments existants qui ne disposent pas des « jumeaux » numériques, contenant toutes les informations nécessaires, il faut tout d'abord effectuer des relevés. Nous étudierons, en détail, les relevés numériques qui permettent de récolter simplement et rapidement les informations identifiées ci-dessus. Les outils qui permettent de faire des relevés numériques sont les suivants :

### **Scanners 3D**

Cet outil permet de simplifier considérablement le travail de relevé, qui est une étape nécessaire dans le but de récupérer les informations concernant la localisation, la composition géométrique, les caractéristiques et l'assemblage des structures porteuses.

En effet, les scanners 3D nous permettent d'effectuer un relevé numérique tridimensionnel d'un élément avec une grande précision. En outre, les données de ce relevé numérique peuvent être traduites en nuages de point transformables en un modèle BIM grâce à l'aide des logiciels tels que Autodesk ReCap. Ce processus automatisé de conversion d'un objet scanné en un modèle BIM est baptisé sous le nom de « Scan to CAD » et il permet de diminuer, de manière significative, le temps et le travail humain.

Dans le contexte actuel, il existe deux types de scanners 3D. Selon la condition de la structure à scanner, on peut choisir soit un scanner mobile, soit un scanner fixe. Mais les deux fonctionnent de la même manière : ils projettent un faisceau lumineux et disposent de caméras sur le côté pour déterminer comment chacun de ces faisceaux lumineux s'est déplacé dans l'image.

Cependant, cet outil coûte plus cher comparé à une autre méthode que l'on appelle la « photogrammétrie » et qui permet également d'effectuer des relevés numériques. C'est la raison pour laquelle, selon le budget de l'opération, le choix d'outil peut varier.

De plus, une autre contrainte des scanners 3D est que la possibilité d'effectuer le relevé d'une structure dépend fortement des dimensions du scanner 3D que l'on possède. Cette problématique n'existe pas pour la photogrammétrie.

### **La photogrammétrie**

La photogrammétrie, permet de mesurer et donc d'effectuer des relevés numériques tridimensionnelles à partir de photos. Elle facilite la récupération d'informations concernant la localisation, la composition géométrique, la caractéristique et les assemblages des structures porteuses. L'un des avantages de la photogrammétrie est que l'on peut utiliser n'importe quel outil pour prendre des photos. Cela permet à la photogrammétrie de proposer plus de liberté d'utilisation par rapport à celle offerte par des scanners 3D.

---

Actuellement, il existe trois méthodes pour prendre des photos d'éléments structurels. Selon la caractéristique de l'élément à scanner et le budget, on peut choisir de prendre des photos soit avec la caméra de son téléphone portable, soit avec des drones, soit avec des robots. Parmi ces trois choix, la caméra du téléphone portable est utilisée le plus souvent pour les projets avec un budget limité et les drones sont utilisés pour scanner les structures moins accessibles du bâtiment.

Quelques soit la méthode utilisée, le fonctionnement de la photogrammétrie reste le même. Elle utilise la parallaxe<sup>10</sup> obtenue entre plusieurs images superposées prises à partir de points de vue différents. Elle fonctionne en extrayant les informations géométriques d'une image 2D, telles que la forme, le volume et la profondeur d'un objet. Un logiciel de photogrammétrie peut ensuite aligner, texturer et mailler plusieurs images pour créer un modèle 3D qui est aussi transmutable en un modèle BIM.

### **Les algorithmes de reconnaissance**

Les algorithmes de reconnaissance sont les seuls moyens existants qui automatisent le processus de classification et de localisation des éléments structurels. Ces algorithmes sont utilisés pour compléter les modèles obtenus à partir d'un relevé numérique, notamment la photogrammétrie ou scanner 3D. En effet, si on a un modèle BIM de notre bâtiment, ces algorithmes ne vont pas servir à grand-chose, car les informations concernant la localisation et la classification des éléments seront déjà intégrées dans le BIM.

Cependant, dans les cas des modèles qui ne sont pas nécessairement des modèles BIM, il existe deux options pour intégrer l'information concernant la localisation et la classification des éléments structurels. Soit dans un premier temps, on convertit notre modèle en un modèle BIM et on intègre les informations concernant les caractéristiques des éléments manuellement. Soit, on utilise des algorithmes de reconnaissance, qui classifient et localisent les éléments automatiquement à partir des photos.

### **Le transfert des informations récoltées en un modèle BIM inversé**

BIM est un outil numérique qui permet de modéliser et échanger les informations relatives à un bâtiment entre les différents acteurs de construction en temps réel. Même si les informations que le BIM contient sur les éléments d'un bâtiment sont généralement utilisées pour les construire, on peut, en intégrant des informations supplémentaires, envisager la déconstruction de ces éléments. Donc, le BIM peut ainsi aider à déconstruire les éléments constructifs d'un bâtiment.

Dans ce type de scénario, où le BIM est utilisé pour déconstruire et non pour construire les éléments d'un bâtiment, est appelé un BIM inversé. Dans le contexte actuel, il existe plusieurs recherches sur le développement de ce BIM inversé.

L'un des pionniers de cette pratique dite « inversée », est le Deconstruction Recovery Information Modeling (DRIM) [3] qui se développe depuis 2016, et qui a inspiré beaucoup d'autres approches tel que BatiRIM [30] (Ressource Information Modeling) de SUEZ ou notamment Digital Disassembly Platform<sup>11</sup> d'Elma Durmisevic. Dans ce développement, il faut signaler le changement des termes utilisés pour baptiser ces outils. Nous voyons une transition de « Building Information Modeling » vers « Ressource Information Modeling ». Cela signifie bien que l'on considère le bâti existant comme une ressource du demain. Concernant ces faits, il est indéniable que cet outil inversé joue un rôle primordial dans le rassemblement de toutes les informations nécessaires pour visualiser et planifier

---

10. Selon la définition du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, la parallaxe est : “ différences de cadrage entre l'image visée et l'image enregistrée.”

11. Elma Durmisevic, rencontre sur zoom, 4 Février 2021

la procédure de démontage. Cependant, comme les bâtiments existants ne disposent pas généralement de modèle BIM avec des informations mises à jour, il est essentiel de recueillir les informations utiles pour envisager la déconstruction, en utilisant les outils présentés auparavant, pour ensuite créer le « jumeau » numérique de notre bâtiment.

### Procédure opérationnelle proposée pour la récolte d'informations utiles à faciliter la récupération des structures porteuses

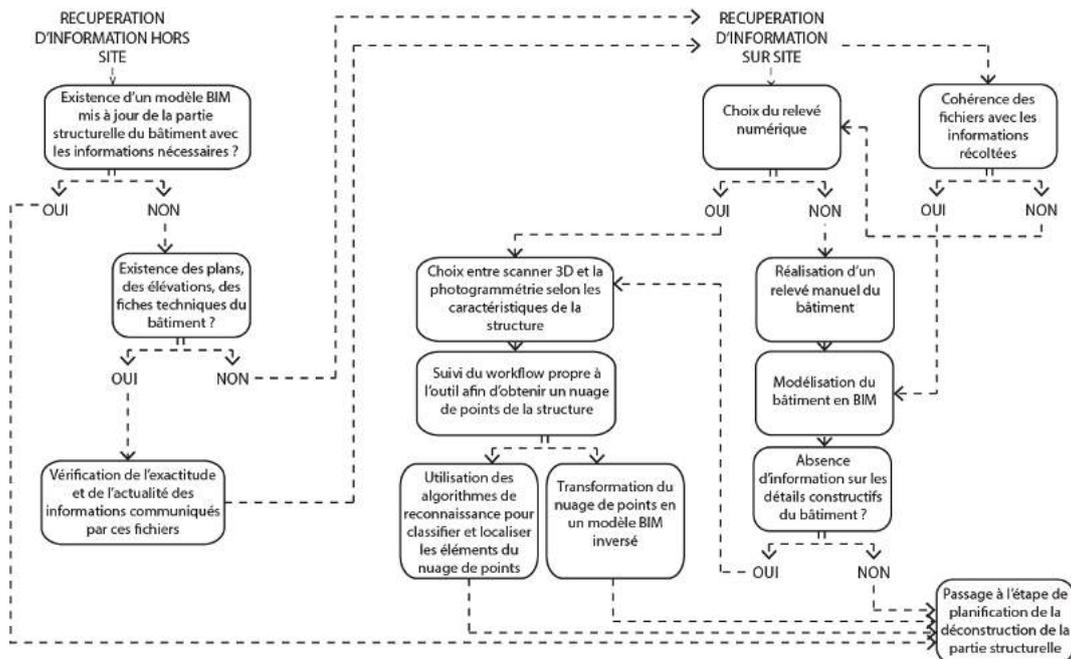


FIGURE 3.2 – Procédure opérationnelle pour la récupération d'information dont on a besoin afin d'envisager la déconstruction et la récupération des structures porteuses

La recherche effectuée sur les informations nécessaires à acquérir, aussi bien que les outils qui nous permettent de faciliter la récolte et le rassemblement de ces informations, a mené à la proposition d'une procédure opérationnelle. (Cf. Figure 3.2)

#### Cas d'étude : le bâtiment Lenoir

Le bâtiment Lenoir, conçu par l'Agence Nicolas Michelin et Associés (ANMA), a été implanté sur le site de l'École Nationale Supérieure des Beaux-Arts de Paris en 2001 afin d'accueillir des salles de cours et de documentation pour l'École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais (ENSAPM). Il est composé de la juxtaposition et la superposition de 48 modules préfabriqués avec une structure en acier galvanisé (24 modules de 6m x 2,5m et 24 modules de 9m x 2,5m).

En 2019, François-Henri Pinault, propriétaire d'un hôtel particulier qui fait face au bâtiment Lenoir, a demandé sa démolition. Cela a donné lieu à une décision du conseil d'État actant la démolition du bâtiment Lenoir pour 2022.

Cette situation illustre parfaitement, la problématique évoquée lors de la première partie : les démolitions prématurées des structures porteuses à cause de l'obsolescence fonctionnelle et non pas à cause des dommages structurels. La démolition de Lenoir n'est pas

liée à un dommage structurel, on prend la décision de les démolir alors qu'ils sont encore performants.

En effet, les structures en acier galvanisé de Lenoir, ont une durée de vie estimée d'environ 180 ans. Car, le traitement dit par « galvanisation » protège le matériau contre la corrosion et augmente considérablement la durée de vie d'une structure métallique. Cela est donc paradoxal car on augmente la durée de vie d'une structure jusqu'à 180 ans juste pour la démolir après 20 ans d'utilisation. Ainsi, on gâche une grande nombre l'énergie incorporée aussi bien que du matériel qui auraient été fonctionnel 160 ans en plus.

## Expérimentations et résultats du cas d'étude

### La récolte d'information hors site

Pour ce cas d'étude, les étapes proposées par la procédure opérationnelle ont été suivies. Dans un premier temps, la récolte d'information hors site, a été lancée. Après l'obtention des plans et des élévations du Lenoir, la récolte d'information sur site a été lancée afin de vérifier l'exactitude et l'actualité des informations.

### La récolte d'information sur site

Dans le but de vérifier l'exactitude des documents acquis, on s'est rendu dans le bâtiment. Sauf quelques erreurs de dimensions, la majorité des informations étaient correctes. Après avoir mise à jour ces dimensions, on avait, à notre disposition, un relevé actuel avec des informations valides. Ainsi, la modélisation du bâtiment en BIM inversé pouvait être lancée directement, sans besoin d'effectuer un nouveau relevé soit manuel, soit numérique.

Nous nous sommes rendus compte que nous n'avions pas besoin de toujours faire un relevé au début de la récolte d'information sur site, comme proposé dans l'hypothèse initiale. Donc, à travers cette observation, un nouveau choix a été ajouté à la proposition de procédure opérationnelle à suivre pour la récolte d'information des structures porteuses.

À partir de ce relevé, la modélisation du bâtiment en BIM inversé a été lancée. Avec les informations que le relevé contenait, les informations concernant la localisation et les informations concernant la composition géométrique des structures porteuses du bâtiment ont été totalement intégrées dans le modèle BIM inversé. (Cf. Figure 3.3)

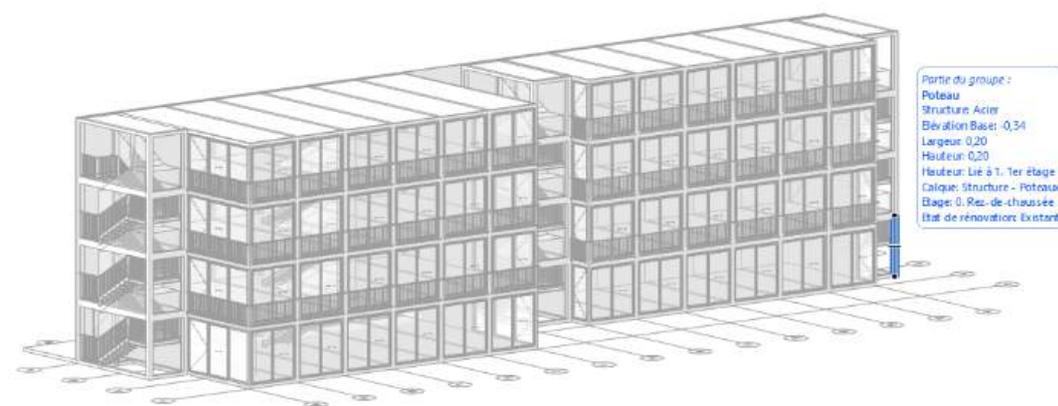


FIGURE 3.3 – Capture d'écran du modèle de Lenoir créé en ArchiCAD. Les informations en bleu s'affichent lorsqu'on sélectionne un élément, ainsi, ils montrent bien l'intégration d'information concernant la localisation et la composition géométrique des structures porteuses du bâtiment

Cependant, toutes les informations concernant les modes d'assemblages et quelques

informations concernant les caractéristiques des éléments structurels manquaient encore. À titre d'illustration, il n'était pas clair si les jonctions consistaient de boulons ou de soudures. En effet, cette information est cruciale à acquérir afin d'envisager la déconstruction des structures. Ainsi, dans le but de faciliter la récolte de ces informations, aussi bien que leur intégration dans le BIM inversé, un relevé numérique a été lancé.

Pour ce faire, nous nous sommes penchés sur l'idée d'utiliser la photogrammétrie. Une fois que les modules à capturer sont identifiés, la capture des photos a été lancée. Cependant, à cause du fait que le bâtiment Lenoir est composé des façades vitrées, et donc d'une surface transparente et réfléchissante, la capture des photos a été difficile. Pour cette raison, la décision de couvrir les fenêtres avec du papier kraft a été prise. Le mercredi 26 mai 2021, on s'est rendu dans le bâtiment afin de faire le premier test de la photogrammétrie. Toutes les fenêtres ont été couvertes, et les marqueurs ont été placés, la caméra était prête. Nous avons donc commencé à prendre autant de photos que possible en suivant les règles du workflow de la photogrammétrie. Cependant, les résultats n'étaient pas très satisfaisants. Le fait de couvrir les fenêtres rendait l'espace très obscur et créait donc des ombres qui allaient empêcher le logiciel de créer des nuages des points. À cause de ces ombres, les algorithmes considèrent ces surfaces comme non existantes. Afin de rendre l'espace plus sombre, quand on allume les lumières, cette fois ci, le métal reflétait la lumière et créait donc des nouvelles surfaces méconnaissables par les algorithmes du logiciel.

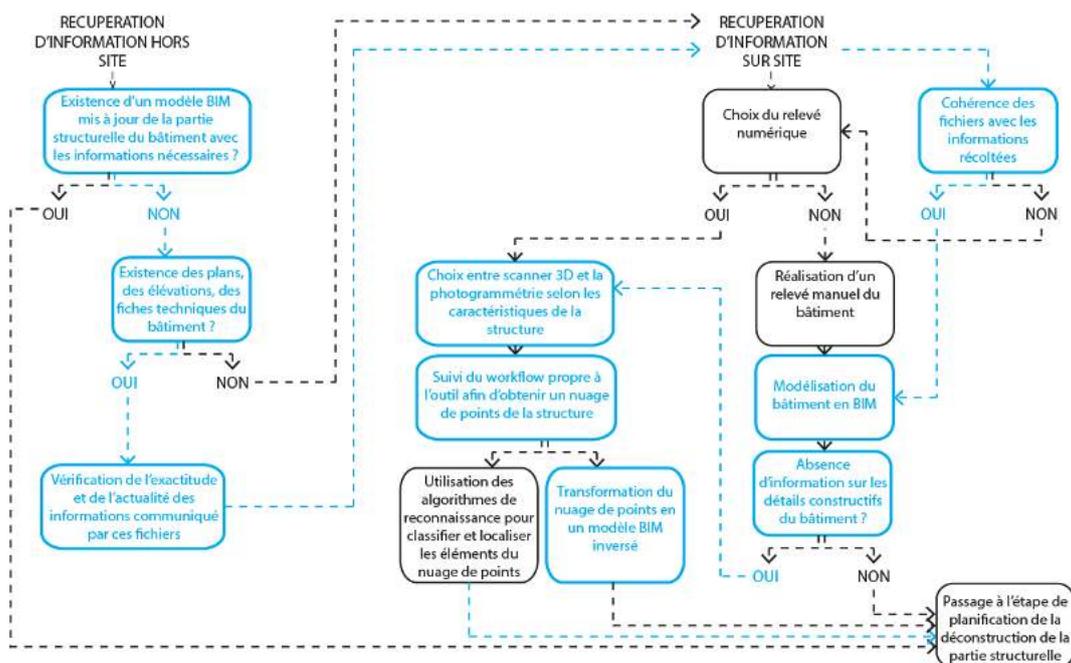


FIGURE 3.4 – La procédure opérationnelle améliorée suite aux résultats du cas d'étude

### 3.2.2 Procédures opérationnelles pour la préparation des directives de déconstruction des structures porteuses

Après avoir obtenu les informations nécessaires pour les structures porteuses, en suivant la procédure opérationnelle proposée, et les avoir rassemblées dans un modèle BIM inversé, l'étape suivante consiste à faciliter la récupération des structures porteuses et augmenter leur potentiel de réemploi grâce aux procédures opérationnelles qui permettent de préparer des directives de déconstruction. Il est important de préciser que lorsque l'on parle de « une directive de déconstruction », nous voyons un ensemble d'étapes qui indique aux acteurs

---

par où commencer à déconstruire, avec quel matériel et comment déconstruire, où mettre les éléments après la déconstruction et comment les protéger. Cependant, il faut souligner qu'une telle directive de déconstruction sélective, qui indique théoriquement comment déconstruire et récupérer les éléments structurels d'un bâtiment existant, différerait d'un projet à l'autre car, l'acte de déconstruction sera différent pour chaque élément structurel et pour chaque projet de déconstruction en fonction des matériaux et de leur mode d'assemblage. Ainsi, si nous proposons une directive de déconstruction, elle ne conviendrait pas pour faciliter la déconstruction de tous les types de structures porteuses.

Puisqu'une directive de déconstruction est propre à un projet spécifique, notre but n'est pas de proposer une directive de déconstruction, mais nous souhaitons plutôt proposer une procédure opérationnelle générale que les acteurs pourront suivre afin qu'ils puissent préparer leurs propres directives de déconstruction qui seront liées aux conditions de leurs chantiers et qui facilitera donc la récupération et augmentera le potentiel du réemploi des structures porteuses. En d'autres termes, l'objectif de cette partie est de développer une procédure opérationnelle pour que l'acteur de la déconstruction, en suivant cette procédure, puisse facilement identifier où commencer la déconstruction ou bien comment déconstruire et récupérer les éléments structurels dans son chantier de démantèlement pour qu'ils puissent ensuite préparer une directive de déconstruction.

Pour ce faire, dans un premier temps, une recherche documentaire a été effectuée afin d'identifier la procédure opérationnelle actuelle d'un chantier de démantèlement, les étapes nécessaires à ajouter à la procédure actuelle pour qu'elle intègre la préparation des directives de déconstruction et les outils numériques qui pourraient simplifier la mise en pratique de notre procédure. Ensuite, nous avons proposé une procédure opérationnelle pour aider à la préparation des directives de déconstruction des structures porteuses et cette procédure a été appliquée lors d'un cas d'étude sur le bâtiment Lenoir. Cela nous a permis de tirer des conclusions et de proposer une procédure finale.

### **Les procédures opérationnelles actuelles d'un chantier de démantèlement**

Afin de proposer une procédure opérationnelle qui permettra de préparer des directives de déconstruction sélective des structures porteuses, il faut tout d'abord connaître la procédure opérationnelle actuelle des chantiers qui a lieu à la fin de vie des bâtiments, pour qu'on puisse définir les barrières et les opportunités d'amélioration.

Il existe un large éventail de types de bâtiments en fonction de leur usage, leur matériau, leur assemblage, leur emplacement, leur hauteur et leur âge. Tous les « paramètres » d'un édifice jouent un rôle non négligeable dans les choix effectués sur le processus de démolition. Ainsi, il n'existe pas une seule manière de gérer un chantier de démantèlement. Les étapes et les acteurs varient pour chaque type de bâtiment et provoquent donc des processus de démolition variés[25]. Cependant, même si les étapes du chantier varient, il existe certaines similitudes dans le processus. Ces derniers sont :

- la phase d'appel d'offres ;
- la phase de pré-démolition ;
- la mise en œuvre de démolition ;
- la phase de post-démolition.

#### **La phase d'appel d'offres**

Cette phase commence par le client qui décide de démolir le bâtiment. Après avoir pris la décision de démolition, le client invite les entreprises de démolition à répondre à l'offre de démolition. Pour ce faire les entreprises commencent par auditer le bâtiment hors site et sur site. Selon M.G Bhandari cet audit consiste à une recherche sur l'usage, la qualité, la quantité, l'état, les dimensions et la localisation de tous les éléments constructifs aussi

---

bien qu'une recherche sur la présence de matières dangereuses et toxiques. Nous anticipons que cette phase d'audit peut être accomplie en suivant la procédure opérationnelle que nous avons proposée pour la récolte d'informations.

Une fois que toutes ces informations nécessaires sont récoltées par l'entreprise, des tests et des vérifications des éléments structurels sont faits afin d'effectuer une évaluation des risques et choisir la méthode de démolition à mettre en place.

Ensuite, l'entreprise répond à l'appel d'offres par une proposition finale. Si le client accepte la proposition de l'entreprise, ils passeront à l'étape suivante : la phase de pré-démolition.

### **La phase de pré-démolition**

Cette phase commence par la préparation du site, en d'autres termes, l'enlèvement des matières dangereuses et toxiques qui ont été révélées lors de l'audit.

Une fois que le bâtiment est purifié des matières dangereuses, l'entreprise effectue le « soft stripping ». Ce dernier consiste à l'enlèvement d'éléments non structurels tels que les boiseries, tuiles, briques, radiateurs, les portes, les fenêtres et le mobilier. Selon la méthode de démolition choisie par l'entreprise, ces éléments peuvent soit être récupérés afin d'être réemployés, soit être démolis et pour ensuite être recyclé ou devenir des déchets. Ainsi, leur récupération et les étapes à prévoir varient en fonction de la méthode de démolition choisie auparavant. Par exemple, si on envisage de récupérer ces éléments non structurels de manière à pouvoir les réemployer. Il faut prévoir des étapes additionnelles pour qu'ils puissent être récupérés correctement sans aucun dommage, être nettoyés, documentés, emballés, stockés et transportés.

Une fois que le déshabillage du bâtiment, est fait jusqu'à ce qu'il ne reste que la structure porteuse, l'entreprise passe à la mise en œuvre de la démolition.

### **La mise en œuvre de démolition**

Dans cette phase, l'entreprise démolit la structure du bâtiment selon la méthode choisie lors de la phase d'appel d'offres. D'après la recherche effectuée par M.G Bhandari, il existe deux types de démolition :

- méthode de démolition non explosive qui utilise marteaux et pilons, pelles et bulldozers ou boules de démolition et boules de déversement ;
- méthode de démolition explosive qui utilise des explosifs. Pour cette méthode, il existe deux moyens de faire tomber le bâtiment. Soit le bâtiment s'effondre sur un côté, soit il s'effondre tout droit vers le bas. Le choix est fait selon les conditions des alentours.

Cela nous montre clairement que les structures porteuses sont les éléments les plus dépréciés dans les chantiers de démantèlement actuels lorsqu'elles n'ont pas d'autre option que d'être démolies.

En vue d'augmenter la facilité de récupération des structures porteuses et assurer leur réemploi, cette étape qui envisage, actuellement, seulement la démolition pour les éléments structurels devra être améliorée.

### **La phase de post-démolition**

Comme la démolition génère une quantité massive de déchets, la dernière phase consiste à nettoyer le site qui doit être laissé au client dans un état sûr et sécurisé. Les déchets peuvent être soit recyclés, soit utilisés pour la récupération d'énergie, soit mis en décharge.

Dans un chantier de démantèlement, il existe trois acteurs principaux. Ces derniers sont : le client qui décide de démolir le bâtiment en question, l'entreprise de démantèlement qui

---

effectue l'acte de déconstruction et enfin les acheteurs ou les nouveaux utilisateurs dans le cas où le chantier fini en réemploi. (Cf. Figure 3.5)

C'est la raison pour laquelle il est important de clarifier que la procédure opérationnelle qui va être développée dans cette recherche vise à proposer des étapes pour l'entreprise de déconstruction et pas pour tous les acteurs (les étapes en gris). Elle ne concerne donc pas toutes les étapes d'un chantier de démantèlement.

### **Les modifications à apporter à la procédure actuelle et simplification de leur mise en pratique**

Les recherches ont montré que la procédure actuelle ne fournit pas les étapes nécessaires pour que les acteurs puissent prévoir la déconstruction de leurs structures porteuses. Ainsi, de nouvelles étapes doivent être ajoutées et des modifications doivent être apportées à la procédure actuelle. (Cf. Figure 3.6)

Cependant, dans cette partie, nous allons discuter non seulement des étapes à ajouter, mais aussi des outils qui faciliteront leur mise en place. Car, les étapes nécessaires à ajouter à la procédure actuelle, qu'on va aborder dans les prochaines pages, ne sont pas actuellement pratiquées puisque les barrières telles que le temps, le coût et la main-d'œuvre compliquent leur intégration dans la procédure actuelle. Nous supposons que certains des outils numériques développés peuvent optimiser leur mise en pratique. Ainsi, nous aborderons également cette possibilité dans les pages suivantes.

Tout d'abord, commençons par l'identification des étapes à intégrer dans la procédure actuelle. Pour ce faire, nous avons dû nous poser et répondre aux questions suivantes :

- Quelle serait la procédure opérationnelle qui faciliterait la planification de telles décisions techniques de déconstruction ?
- Quelles informations sont nécessaires et pertinentes pour le développement de leur propre directive ?
- Comment obtenir ces informations ?

Afin de répondre à ces questions, il faut tout d'abord clarifier que, le but de cette procédure opérationnelle est de permettre de préparer des directives de déconstruction qui vont faciliter la récupération des structures porteuses. C'est la raison pour laquelle, ce que nous percevons par le mot « récupération » a un impact important sur la compréhension de cet article et mérite donc d'être clarifié. La récupération ne signifie pas seulement de déconstruire un élément du bâtiment existant et de le mettre ailleurs. Ce qu'on entend par la récupération, dans le cadre de cet article, est d'acquérir les éléments d'un bâtiment existant dans un état prêt à être réemployé.

La recherche effectuée par Ambroise Romnée, chercheur au sein de l'Université Catholique de Louvain, décrit, à travers un cas d'étude, les étapes et les conditions nécessaires afin de finaliser une déconstruction par le réemploi des éléments récupérés. Selon Romnée, être dans un état « prêt à être réemployé » consiste à être démonté sans dommage selon le format exigé par le marché ou par le nouvel utilisateur, être prêt à être transporté vers le nouvel usage ou le point de vente de manière classée, nettoyée, documentée et emballée [40].

Par conséquent, afin de préparer une directive de déconstruction qui permet d'acquérir les éléments d'un bâtiment existant dans un état prêt à être réemployé, les acteurs devront savoir dans quel format et comment déconstruire la partie structurelle, quel ordre de déconstruction à suivre, où stocker les éléments acquis, comment intégrer l'information dans les éléments acquis, comment et où transporter les éléments acquis.

Ainsi, la procédure opérationnelle qu'on va proposer devra permettre aux acteurs de

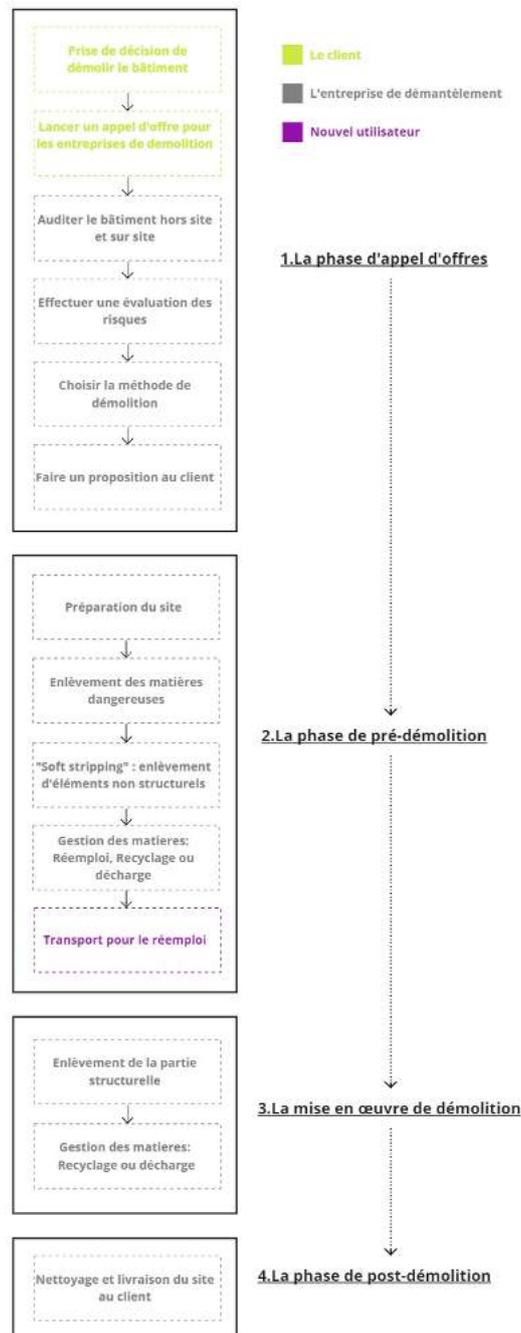


FIGURE 3.5 – Ce tableau est l’issue d’une synthèse de deux recherches. Les étapes de la procédure opérationnelle actuelle d’un chantier de démantèlement ont été listé, selon la recherche effectuée par Arham Abdullah, Chimay Anumba et Elma Durmisevic. De plus, nous avons ajouté à cette liste, en couleurs, la classification des étapes en fonction de l’acteur en charge, selon la recherche effectuée par Polina Michael. Vert : les étapes sous charge de client, gris : les étapes sous charge de l’entreprise de démantèlement et violet : les étapes sous charge de nouvel utilisateur

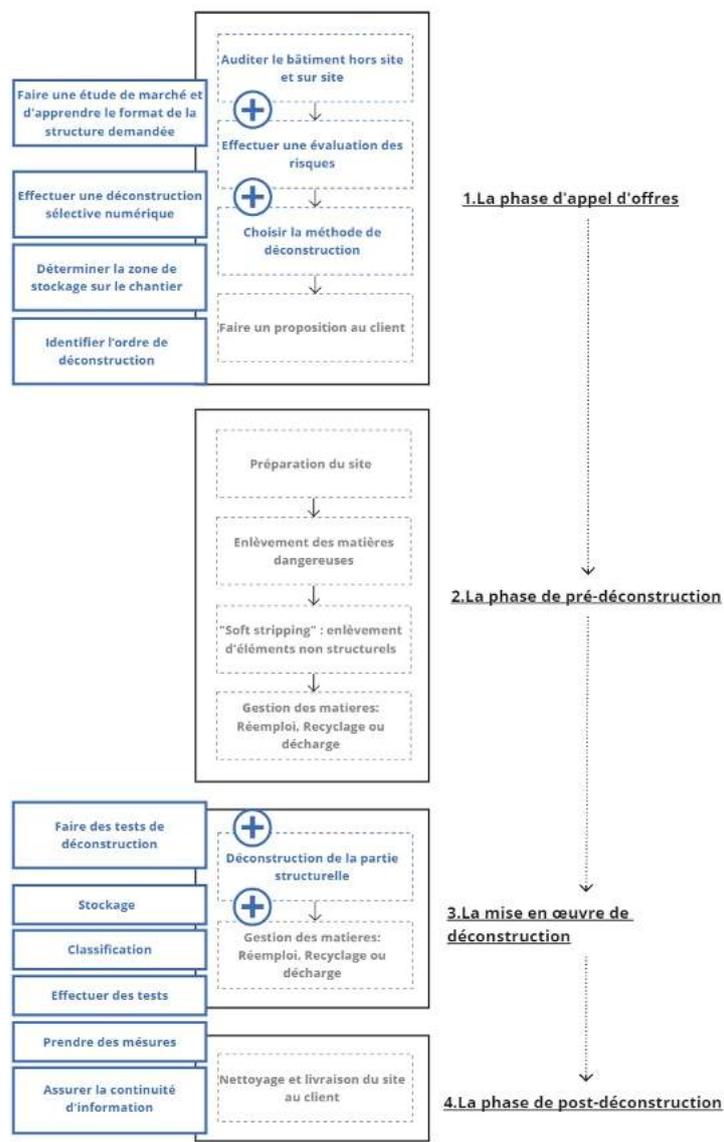


FIGURE 3.6 – Bleu pointillé : les étapes existantes qui ont été modifiées / améliorées. Bleu épais : les nouvelles étapes qui devraient être ajoutées à la procédure opérationnelle actuelle

---

répondre à ces questions pour qu'ils puissent préparer leurs directives de déconstruction qui vont leur permettre d'acquérir les éléments d'un bâtiment existant dans un état prêt à être réemployé.

Avant tout, la première étape à proposer dans la procédure pour qu'ils puissent préparer une directive de déconstruction est de leur faire obtenir les informations nécessaires sur les éléments structurels de l'édifice. En effet, cette étape existe déjà dans la procédure actuelle. Cependant, il n'intègre pas la collecte d'informations des éléments structurels de l'édifice. C'est la raison pour laquelle, nous avons proposé, dans la précédente partie, une procédure opérationnelle à suivre pour l'acquisition des informations des structures porteuses. Ainsi, nous pouvons intégrer notre proposition à la procédure actuelle afin d'améliorer l'étape existante.

Après avoir obtenu les informations nécessaires sur les structures porteuses du bâtiment en question, la déconstruction devra être planifiée pour que l'édifice puisse être déconstruit sans dommage et selon le format exigé par le marché ou par le nouvel utilisateur. Ainsi, l'acteur devra tout d'abord clarifier sous quelle forme le bâtiment doit être déconstruit, afin de pouvoir prévoir, par la suite, l'acte de déconstruction nécessaire. Par conséquent, notre procédure devrait d'abord suggérer de faire une étude de marché et d'apprendre le format de la structure demandée afin de pouvoir la déconstruire dans le format demandé et la vendre facilement. La recherche effectuée par Polina Michael, étudiante de l'université de Technologie de Delft, identifie les changements nécessaires à effectuer dans les chantiers de démolition afin de les rendre circulaires. Michael, souligne l'importance de faire une étude de marché avant la démolition.

Ainsi, une étape de l'étude de marché devra être ajoutée à la phase pré-démolition pour que l'acteur définisse sous quel format il devra déconstruire les parties structurelles [38]. Pour ce faire, il faut aller sur les sites des places de marché du réemploi et regarder les catégories des pièces vendues et des demandes du marché. Si l'acteur possède des relations avec des architectes et des entreprises de construction, il peut directement trouver des nouveaux utilisateurs à travers son réseau et définir le format selon la demande de ses utilisateurs.

Une fois que l'acteur a défini le format de l'élément à acquérir, il peut commencer à planifier l'acte de déconstruction. En d'autres termes, il peut commencer à définir la technique de déconstruction qui va lui permettre de récupérer l'élément dans le format demandé par le marché.

Dans le but d'assister les acteurs dans le choix de technique de déconstruction le plus approprié, Arham Abdullah, Chimay Anumba et Elma Durmisevic ont développé un outil numérique. Ce dernier fonctionne par l'application du processus Analytic Hierarchy Process (AHP)<sup>12</sup>. Ils ont utilisé le logiciel « Expert Choice » qui leur a permis d'évaluer les techniques de déconstruction en tenant compte des critères intégrés dans le calcul d'évaluation tel que les caractéristiques structurelles (la hauteur, type et stabilité) et conditions du site (niveau acceptable de nuisance, proximité de la structure adjacente et accessibilité du site). Ainsi, les acteurs peuvent utiliser cet outil afin de faciliter ou même pour valider leurs choix de technique de déconstruction. Ensuite, une fois que la technique de déconstruction est choisie, l'acteur doit identifier l'ordre de déconstruction pour que la récupération puisse être statiquement et énergétiquement cohérente et ne cause aucun dommage aux éléments récupérés. Pour simplifier cette tâche, l'acteur pourra simplement utiliser le BIM inversé que la procédure lui demandait de créer a priori. Comme le jumeau numérique du bâtiment sur le BIM inversé contient toutes les informations et classification de tous les éléments,

---

12. Abdullah, Arham and Anumba, Chimay and Durmisevic, Elma. (2003). Decision tools for demolition techniques selection. In 11Th Rinker International Conference on Deconstruction and Material Reuse (pp. 55-72)

---

l'acteur pourra effectuer une déconstruction sélective numérique dans le BIM. Ce qu'on entend par la « déconstruction sélective numérique » est le fait de faire disparaître, en certains phasages, les différentes parties de l'édifice. En s'interrogeant sur le parcours optimal dans cette déconstruction numérique, l'acteur pourra identifier l'ordre de déconstruction optimal.

De plus, la déconstruction numérique permettra aussi d'obtenir une estimation plus précise sur les risques de dommages potentiels qui pourront prendre place lors de la déconstruction.

Dans le contexte actuel, l'outil « Digital Deconstruction Platform »[25] développé par Elma Durmisevic et son équipe permet d'évaluer numériquement la réversibilité de tous les éléments d'un bâtiment reconstruit en BIM inversé. Cela veut dire que le logiciel assiste les acteurs pour qu'ils puissent mesurer le travail et le temps nécessaire, ainsi que les risques pour la récupération d'un élément. De surcroît, comme la déconstruction sélective numérique permet de prévoir où descendre les éléments structurels déconstruits, elle permet donc également de prévoir la zone de stockage sur le chantier en avance.

Il est important de souligner que ce qu'on entend par la zone de stockage pour cette partie de recherche consiste en un endroit où l'élément récupéré restera dans le chantier avant d'être transporté vers une nouvelle zone de stockage du marché ou avant d'être transporté au nouvel utilisateur. En conséquence, il s'agit plutôt d'un lieu où l'on va descendre les éléments et les préparer avant leur transport. La raison pour laquelle nous limitons la définition de la zone de stockage est que la recherche effectuée par Polina Michael nous a montré que le transport et le stockage des éléments en dehors du chantier n'est pas de la responsabilité de l'entreprise de démantèlement. C'est au nouvel utilisateur qu'il incombe de trouver un endroit pour les stocker avant qu'ils ne soient réutilisés sur un nouveau projet. Cependant, définir une zone pour descendre les éléments fait toujours partie de la mission de l'entreprise.

Cette question de stockage dans le chantier peut se complexifier : il y a plusieurs parcours possibles, par exemple, on peut décider de reconstruire directement et en même temps dans le chantier, ou bien on peut décider de transporter directement dans une zone de stockage en dehors du chantier. Tous ces scénarios possibles, complexifient la prise de décision pour cette étape.

De surcroît, le stockage est une étape qui coûte cher et qui devrait être optimisée. Nous faisons l'hypothèse que cette optimisation pourra être assurée par une étude de marché préalable et une déconstruction virtuelle. En effet, l'étude de marché permettra au personnel de trouver plus facilement de nouveaux utilisateurs et réduira le temps passé au stockage. De plus, la déconstruction virtuelle nous permettra de faire des propositions plus optimales en visualisant comment les éléments vont atterrir dans la zone de stockage.

Ainsi, une autre étape à ajouter dans la procédure actuelle de la phase de pré-démolition, est d'encourager les acteurs à effectuer une déconstruction sélective numérique de leur bâtiment pour qu'ils puissent évaluer les risques qui peuvent se produire pendant la déconstruction, pour qu'ils puissent identifier l'ordre de déconstruction à suivre et pour qu'ils puissent déterminer la zone de stockage sur le chantier.

Une fois que l'acte de déconstruction est bien établi par la déconstruction sélective numérique, la mise en œuvre de la déconstruction peut prendre place. La première chose à faire avant de commencer à tous déconstruire est de faire des tests de déconstruction [29]. Ce dernier est fortement recommandé et consiste en une étape primordiale à ajouter dans la procédure actuelle.

Car, même si la maquette numérique BIM est le modèle le plus proche du bâtiment réel, il peut toujours contenir des différences au niveau des détails constructifs et cela af-

---

fecte largement la mise en place de la déconstruction et peut causer donc des dommages indésirables.

Ainsi, une fois que les tests de déconstruction des structures ont été effectués, on peut lancer la déconstruction totale. Dans cette étape, chaque élément déconstruit, selon l'ordre établi, devra être séquentiellement descendu et être stocké dans la zone de stockage défini dans l'étape précédent.

Lorsque les éléments structurels déconstruits descendent dans la zone de stockage, des tests et des prises de mesures devront être effectués afin d'obtenir les informations les plus récentes. Car, les dimensions, les caractéristiques et la performance de l'élément peuvent changer après la déconstruction. Dans le but de gagner du temps et de minimiser les coûts, les tests devront prendre place dans la zone de stockage sur le chantier. Ce sera beaucoup plus pratique et moins coûteux que de les envoyer au laboratoire. De plus, en réalisant les tests sur le chantier, les résultats peuvent directement être intégrés dans l'élément pour qu'il puisse voyager avec ces informations à la fin. En bref, l'acteur devra prévoir un phasage pour que la déconstruction et la prise des mesures prennent place simultanément.

Dans le contexte actuel, les nouveaux outils sont en cours de développement afin de simplifier cette phase des tests, car ils sont beaucoup moins cher et significativement plus rapides quand ils sont faits sur site avec des outils portables. Il existe par exemple des testeurs portables pour évaluer la résistance des matériaux qui sont souvent utilisés pour l'évaluation des structures en acier [3].

Concernant les prises des mesures, en fonction de la taille des pièces, on peut les faire soit manuellement, soit en utilisant les outils de prise d'informations mentionnés dans la partie précédente. Notamment les scanners laser et la photogrammétrie. Cette décision devra être prise par l'acteur de déconstruction lors de la déconstruction sélective numérique qui montre les dimensions et la place de stockage des éléments qui vont être déconstruits.

Une fois, les tests et les prises des mesures effectués, l'acteur devra intégrer toutes ces nouvelles informations dans l'élément pour qu'il puisse voyager avec ses informations portant notamment sur ses nouvelles dimensions, qualités, usages et matières. L'intégration de ces informations pourra se faire sous un format de document physique ou numérique [3]. Les chercheurs dans le domaine du réemploi appellent cette documentation « Materials Passport ». C'est donc un passeport pour les matériaux, qui intègre toutes les informations vitales pour le emploi de l'élément récupéré.

Actuellement, l'acteur a trois moyens afin de faire voyager l'élément acquis avec ses informations. Ces derniers sont : une base de donnée intégrée dans le BIM inversé, des codes-barres et les RFID.

### **Base de donnée intégrée dans le BIM inversé**

Les nouvelles informations révélées suite à la déconstruction pourraient s'ajouter aux anciennes informations qui se trouvent sur le BIM inversé créé auparavant. Cela permettra de maintenir toutes les informations d'un élément sous forme d'une base de données. La recherche effectuée par Thibault Lénart sur les systèmes de conservation des informations relatives aux éléments de construction, indique que l'un des avantages de faire intégrer les informations sur le BIM, est d'optimiser la charge de travail en évitant la conversion des informations dans un nouveau format de documentation [36]. Cependant, Lénart souligne aussi, le fait que le BIM ne permettra pas la continuité de l'information car, on n'aura pas d'information concernant le nouvel usage des éléments. L'information est donc limitée à l'état de l'élément dans le chantier. De plus, l'information contenue dans le BIM est dans l'échelle du bâtiment et pas dans l'échelle de l'élément. Cela veut dire que pour obtenir l'information sur un élément structurel nous devons aller dans une base de données qui

---

contient tous les éléments du bâtiment dont nous n'aurions potentiellement pas besoin.

### **Codes-Barres**

Un autre moyen est de fournir un code-barres spécifique pour chaque élément récupéré pour que la personne qui scan le code-barres puisse accéder à toutes les informations propres à cet élément qui se situe dans une base de données. Nous voyons ici une première distinction du BIM. Car BIM nous fournit l'information sur tous les éléments, alors qu'ici, c'est plus optimisé et on obtient seulement l'information sur l'élément qui nous intéresse. Cependant, pour ce faire, l'acteur devra converser les informations dans une nouvelle base de données et cela ajoute une nouvelle étape à la procédure.

### **Radio Frequency Identification (RFID)**

L'utilisation des RFID implique une étiquette et un lecteur. Les RFID contiennent l'information dans l'échelle de l'élément juste comme les codes-barres. Cependant, ce qui les distingue des codes-barres est le fait que les RFID peuvent stocker l'information et ils n'ont donc pas besoin d'une base de données. De plus, contrairement aux codes-barres, la lecture des étiquettes ne nécessite pas que les étiquettes soient visibles du lecteur. La reconnaissance se fait grâce à des radiofréquences. Ainsi, cela offre une grande liberté quant à l'emplacement des étiquettes RFID sur les éléments. De plus, les RFID ne nous permettent pas seulement de stocker les informations, mais ils nous permettent également de tracer et localiser les éléments.

Ces trois méthodes ont leurs propres avantages et leurs désavantages. Par conséquent, pour fournir la documentation des éléments structurels récupérés, l'acteur doit évaluer en fonction des caractéristiques du projet et peut choisir la méthode la plus pertinente et optimale afin de faire voyager les éléments avec l'information.

### **Procédure opérationnelle proposée pour la préparation des directives de déconstruction des structures porteuses**

Nous avons proposé des modifications pour seulement deux phases. Ces derniers sont : la phase d'appel d'offres et la phase de la mise en œuvre de la démolition. Ainsi, l'article examinera en détail les nouvelles procédures opérationnelles envisagées pour ces phases de chantier à travers un cas d'étude sur le bâtiment Lenoir.

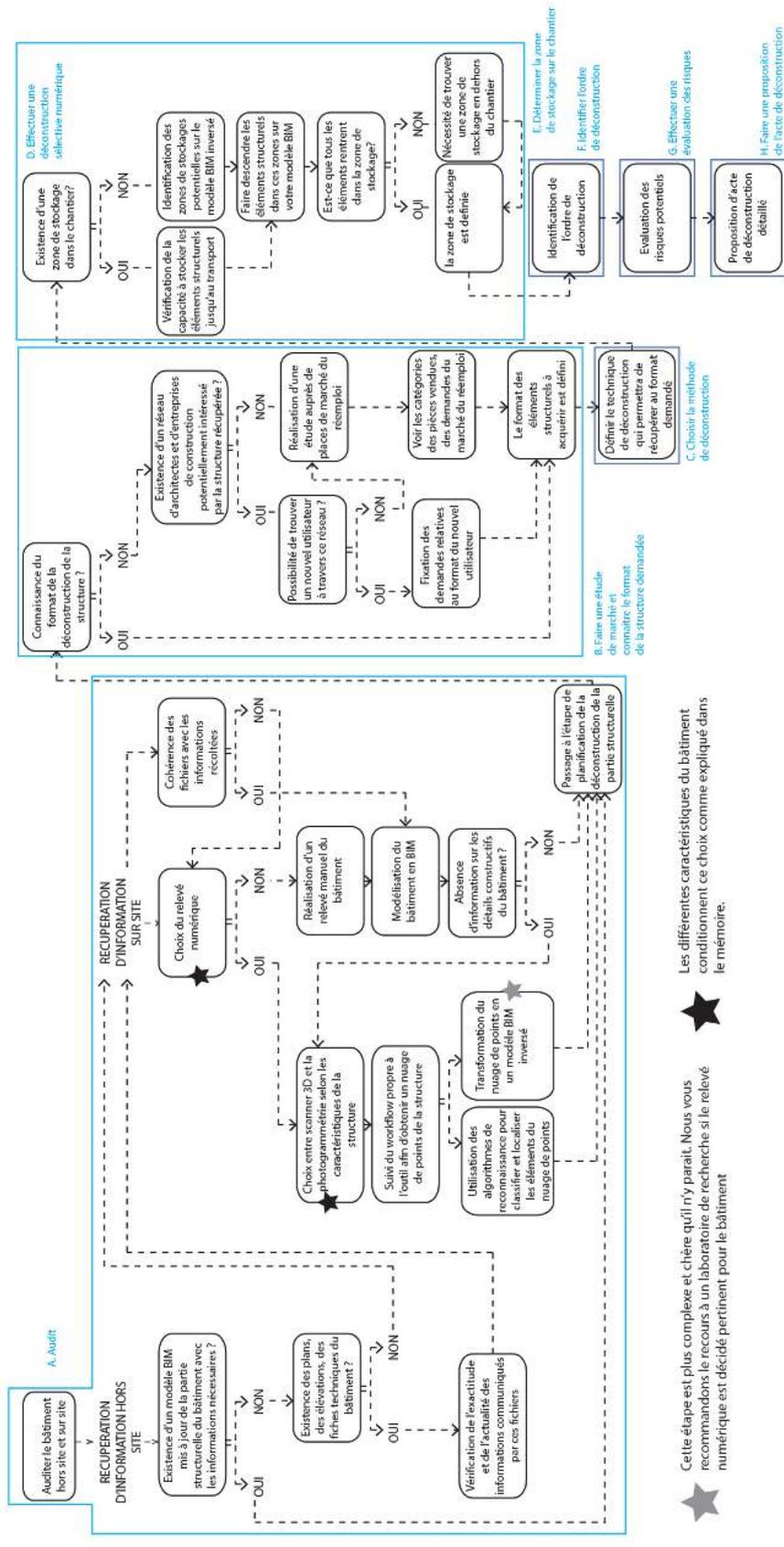
#### **Cas d'étude : le bâtiment Lenoir**

Dans le cadre de cette recherche, nous ne serons pas en mesure de suivre et tester toutes les étapes proposées. Car, sauf les étapes de la phase d'appel d'offres, tout le reste consiste en des étapes d'un chantier de déconstruction. Ainsi, afin de les suivre et de les tester, il est essentiel d'attendre le début du chantier de déconstruction du bâtiment Lenoir qui aura lieu en juillet 2022. Par conséquent, notre cas d'étude se concentra seulement sur les étapes de la phase d'appel d'offres du chantier de déconstruction. En effet, c'est le moment le plus approprié pour suivre et tester les étapes proposées pour la phase d'appel d'offres sur le bâtiment Lenoir car les étapes de cette phase devront être réalisées avant le lancement du chantier de déconstruction et nous sommes actuellement dans cette phase pour le projet de déconstruction de Lenoir.

#### **Expérimentations et résultats de cas d'étude**

Nous avons proposé huit étapes, pour la phase d'appel d'offres, dont quatre sont de nouvelles étapes et trois sont des étapes modifiées. Ainsi la procédure opérationnelle à tester sur Lenoir pour la phase d'appel d'offres est la suivante (Cf. Figure 3.7) :

# 1. La phase d'appel d'offres



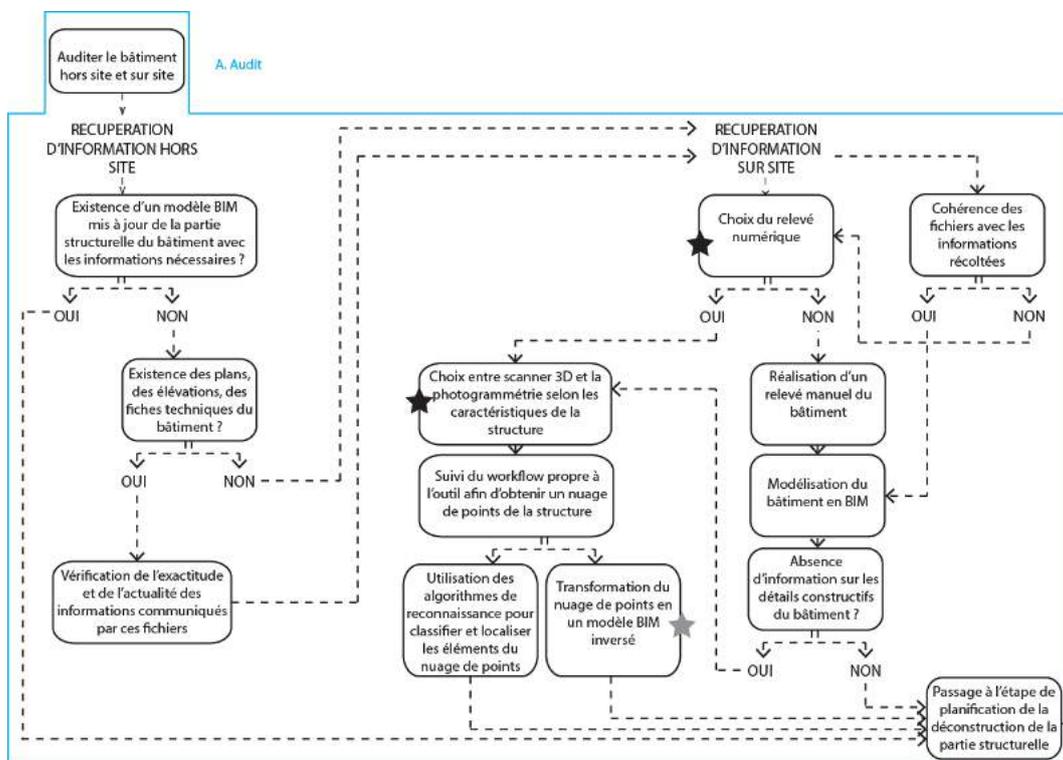
Les différentes caractéristiques du bâtiment conditionnent ce choix comme expliqué dans le mémoire.

Cette étape est plus complexe et chère qu'il n'y paraît. Nous vous recommandons le recours à un laboratoire de recherche si le relevé numérique est décidé pertinent pour le bâtiment

FIGURE 3.7 – La procédure opérationnelle proposée pour la phase d'appel d'offre

- Auditer le bâtiment hors site et sur site ;
- Faire une étude de marché et apprendre le format de la structure demandée ;
- Choisir la méthode de déconstruction ;
- Effectuer une déconstruction sélective numérique ;
- Déterminer la zone de stockage sur le chantier ;
- Identifier l'ordre de déconstruction ;
- Effectuer une évaluation des risques ;
- Faire une proposition au client.

Comme on peut le constater, la première étape consiste à auditer le bâtiment, en d'autres termes, c'est la récolte d'informations. Dans la partie précédente, nous avons déjà effectué une étude de cas sur le bâtiment Lenoir pour tester la procédure opérationnelle proposée pour la récolte d'informations. (Cf. Figure 3.8) C'est la raison pour laquelle nous pouvons passer directement à l'étape suivante et commencer donc notre cas d'étude avec la deuxième étape qui est de faire une étude de marché et découvrir le format de la structure demandée.



★ Cette étape est plus complexe et chère qu'il n'y paraît. Nous vous recommandons le recours à un laboratoire de recherche si le relevé numérique est décidé pertinent pour le bâtiment

★ Les différentes caractéristiques du bâtiment conditionnent ce choix comme expliqué dans le mémoire.

FIGURE 3.8 – Les étapes à suivre pour l'audit du bâtiment

### Faire une étude de marché et apprendre le format de la structure demandée

Comme le format de la structure à récupérer n'était pas précis pour le bâtiment Lenoir, nous avons suivi les étapes proposées par la procédure opérationnelle. Cependant, nous nous sommes rendu compte qu'il n'est pas très pertinent de rechercher un nouvel utilisateur sans préciser les formats possibles que l'on peut obtenir de notre bâtiment. Par conséquent,

---

nous avons vu qu'une modification devait être faite aux étapes proposées par la procédure opérationnelle.

En effet, il convient d'abord de déterminer les formats potentiels, puis, si nous ne disposons pas d'un réseau de clients prêts à acheter dans l'un de ces formats, il faut choisir le format le plus adapté aux exigences du marché des sites de réemploi. Suite à cette observation, nous avons modifié les étapes de la proposition de procédure opérationnelle à suivre pour l'étude de marché.

Lorsque nous avons appliqué cette nouvelle procédure au Lenoir : nous avons constaté que le fait que Lenoir soit un bâtiment préfabriqué et modulaire nous offre deux options pour le format à déconstruire. Soit on fait une déconstruction dans un format modulaire, soit on effectue une déconstruction beaucoup plus avancée et on récupère les éléments structurels dans le format des composants, comme les poutres et les poteaux.

Il convient de souligner que ces deux options ont leurs propres avantages et leurs désavantages. Par exemple, si la structure du Lenoir est déconstruite dans un format modulaire, la déconstruction sera grandement minimisée. Ainsi, le coût venant du travail effectué et le temps pour la déconstruction seront optimisés de manière significative. D'un autre côté, comme la sphère d'utilisation des modules n'est pas très vaste, si nous ne pouvons pas trouver un client ou un projet qui envisage déjà de les utiliser, il peut être très difficile de les vendre sur les places de marché. Ainsi, le coût généré par le stockage des modules jusqu'à ce que l'on trouve un nouvel utilisateur peut également rendre négatifs les gains obtenus par la minimisation de la déconstruction.

En revanche, bien que les éléments récupérés au format de composants structurels nécessitent une déconstruction plus avancée et coûteuse, les entreprises opérant sur le marché du réemploi comme Backacia et Rotor nous montrent que ce format répond à une demande plus vaste. Ainsi, le temps nécessaire pour trouver un nouvel utilisateur sera fortement réduit comparé au format modulaire.

Donc, dans ce cas, pour Lenoir, s'il existe un client prêt à acheter les modules, déconstruction en format modulaire, sinon déconstruction en format composant, nous permettra de trouver un nouvel utilisateur de la manière la plus rapide.

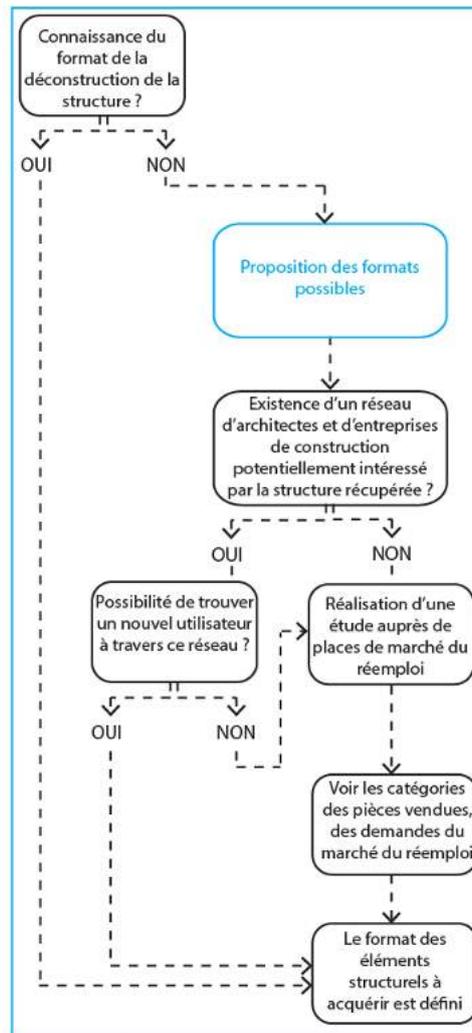
En rencontrant les responsables de l'ENSAPM, qui suivent le projet de déconstruction de Lenoir, nous avons appris qu'ils envisageaient de conclure un accord avec un client qui souhaitait acheter des modules. Nous avons donc décidé de planifier la déconstruction de Lenoir sur la déconstruction des modules, afin que les éléments que nous allons déconstruire puissent trouver un client dans les plus brefs délais. (Cf. Figure 3.9)

### **Choisir la méthode de déconstruction**

Une fois que nous avons décidé le format des éléments à récupérer, nous avons lancé l'étape de choix de la méthode de déconstruction. Cette dernière consiste à choisir la méthode qui va nous permettre de récupérer les éléments dans le format choisi.

Dans le cas de Lenoir, comme le format demandé pour sa déconstruction est le format modulaire, nous avons émis l'hypothèse que si nous pouvions obtenir les informations techniques sur la construction de Lenoir, nous pourrions décider la méthode de déconstruction en appliquant les étapes et les techniques de construction à l'inverse. Nous avons appris, à la lecture des documents fournis par ANMA, que le montage de Lenoir a été réalisé par la superposition et juxtaposition de modules préfabriqués. Ainsi, ce que nous voulons faire, dans le cadre de sa déconstruction, est l'inverse du phasage de sa construction.

Cependant, si nous devons déconstruire jusqu'aux composants, en plus d'étudier la façon dont les modules ont été assemblés entre eux, nous devrions également étudier les tech-



B, Faire une étude de marché et connaître le format de la structure demandée

FIGURE 3.9 – Modifications (en bleu) pour l'étude de marché

niques utilisées pour la fabrication des modules. En d'autres termes, afin de suggérer une technique de déconstruction pour le format des composants, nous devrions examiner également comment les composants structurels ont été assemblés pour composer les modules. Ainsi, après nous pourrions proposer une technique inversée qui nous aiderait à déconstruire dans le format des composants.

C'est la raison pour laquelle afin de trouver la méthode de déconstruction qui va permettre de récupérer les modules de Lenoir nous avons recherché les techniques effectués pour le montage de ces modules. Selon les documents fournis par ANMA aussi bien que le cas d'étude que nous avons effectué auparavant sur l'audit du bâtiment Lenoir, nous avons vu que les méthodes d'assemblages effectuées sont boulonnage et soudure. Ainsi, nous émettons l'hypothèse qu'en déboulonnant et en coupant les pièces soudées, nous pouvons déconstruire les éléments structurels du bâtiment Lenoir en format modulaire.

L'étude de cette étape nous a permis de réaliser que si l'on considère la déconstruction comme un acte inversé de construction, en plus des informations acquises sur la méthode d'assemblage en suivant la procédure opérationnelle pour la récolte d'information, nous devons connaître aussi les étapes et les techniques de construction de notre édifice, pour

qu'on puisse imaginer et élaborer des stratégies et choisir la technique appropriée pour sa déconstruction. Nous avons donc ajouté une nouvelle étape à la procédure opérationnelle suite à cette réalisation. (Cf. Figure 3.10)

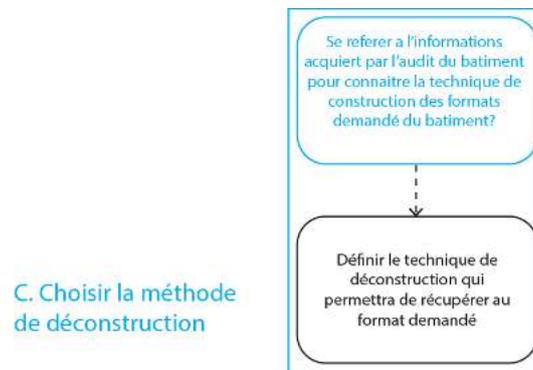


FIGURE 3.10 – Modifications (en bleu) pour le choix de la méthode de déconstruction

### Effectuer une déconstruction sélective numérique

Après avoir précisé le format de l'élément à récupérer et la technique de déconstruction qui permettra cette récupération, nous avons lancé l'étape quatre qui consiste à effectuer une déconstruction numérique à travers le BIM inversé que nous avons créé auparavant. Nous attendons que cette déconstruction sélective numérique sur BIM nous permette de déterminer la zone de stockage, d'identifier l'ordre de déconstruction et d'évaluer les risques possibles.

### Déterminer la zone de stockage sur le chantier

Comme il n'y a pas de zone de stockage définie pour la déconstruction de Lenoir. Nous avons vérifié notre modèle BIM, tel que proposé par la procédure, afin de voir les zones potentielles que nous pouvons utiliser pour descendre et stocker les modules récupérés de Lenoir jusqu'à leur transport.

Cependant, nous avons constaté que la zone autour de Lenoir est trop petite par rapport à l'échelle des modules et qu'il est presque impossible de descendre et de stocker tous les modules en même temps aux pieds du bâtiment. C'est la raison pour laquelle nous devons élaborer un phasage de déconstruction qui permettra de descendre les modules un par un sur la partie ouest du bâtiment.

Cela nous a amené à réaliser qu'il n'est pas forcément nécessaire de trouver une zone de stockage en dehors du chantier si tous les éléments récupérés ne rentrent pas dans la zone de stockage, comme le suggère la procédure proposée. Dans des cas comme le nôtre où le client est prêt à recevoir les éléments directement après la récupération, vous pouvez envoyer l'élément récupéré directement.

On peut également travailler avec une petite zone de stockage sur le site de construction. Il suffit juste d'imaginer un ordre de déconstruction qui convient à ce système. Ainsi, les dimensions de la zone de stockage vont en fait déterminer l'ordre de déconstruction. Donc, après avoir défini la zone de stockage où les modules seront descendus et testés, où de nouvelles mesures seront prises et où les éléments récupérés seront étiquetés, nous pouvons procéder à l'identification de l'ordre de déconstruction. (Cf. Figure 3.11)

### Identifier l'ordre de déconstruction

Comme mentionné précédemment, étant donné qu'il n'y a pas assez de surface de stockage sur le site, après qu'un module est descendu, un autre module ne peut pas descendre

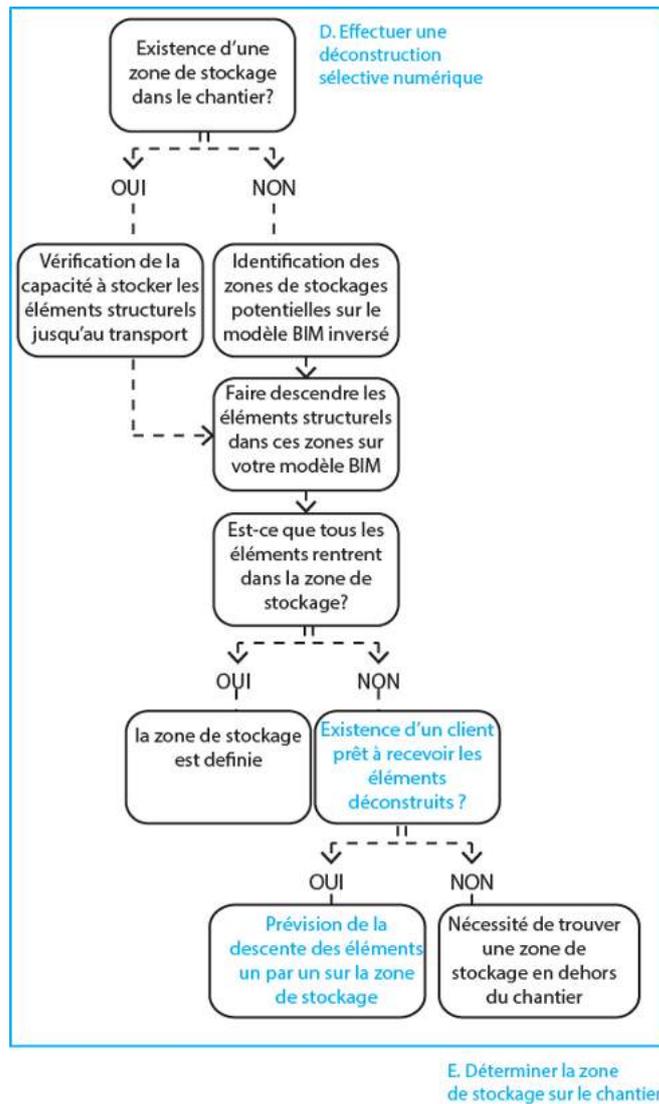


FIGURE 3.11 – Modifications (en bleu) pour la détermination de la zone de stockage

---

sur le stockage sans transporter le précédent hors du chantier. Nous avons donc testé ce phasage dans notre BIM inversé en descendant les modules un par un jusqu'à l'espace vide qui se situe dans la façade ouest du bâtiment Lenoir. Cette déconstruction numérique nous a permis de réaliser que :

Les modules les plus proches de la zone de stockage, sont les modules les plus petits qui font 6m x 2,5m. Si la déconstruction commence à partir de ces petits modules, la zone de stockage peut également être élargie car la zone située sur la façade ouest du bâtiment sera également vidée au fur et à mesure de l'avancement du chantier. Par conséquent, bien que les premiers petits modules déconstruits soient descendus et transportés un par un, grâce à la croissance de la zone de stockage, lorsqu'il s'agit de grands modules, trois modules peuvent être stockés au lieu d'un.

Si nous commençons par le dernier étage (R+3) et les plus petits modules (6m x 2,5m), chaque fois qu'un module descend sur le stockage, les tests nécessaires seront effectués, les étiquettes seront collées, et elles seront mises sur un camion et envoyées directement au client.

### **Effectuer une évaluation des risques**

La dernière étape avant de répondre à l'appel d'offres du client par une proposition, c'est d'effectuer une évaluation des risques. Cette étape était déjà dans la procédure existante et nous ne l'avons pas modifiée. Nous avons juste émis l'hypothèse que le BIM inversé et la déconstruction virtuelle faciliteraient cette étape d'évaluation des risques.

Par conséquent, nous ne détaillerons pas l'évaluation des risques de Lenoir, car l'évaluation des risques est un domaine de recherche très complexe en soi. Nous nous limiterons donc à tester si le BIM inversé peut faciliter ce processus comme nous l'avons supposé. Cependant, si cela est souhaité, l'analyse des risques de Lenoir peut être développée dans le cadre de recherches ultérieures par des experts dans ce domaine.

Nous émettons l'hypothèse des risques suivants sur la base des informations dont nous disposons et de la déconstruction virtuelle effectuée sur BIM inversé :

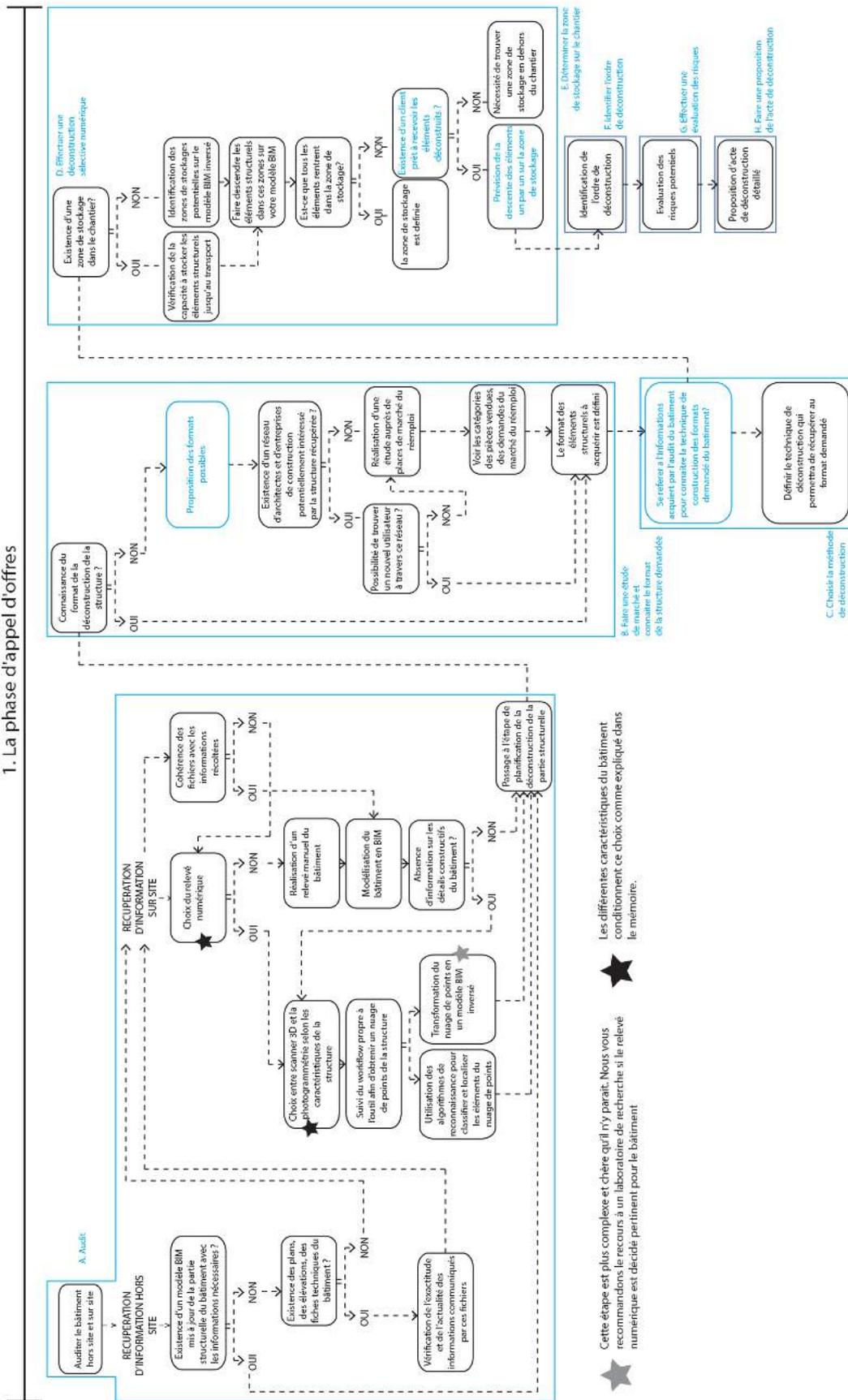
- Lenoir est un bâtiment présentant un risque élevé de nuire aux bâtiments historiques très proches lors de la déconstruction et du dépôt des modules sur les camions, en raison de l'étroitesse de la zone où il se trouve ;
- Il est très important de préserver l'intégrité statique des modules qui n'ont pas encore été démontés lors de la déconstruction.

## **3.3 Discussion**

Puisque la recherche documentaire effectuée nous a montré que le potentiel de réemploi d'un élément est fortement lié à la facilité de sa récupération qui dépend de l'acquisition d'informations et de directives de déconstruction, nous avons émis l'hypothèse que si l'on développe des procédures opérationnelles, qui aident autant les acteurs à récolter les informations nécessaires qu'à préparer leur propre directive de déconstruction sélective, nous pouvons faciliter la récupération des structures porteuses et augmenter leur potentiel de réemploi.

Dans le but de tester cette hypothèse, deux procédures opérationnelles, une pour la récolte d'informations et une autre pour la préparation des directives de déconstruction, ont été développées et ont été testées sur le bâtiment Lenoir de l'ENSAPM en tant que cas d'étude. Afin de développer une procédure opérationnelle pour la récolte d'informations, nous avons, dans un premier temps, fait une recherche documentaire qui nous a permis d'identifier la méthode actuelle de la récolte d'informations, les informations utiles pour

# 1. La phase d'appel d'offres



Les différentes caractéristiques du bâtiment conditionnent ce choix, comme expliqué dans le mémoire.

Cette étape est plus complexe et chère qu'il n'y paraît. Nous vous recommandons le recours à un laboratoire de recherche si le relevé numérique est décidé pertinent pour le bâtiment.

FIGURE 3.12 – La procédure opérationnelle modifiée suite au résultat du cas d'étude

---

faciliter la récupération des structures porteuses et les outils numériques qui pourraient simplifier cette récolte d'informations. Une fois la recherche documentaire terminée et à partir de ses nouvelles informations, nous avons proposé une procédure opérationnelle qui permettra à la personne qui la suit de récolter, facilement, les informations nécessaires pour envisager la déconstruction des structures porteuses des bâtiments existants. Ensuite, la procédure opérationnelle a été appliquée et testée lors d'un cas d'étude sur le bâtiment Lenoir qui va prochainement être démoli.

Les résultats des procédures opérationnelles développées pour la récolte d'information des structures porteuses, notamment l'intégration des outils numériques tel que le BIM inversé, ont démontré une contribution significative pour faciliter cette phase de diagnostic des parties structurelles d'un bâtiment existant. En revanche, les obstacles imprévus ont conduit à la réalisation que peut être le relevé numérique tel que les scanners 3D, la photogrammétrie et les algorithmes de reconnaissance ne sont pas les solutions les plus optimales pour toutes les typologies du bâtiment, contrairement à ce qu'on avait prévu au début de cette recherche. Il nous semble que la pratique de relevé numérique est loin d'être automatique aujourd'hui pour un objet complexe composé des divers matériaux et qui est à l'échelle d'un édifice.

Ensuite, pour développer la deuxième procédure opérationnelle qui permet aux acteurs de la déconstruction de préparer leur propre directive de déconstruction des structures porteuses, nous avons suivi la même logique. Dans un premier temps, une recherche documentaire a été effectuée afin d'identifier la procédure opérationnelle actuelle d'un chantier de démantèlement, les étapes nécessaires à ajouter à la procédure actuelle pour qu'elle intègre la préparation des directives de déconstruction et les outils numériques qui pourraient simplifier la mise en pratique de notre procédure. Par la suite, nous avons proposé une procédure opérationnelle pour aider à la préparation des directives de déconstruction des structures porteuses et cette procédure a été appliquée lors d'un cas d'étude. Cela nous a permis de tirer des conclusions et de proposer une procédure finale.

Les résultats obtenus lors de la mise en œuvre des procédures opérationnelles pour la préparation des directives de déconstruction des structures porteuses nous ont montré le besoin de modification des quelques étapes proposées. Suite à leur amélioration, la procédure proposée se révèle prometteuse dans le contexte du bâtiment Lenoir afin de faciliter, en planifiant et en guidant, la déconstruction des éléments structurels d'un bâtiment existant. Cependant, il faudra attendre la déconstruction de Lenoir, c'est-à-dire juillet 2022, pour vérifier si les procédures développées permettront réellement à faciliter la récupération de ces éléments structurels.

### **3.4 Conclusion**

En conclusion, les résultats discutés précédemment ont montré que les procédures opérationnelles développées dans le but d'augmenter le potentiel de réemploi des structures porteuses en facilitant leur récupération, se révèlent prometteurs.

Cependant, nous avons rencontré des limites pendant cette recherche et des recherches supplémentaires doivent être effectuées pour une évaluation complète des procédures proposées. L'une de ces limites est que cette recherche n'a pas pu appliquer et tester toutes les étapes proposées dans la deuxième procédure opérationnelle proposée pour la préparation des directives de déconstruction. Car, sauf une étape, tout le reste consiste à être des étapes d'un chantier de déconstruction. Ainsi, afin de les évaluer, il est essentiel d'attendre le début de chantier de déconstruction de Lenoir qui aura lieu en juillet 2022. Ainsi, nous proposons une recherche supplémentaire qui aura lieu pendant le chantier de déconstruction de Lenoir.

---

De surcroît, une recherche supplémentaire sur les coûts énergétiques et économiques de chaque opération proposée dans les procédures aussi bien que leurs optimisations devront être effectuées. Finalement, nous proposons également une recherche supplémentaire sur la mise en œuvre de ces procédures pour la déconstruction des différentes typologies des bâtiments afin d’avoir une vision plus générale sur la pertinence des procédures proposées par cet article.



# Bibliographie

- [1] Bill ADDIS : *Building with Reclaimed Components and Materials a Design Handbook for Reuse and Recycling*. London : Earthscan, 2006.
- [2] Marco ANNUNZIATA : Welcome to the age of the industrial internet. TED, 2013.
- [3] Rotor ASBL : *Vade-mecum pour le réemploi hors site, comment extraire les matériaux réalisables de bâtiments publics*. Région de Bruxelles-Capitale, 2015.
- [4] Noé BACSH : Le réemploi en architecture. Conference, INSA Strasbourg, 2020.
- [5] Pierre BERTIN : Cas d'école(s). Mémoire de D.E.A., ENSA Paris-Malaquais, 2020.
- [6] Pieter BEURSKENS et Elma DURMISEVIC : Increasing reuse potential by taking a whole life-cycle perspective on the dimensional coordination of building products. 3rd Green Design Conference, 2017.
- [7] M. G. BHANDARI, V. K. KULKARNI et R. K. MALVIYA : Building demolition : Ground to earth important as construction. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013.
- [8] Mathilde BILLET : Déconstruction sélective, la nouvelle voie pour l'architecture ? Conférence, Les Canaux, Paris, 2020.
- [9] Jan BRÜTTING : Circular strategies. Conference, Die Angewandte, Vienne, 2020.
- [10] Jan BRÜTTING et Corentin FIVET : Nothing is lost, nothing is created, everything is reused : structural design for a circular economy. *The Structural Engineer*, 2020.
- [11] Jan BRÜTTING, Corentin FIVET, Alex MURESAN et Dario REDAELLI : *Sustainability through reuse : a reconfigurable structural system for residential and office buildings*. Thèse de doctorat, EPFL, 2019.
- [12] Jan BRÜTTING, Genaro SANATORE et Fivet CORENTIN : Form follows availability : Designing structures through reuse. *Journal of International Association for Shell and Spatial Structures*, 2019.
- [13] Jan BRÜTTING, Camille VANDERVAEREN, Genaro SANATORE, Niels DE TEMMERMAN et Corentin FIVET : Environmental impact minimization of reticular structures made of reused and new elements through life cycle assessment and mixed-integer linear programming. *Energy & Buildings*, 2020.
- [14] Fabien CARON, Eric DORLÉAC et Alexis MORIN : Une architecture du réemploi, pimp your waste. Mémoire de D.E.A., ENSA Paris-Malaquais, 2018.
- [15] Julien CHOPPIN et Nicolas DELON : *Matière grise : Matériaux, Réemploi, Architecture*. Pavillon de l'Arsenal, 2014.

- 
- [16] André COELHO et Jorge DE BRITO : Conventional demolition versus deconstruction techniques in managing construction and demolition waste. *CDW*, 2013.
- [17] Fivet CORENTIN : *Design of Load-Bearing Systems for Open-Ended Downstream Reuse*. Thèse de doctorat, EPFL, 2019.
- [18] Ministère de la transition ÉCOLOGIQUE : Projets de décrets relatifs au diagnostic portant sur la gestion des produits, matériaux et des déchets issus de la démolition ou réhabilitation significative de bâtiments, 2020.
- [19] Wim DEBACKER et Saskia MANSHOVEN : *Key barriers and opportunities for Materials Passports and Reversible Building Design in the current system*. Thèse de doctorat, BAMB, 2016.
- [20] Nicolas DELON : Matériaux, réemploi et architecture. Conférence, Pavillon de l' Arsenal, Paris, 2014.
- [21] Ordre des ARCHITECTES : Réemploi et réutilisation des matériaux issus de la déconstruction : étapes clés, 2020.
- [22] Elma DURMISEVIC : *Transformable Buildings Structures : Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction*. Delft, Cedris M&CC, 2006.
- [23] Elma DURMISEVIC : Circular economy in construction : Design strategies for reversible buildings, 2015.
- [24] Elma DURMISEVIC, Pieter BEURSKENS, Renata ANDROSEVIC et Reonald WESTERDIJK : Systemic view on reuse potential of building elements, components and systems : comprehensive framework for assessing reuse potential of building elements. International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste, 2017.
- [25] Elma DURMISEVIC, Annie GUERRIERO, Calin BOJE, Bruno DOMANGE et Guido BOSCH : Development of a conceptual digital deconstruction platform with integrated reversible bim to aid decision making and facilitate a circular economy. 11th Rinker international conference : deconstruction and materials, 2003.
- [26] Antoine FAIVRE : Le numérique vecteur de réemploi. Mémoire de D.E.A., Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2020.
- [27] Explorations for REVERSIBLE BUILDINGS : Durmisevic, elma, 2019.
- [28] Michaël GHYOOT, Lionel DEVLIEGER, Lionel BILLET et André WARNIER : *Déconstruction et Réemploi : comment faire circuler les éléments de construction*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018.
- [29] Luuk GREMMEN : Component reuse in construction the current building stock as a source of components for new buildings. Mémoire de D.E.A., TU Delft, 2018.
- [30] Suez GROUPE : Btp : Suez lance batirim, la première solution digitale permettant une déconstruction sélective des bâtiments, 2018.
- [31] Vincent GRUIS et Anne VAN STIJN : Towards a circular built environment : An integral design tool for circular building components. *Smart and Sustainable Built Environment*, 2019.

- 
- [32] Laurie-Jade GUERIN : L'intelligence éco-artificielle : Comment informer le réemploi des éléments de construction. Mémoire de D.E.A., ENSA Paris Val-de-Seine, 2019.
- [33] Mathias HEINRICH et Werner LANG : Materials passports : Best practice innovative solutions for a transition to a circular economy in the built environment, 2019.
- [34] Hannah HÖFTE : Matière, mémoire, ressource : Récit d'un processus de réemploi en territoire francilien. Mémoire de D.E.A., ENSA Paris-Malaquais, 2019.
- [35] Kateryna KUZMENKO, Charlotte ROUX, Adélaïde FERAILLE et Olivier BAVAREL : Assessing environmental impact of digital fabrication and reuse of constructive systems. *Structures*, 2020.
- [36] Thibault LÉNART : Matière et information : Assurer la continuité des informations relatives aux éléments constructifs en vue du réemploi. Mémoire de D.E.A., ENSA Paris-Malaquais, 2019.
- [37] Thibault LÉNART et Guillaume JAMI : Workscape : La nouvelle condition industrielle. Mémoire de D.E.A., ENSA Paris-Malaquais, 2020.
- [38] Polina MICHAEL : Circular demolition process : Enhancing the reuse potential of components and materials in the building industry. Mémoire de D.E.A., TU Delft, 2018.
- [39] Institut pour la conception éco-responsable du BÂTI : Le réemploi : Matières à bâtir. Mooc, 2020.
- [40] A. ROMNÉE, L. BILLIET, O. MAHIEU et J VRIJDERS : Deconstruction, preparation for reuse and reuse of salvaged materials on a pilot construction site in brussels. International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste, 2017.
- [41] Frank SCHULTMANN et Nicole SUNKE : *Closed-loop oriented project management in construction : An approach for sustainable construction management*. Thèse de doctorat, University of Siegen, 2006.
- [42] Forge Partner TALKS : Digital twins. Conference, Autodesk, 2020.
- [43] Roberto VARGAS : Material data intelligence : Towards a circular building environment. Mémoire de D.E.A., Institute for Advanced Architecture of Catalonia, 2020.
- [44] Késia VASCONCELOS : L'économie circulaire dans le btp. TED, 2018.



# Façades dynamiques : vers un contrôle morphologique de l’approvisionnement solaire

Par Faouzi Gargouri<sup>1</sup>

*Le besoin croissant d’économies d’énergie et de meilleures conditions d’éclairage naturel dans les bâtiments entraîne de grands enjeux pour la conception des façades. En effet, les façades ont un impact important sur la consommation d’énergie et l’utilisation de la lumière du jour. L’hypothèse de cette recherche porte sur le potentiel de réduction de la demande de climatisation avec l’utilisation et la correcte gestion des dispositifs de protection solaire. Dans le cadre de ce travail, une revue est donnée sur la technologie actuelle de ces dispositifs d’ombrage actif afin de donner un point général sur l’histoire et les racines de cette technologie. Nous avons exploré ces systèmes et leurs propriétés et leur potentiel pour le contrôle de la lumière du jour et de l’énergie solaire dans les bâtiments. L’objectif est d’explorer les potentiels des systèmes d’ombrage cinétiques. En investissant leur relation avec l’art de l’origami, cet article propose d’autres alternatives géométriques paramétriques pour des futures expérimentations constructives.*

---

1. Faouzi GARGOURI est né en 1997. Architecte DE diplômé de l’ENSA Paris-Malaquais en 2022. Suite à ses études à l’École nationale d’architecture et d’urbanisme – TUNISIE, Faouzi a obtenu sa licence à Ecole Nationale Supérieure d’Architecture – Strasbourg. Il a ensuite fait son master avec le département Digital Matters. En parallèle, il a fait une alternance de deux ans avec des agences parisiennes. Il travaille actuellement chez ARCHITEKTORY à Asnières-sur-Seine en tant qu’architecte assistant chargé de Projet.

---

## 4.1 Introduction

Aujourd'hui, le secteur de bâtiments est responsable de 40% d'émission d'oxyde de carbone dans l'air "Les émissions de  $CO_2$  ont atteint 9,95  $GtCO_2$  en 2019. Le secteur représente 38% de l'ensemble des émissions de  $CO_2$  liées à l'énergie si l'on ajoute les émissions du secteur de la construction de bâtiments".<sup>2</sup> Bien que les accords internationaux visent à une réduction des consommations en énergie, une tendance opposée s'avère, puisque nos conditions de vie changent dans toutes ses dimensions et sur tous les domaines. Cependant, cette amélioration de qualité de vie que nous cherchons, a un prix financier et environnemental, et ces derniers augmentent respectivement avec le temps et avec notre niveau de confort. Le bâtiment avec toutes ses typologies différentes, représente notre bulle de confort puisque on passe 86,9% de notre vie à l'intérieur.

"Robinson et al., 1972" pour estimer le temps que les gens passent en transit, à l'extérieur et à l'intérieur, a conclu que les personnes employées aux États-Unis ne passent qu'environ 2% de leur temps à l'extérieur, 6% de leur temps en transit et 92% de leur temps à l'intérieur. Pour les 11 autres pays, il a estimé que le temps passé en transit par les hommes employés allait de 1,5h (6,2% de la journée) en France et Belgique à 2,5h(10,4%) à Lima, au Pérou, tandis que le temps passé à l'extérieur allait de 0,4h (1,7%) à Torun, en Pologne, à 1,9h (7,9%) en Allemagne de l'Ouest (sur la base de 100 districts). Bien qu'Ott ait averti que ces études sociologiques du budget-temps n'étaient pas conçues pour estimer l'exposition humaine, ses estimations recodées ont montré des proportions étonnamment faibles de temps passé à l'extérieur par les habitants des 12 pays. Il suggère que le temps important passé à l'intérieur est une caractéristique fondamentale de l'espèce humaine : "La conclusion qui se dégage est que nous sommes fondamentalement une espèce d'intérieur.", "Dans une société moderne, le temps total passé à l'extérieur est la partie la plus insignifiante de la journée, souvent si petite qu'elle apparaît à peine dans le total."<sup>3</sup>

La recherche du confort thermique et lumineux peut alors entraîner des consommations de plus en plus élevées. L'avancement technologique, a entraîné la recherche d'alternatives à bas impact environnemental, capables d'assurer le confort à moindre consommation. D'autre part, nous assistons depuis plusieurs décennies au développement de grands immeubles vitrés qui augmente la nécessité indispensable de solutions technologiques High Tech. Dans ce cadre, les systèmes d'ombrage actif permettent de diminuer les radiations solaires et l'éblouissement en assurant ainsi un confort thermique et lumineux pour l'utilisateur. En raison de leur capacité à améliorer principalement la qualité de l'environnement intérieur du bâtiment, les systèmes d'ombrage actifs sont de plus en plus utilisés dans les bâtiments afin de réduire la consommation d'énergie, et dans certains cas, ils permettent de générer de l'énergie.

Les dispositifs d'ombrage externes fixes sont largement connus comme un moyen efficace à la fois pour contrôler le gain de chaleur et l'éblouissement dans les bâtiments, et pour réduire l'énergie consommée pour la climatisation dans différentes conditions climatiques. Cependant, les dispositifs d'ombrage intérieurs fixes ont leurs limites, dont les plus importantes sont leur incapacité à s'adapter aux variations des conditions extérieures et l'obstruction de la vue vers l'extérieur. En revanche, les dispositifs d'ombrage externes sont plus efficaces que les dispositifs d'ombrage internes, car ils sont plus efficaces pour réduire les charges de climatisation des bâtiments dans les régions arides. Ils présentent néanmoins, quelques désavantages comme la nécessité d'une maintenance régulière.

---

2. Source : <https://www.unep.org/fr/actualites-et-recits/communiquede-presse/les-emissions-du-secteur-du-batiment-ont-atteint-un>

3. Source : National Human Activity Pattern Survey (NHAPS) A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants, USA, 2001 et traduit avec [www.DeepL.com](http://www.DeepL.com)

---

Les Kinetic Solar shading systems sont considérés comme des mécanismes ayant un grand potentiel dans l'avenir grâce à un contrôle dynamique des apports solaires. La possibilité d'interagir avec l'extérieur à l'aide des mouvements et des changements au niveau morphologique, nous conduit à nous interroger sur le potentiel de ces systèmes, capables d'adapter leur géométrie selon les paramètres de l'environnement extérieur. Néanmoins, il existe plusieurs problématiques technologiques liées aux systèmes cinétiques d'ombrage actifs. Ces problématiques concernent la nature de mouvements géométriques appropriés pour un meilleur contrôle d'apports solaires. De ce fait, une évaluation de différentes géométries s'impose afin de comparer l'impact de la morphologie sur les apports solaires.

#### **4.1.1 Problématique**

L'objectif principal de cette recherche est d'établir l'étendue des connaissances sur l'état actuel des systèmes cinétiques d'ombrage actif et l'évaluation de leurs potentiels. Nous visons ensuite à étudier l'impact de la variation géométrique sur les apports solaires et les morphologies les plus appropriées pour avoir un meilleur contrôle de la radiation solaire. Nous concluons cette recherche avec une proposition d'alternatives géométriques pour des futures expérimentations et exploration.

Les principales questions posées sont les suivantes :

- Quel est le potentiel des façades actives et plissés pour le contrôle des apports solaires ?
- Quels sont les paramètres et les critères morphologiques à considérer pour mieux contrôler les apports solaires ?
- Comment, à travers des morphologies dynamiques d'inspiration des origami, peut-on diminuer les impacts des radiations solaires ?

#### **4.1.2 Méthodologie de recherche**

Cette recherche vise à développer une méthode pour la conception et la construction de surfaces rigides en origami dédiées pour des systèmes d'ombrage actif de doubles façades. La recherche géométrique commence par l'analyse des caractéristiques de l'origami rigide et par la proposition des formes de modules qui peuvent être potentiellement étudiées. L'étude se prolongera sur les possibilités de séquences formelles en prenant en compte les potentialités de contrôle des radiations solaires. À la fin de cette phase, une matrice géométrique, selon plusieurs paramètres liés à ce qui était évoqué au-dessus, résume les résultats obtenus. Suite à cette recherche géométrique, on fera une expérimentation digitale des comportements thermiques l'aide des outils informatiques comme Rhino, Grasshopper, Ladybug et Honeybee. Une description de la modélisation du modèle sera évoquée ainsi que son évaluation face aux radiations solaires conformes aux sites choisis.

C'est primordial de prévoir la contrainte imposée par le contexte pour avoir une meilleure identification pour la recherche. Pour ce faire, nous considérons un cas d'étude appliqué à des contextes climatiques différents, Paris et Tunis. Cela nous permettra d'évaluer et comparer les performances des systèmes et de comprendre les possibles avantages pour les deux climats étudiés. (cf. Figure 4.1)

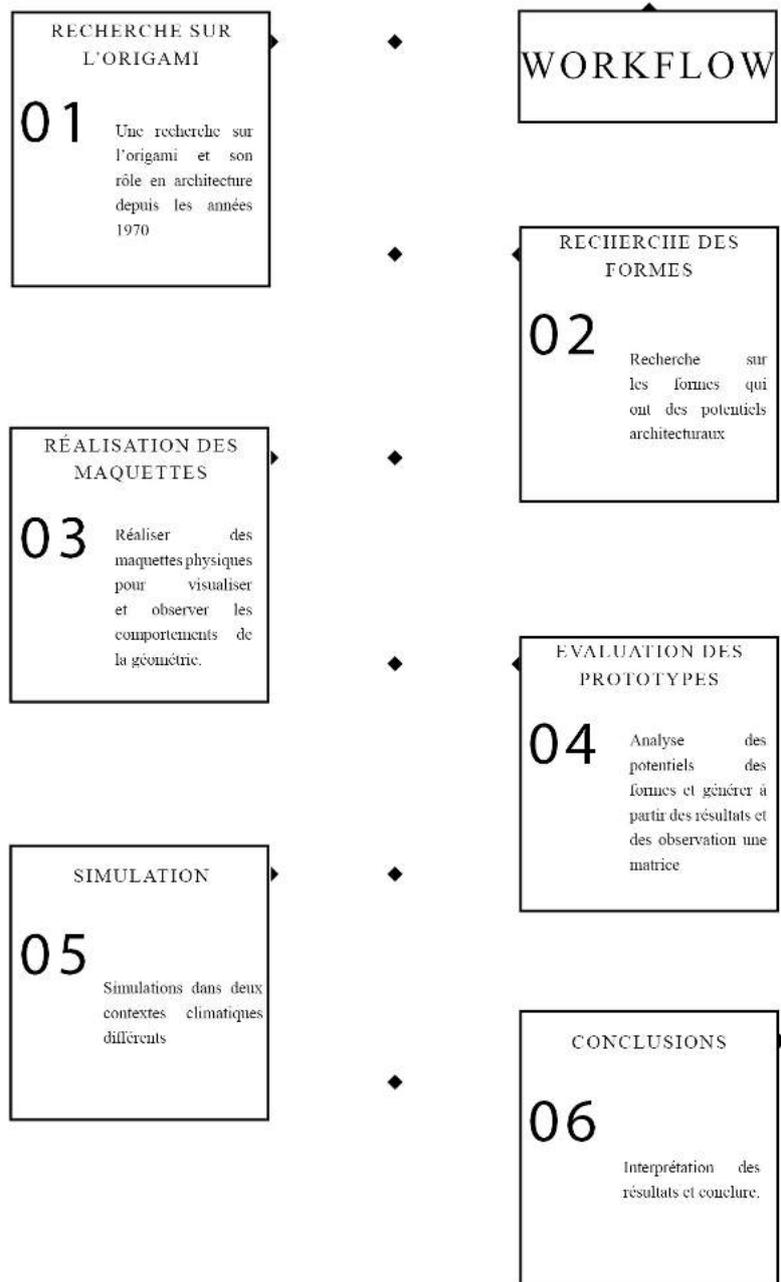


FIGURE 4.1 – WORKFLOW

---

## 4.2 Les dispositifs d'ombrage cinétiques

### 4.2.1 Les types de systèmes d'ombrage actif en architecture

Dans de multiples immeubles de bureaux aux façades vitrées, la protection solaire utilisée se résout avec des lamelles horizontales fixes opaques. Ces systèmes de protection solaire peuvent réduire efficacement les radiations solaires, mais ils ont un impact sur la vue vers l'extérieur et réduisent le niveau de lumière du jour dans le bâtiment. Il est donc nécessaire de développer des systèmes combinés de protection solaire flexible et de dispositifs d'orientation de la lumière qui, en plus de réduire les apports solaires, assurent une répartition plus progressive de la lumière du jour dans les bâtiments, améliorant ainsi le confort visuel à l'intérieur. Utilisés depuis longtemps, les systèmes solaires passifs peuvent aujourd'hui faire appel aux technologies modernes, aux matériaux sélectifs et aux systèmes de régulation complexes ; parmi eux, les façades à double peau s'avèrent extrêmement attractives et prometteuses.

Les façades doubles peau sont le résultat d'un mouvement architectural qui accorde une grande attention aux questions esthétiques. Cette solution présente également de nombreux autres avantages, tels que la réduction de la consommation de chauffage et de refroidissement, un bon niveau d'isolation acoustique des façades et une meilleure protection contre la pollution atmosphérique. D'autre part, l'installation de façades vitrées à double peau au lieu des murs extérieurs opaques pourrait poser certains problèmes : surchauffe en été, coûts d'investissement plus élevés, réduction de la surface au sol du bâtiment et coûts de nettoyage supplémentaires. Ces façades deviennent en effet un élément architectural important et répandu dans les immeubles de bureaux, car elles peuvent offrir de nombreux avantages, au-delà de leur esthétisme.

Parmi les différents systèmes de la façade double peaux, la typologie la plus répandue se compose en général d'une surface vitrée extérieure, d'un système d'ombrage, d'une couche d'air et d'un système de double vitrage intérieur isolant, parfois intégré à des murs opaques. (Cf. Figure 4.2 et Cf. Figure 4.3)

Pendant les mois d'été, dans les pays à climat chaud, la configuration fixe à double peau sans ventilation naturelle, pourrait facilement provoquer une surchauffe des espaces, qui entraînent de ce fait une augmentation des charges de refroidissement. Afin de surmonter ce problème, une nouvelle façade double peau s'est développée : la couche extérieure, intégrée d'un dispositif d'ombrage mobile, permet de profiter des avantages d'une façade double peau dans les périodes hivernales tout en limitant les charges de climatisation pendant la saison chaude grâce au changement de forme du système d'ombrage.

Grâce à l'avancement technique, la recherche en architecture s'est tournée vers des nouvelles solutions telles que les systèmes pliables qui jouent un rôle primordial dans l'architecture cinétique. Ces systèmes facilitent le mouvement des éléments ou composants d'une architecture afin de créer le changement morphologique souhaité. Ces systèmes d'ombrage cinétiques peuvent présenter des géométries plus complexes mobiles en s'inspirant des origamis et de l'art du pliage.

### 4.2.2 Origami et Architecture

#### Présentation et définition

L'art de l'origami a présenté pour les architectes l'une des sources d'inspiration pour atteindre cet objectif de confort. L'origami, un art millénaire du Japon, est une méthode

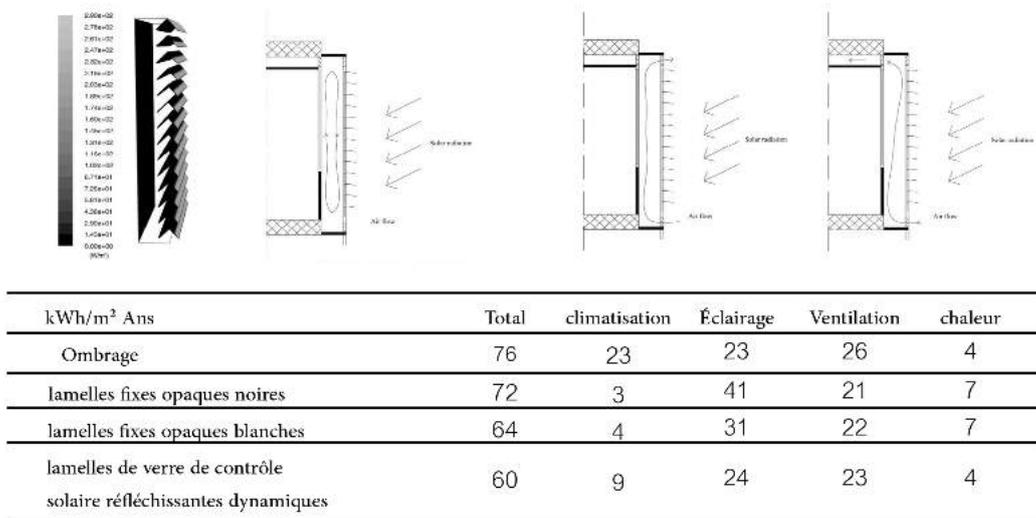


FIGURE 4.2 – Classification de système d’ombrage

Source : Building applications

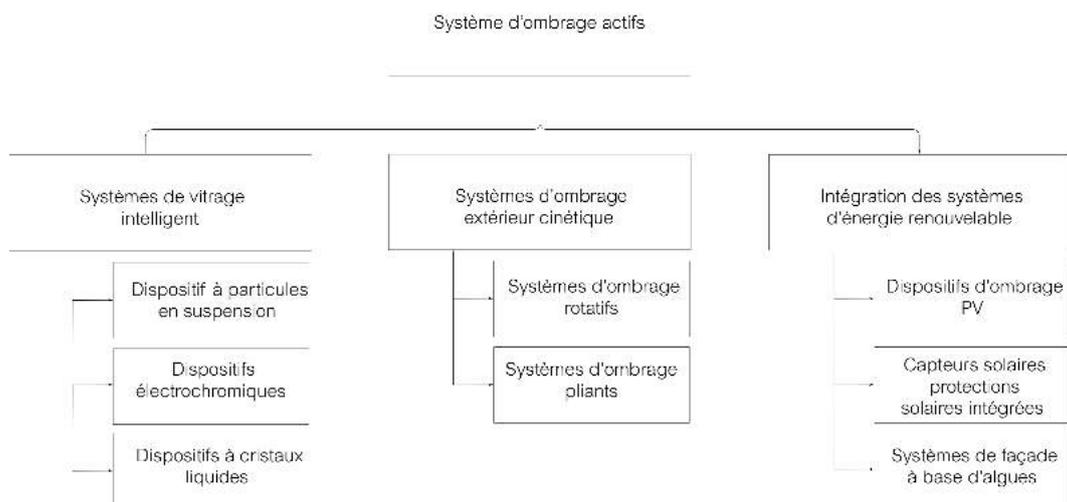


FIGURE 4.3 – Façades double peau pour régions à climat chaud

Source : Analyse d’une solution avec un système d’ombrage mobile intégré, G.baldinelli

---

créative qui consiste à plier du papier pour créer des formes tridimensionnelles de haute qualité esthétique. Après sa diffusion en dehors du Japon au milieu des années 1900, il est devenu une forme d'art moderne, qui a inspiré des artistes du monde entier et de nombreux domaines artistiques, dont le design et l'architecture. (Cf. Figure 4.4)

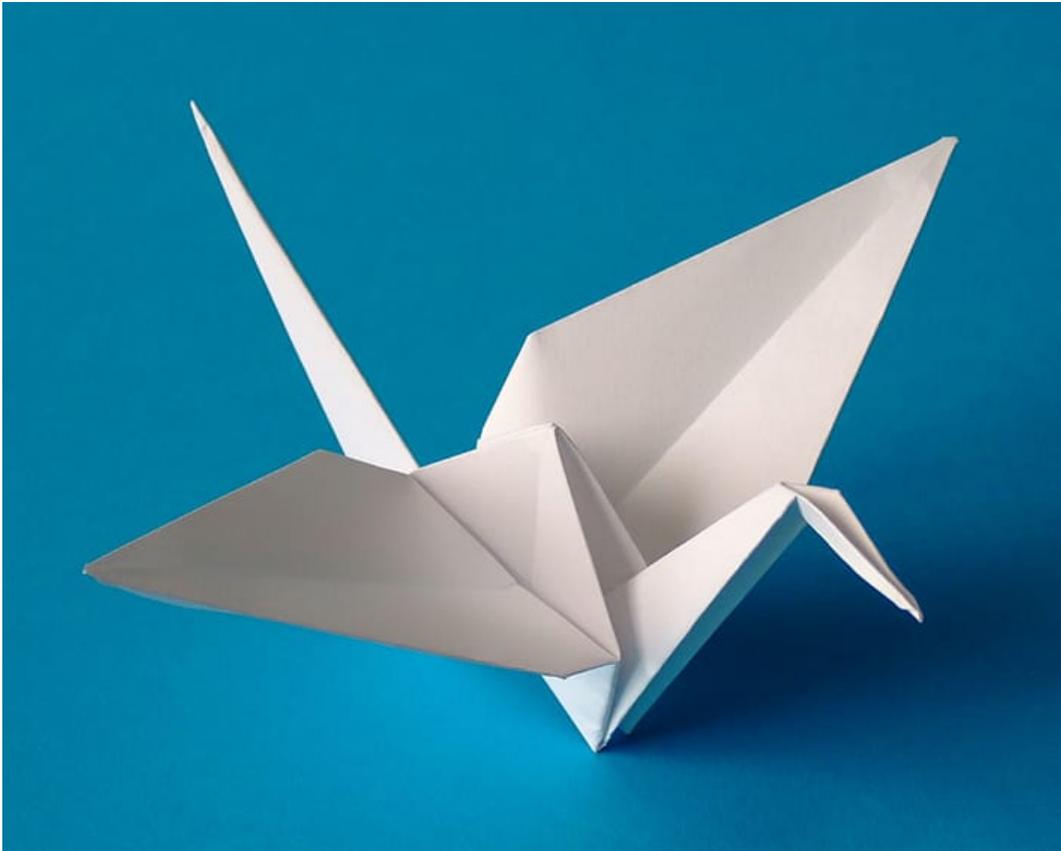


FIGURE 4.4 – Une grue en papier

Source : Andreas Bauer (<https://www.origami-kunst.de/>)

Dans les années 1960 et 1970, des groupes d'architectes ont utilisé cet art en architecture pour leur flexibilité et leur potentiel d'adoption aux besoins des usagers, qui évoluent avec le temps. Entre les années 1980 et la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, d'importants projets ont été développés. C'est également à cette époque que l'architecture cinétique a commencé à être réexaminée en partant du principe que ses performances pourraient être optimisées si des données informatiques pouvaient être utilisées pour traiter et contrôler l'adaptation physique des bâtiments. (Cf. Figure 4.5)

Dans les années récentes, nous pouvons trouver des projets qui utilisent les nouvelles technologies avec l'art de l'origami de manière remarquable dans les bâtiments avec des doubles façades cinétiques telles qu'Al Bahar Towers de Aedas.

Ce projet, inauguré en 2012, présente un système d'ombrage actif intégré à une façade double peau. Il s'agit d'un module triangulaire de 6 faces qui se répètent sur cette façade avec un traitement paramétrique pour protéger le bâtiment des radiations solaires et même des Haboob (tempêtes de sable). La façade est interactive et intelligente, la géométrie de ces modules avait la possibilité de bouger pour contrôler les rayons entrants du soleil avec une grande sensibilité établie par un système de capteur. (Cf. Figure 4.6)

Le passage géométrique de la forme fermée vers la forme ouverte donne un aspect archi-

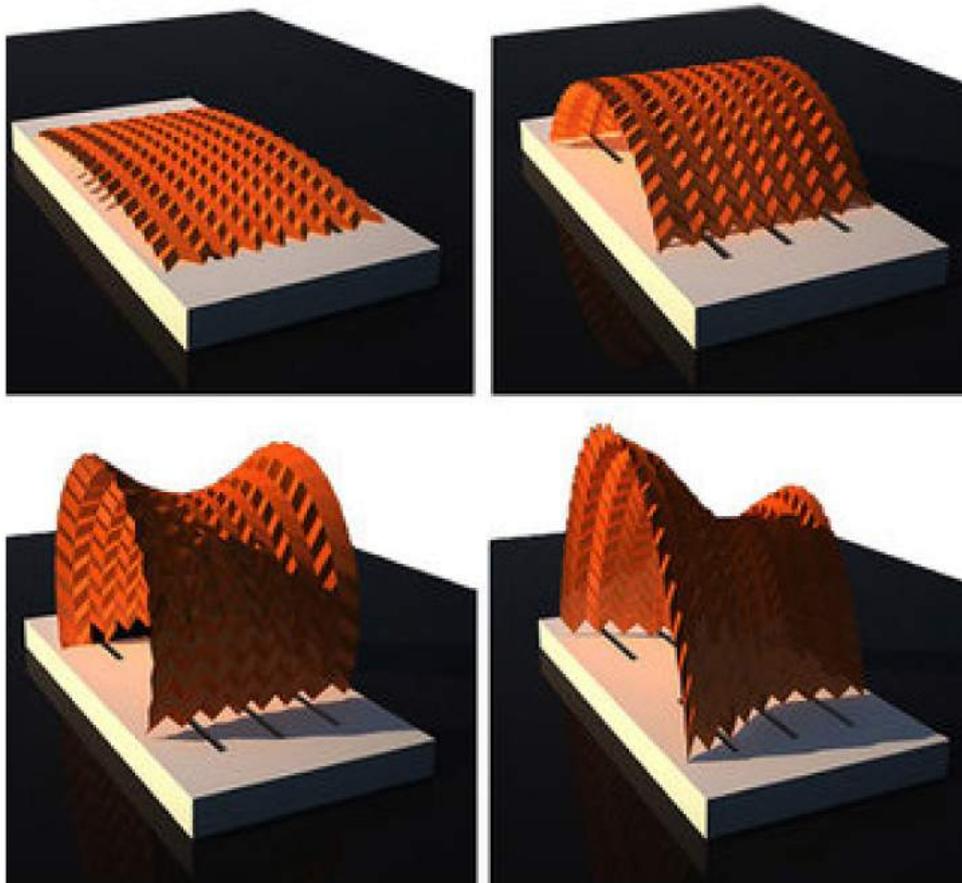


FIGURE 4.5 – Kolarevic et Malkawi, 2005

Source : KOS - Kinetic Origami Surface, 2014

tecturale nouveau et innovant, ce qui a intéressé plusieurs architectes et a rendu le projet une icône des bâtiments les plus innovants encore aujourd'hui. Le projet a remporté plusieurs prix grâce à son architecture interactive qui est devenue l'une des solutions technologiques les plus recherchées pour viser à trouver le confort intérieur. (Cf. Figure 4.7)

Les exemples de structures architecturales cinétiques sont de plus en plus nombreux, et présentent un grand potentiel d'exploration par la recherche en architecture. Le développement croissant de capteurs et d'actionneurs dans les contextes domestiques conduit les architectes et les concepteurs à explorer, réfléchir et concevoir des systèmes architecturaux intelligents et adaptatifs.

### **Forme et géométrie :**

L'art de l'origami et du kirigami, permettent à partir du pavage du plan d'effectuer des transformations géométriques par le pliage afin d'obtenir une forme tridimensionnelle. Ce processus de conception dépend des règles et des opérations géométriques à effectuer. Chaque pli a son rôle primordial dans ce jeu notamment dans l'architecture de la forme. Grâce à ces plis, des vides et des pleins se créent et de ce fait, la lumière et l'ombre jouent un rôle fondamental par la définition de cette tridimensionnalité. Grâce à ces propriétés

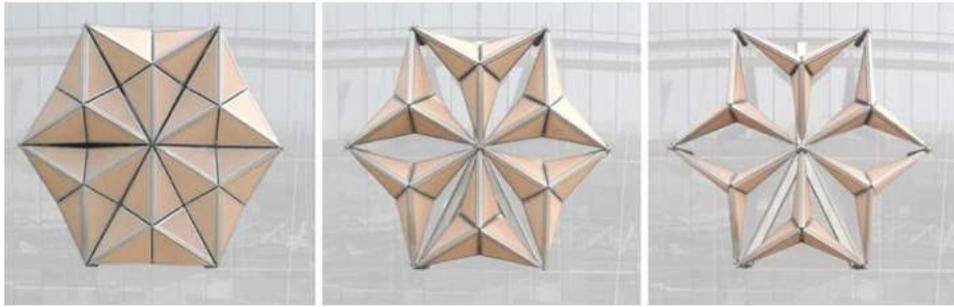


FIGURE 4.6 – Al Bahar Towers par Aedas, Abu Dhabi

Source : Photo de Aedas, 2012



FIGURE 4.7 – Al Bahar Towers par Aedas, Abu Dhabi

Source : Photo de Aedas, 2012

mathématiques et géométriques explorées de plus en plus par des mathématiciens, des physiciens et des architectes, l'art de l'origami fait partie de plusieurs recherches autour du monde et presque dans tous les domaines. Notamment pour l'architecture, cet art définit des nouveaux savoirs dans la structure et la forme.

Du point de vue structurel, les systèmes pliés ont également un grand potentiel ; dû à la mémoire des plis, le papier prend la position où il y a le minimum de tension ce qui l'oblige à prendre la forme souhaitée naturellement. Les plis travaillent comme un système ondulé qui rigidifie la structure et sa résistance à la flexion.

### La déployabilité :

Ce concept existe depuis longtemps. L'être humain utilisait ces capacités pour se déplacer, démonter et monter pour le transport. La déployabilité est un atout principal des origamis. Le pliage favorise le déploiement des modèles, permettant de contracter leur forme, améliorant ainsi leur transportabilité, leur montage et leur stockage. Cet aspect les rend très pratiques pour le domaine du bâtiment.

Selon *Kinetic Origami Surfaces From simulation to fabrication*, l'origami est classé parmi les techniques génératives des structures déployables. Cette étude propose une sous-catégorie qui s'appelle l'Origami Rigide, où le modèle géométrique final doit être le résultat du pliage d'un seul papier planaire. Ce système ne permet pas de déformer le matériau sauf au niveau des plis. Les plis étant comme des charnières entre les faces planes, ils peuvent être droits et ne peuvent pas changer de longueur pendant le processus de pliage. (Cf. Figure 4.8)

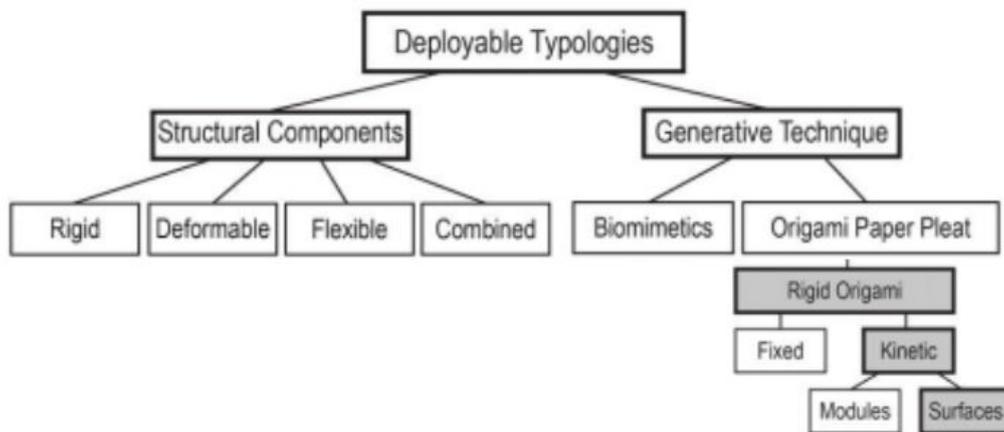


FIGURE 4.8 – Typologies déployables étendues par l'étude from Simulation to Fabrication

Source : Esther Rivas Adrover, 2015

### Règles et Théorèmes :

**Le théorème de Maekawa** affirme qu'un motif de pli est pliable à plat si, à chaque sommet intérieur, le nombre de plis de vallée (V) et de montagne (M) diffère de deux. (Cf. Figure 4.9)

$$\Sigma V - \Sigma M = \pm 2$$

**Le théorème de Kawasaki** affirme qu'un motif de pli est pliable à plat si, à chaque sommet intérieur, la somme des angles pairs et impairs définis par les plis est égale à 180°.

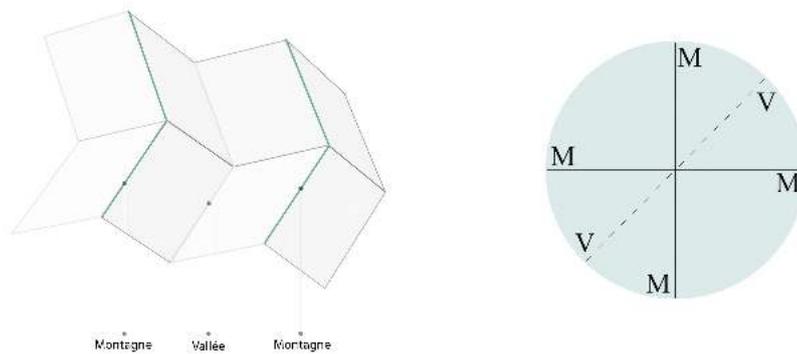


FIGURE 4.9 – Représentations graphiques du théorème de Maekawa

Source : Auteur

$$a_1 + a_3 \dots + a_{2n-1} = a_2 + a_4 \dots + a_{2n} = 180^\circ \text{ (Cf. Figure 4.10)}$$

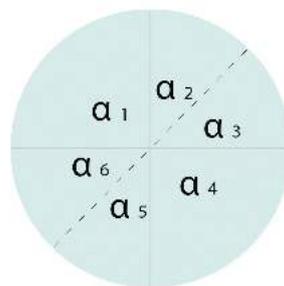


FIGURE 4.10 – Représentation graphique du théorème de Kawasaki

Source : Auteur

**La règle de la bi coloration** affirme que pour qu'un motif de pliage soit pliable à plat, il faut qu'il soit possible de colorer chaque face du motif de pliage de manière à ce que deux faces de la même couleur ne partagent jamais un pli. (Cf. Figure 4.11)

### 4.2.3 L'origami rigide :

Nous pouvons classer l'origami rigide en 3 groupes :

- L'origami statique
- Le déployable fixe
- Le déployable cinétique

**L'origami statique :** Ce type d'origami concerne la morphologie générale d'un bâtiment qui, à la fin de la construction aura une géométrie bien définie et non modifiable. Le choix de l'origami statique se fait selon des raisons structurelles ou esthétiques. C'est un choix d'une seule position parmi différentes possibilités, la géométrie choisie restera fixe après la fin de la construction.

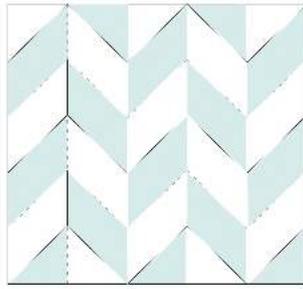


FIGURE 4.11 – Représentation graphique de la règle de la bi coloration

Source : Auteur

**Le déployable fixe :** Ce concept tire plus d'avantage des capacités morphologiques et géométriques de l'origami grâce à la déployabilité d'un plan vers une géométrie plus complexe. Les surfaces origamiques peuvent être montées et démontées dans des sous-systèmes structuraux, elles peuvent être aussi facilement stockées ou transportées grâce à leur déployabilité naturelle. Il existe plusieurs exemples de cette utilisation de l'origami rigide. En effet, en 2007, Miwa Takabayashi a conçu Packaged, un petit pavillon de carton ondulé destiné à être utilisé dans un centre commercial. (Cf. Figure 4.12)



FIGURE 4.12 – Pavillon Pakaged par Miwa Takabayashi

Source : <https://www.whskinner.co.uk/>

En 2008, Mats Karlsson a créé un tunnel translucide appelé Xile, de 35 mètres de long pour relier deux centres commerciaux. (Cf. Figure 4.13) David Penner a conçu la Corogami Folding Hut en 2010, une cabane pliable pour le patinage sur glace, fabriquée en polypropylène à double paroi. (Cf. Figure 4.14)

Plus récemment, en 2014, les étudiants de l'université de Californie du Sud ont réalisé un pavillon en polycarbonate qui occupe une surface de 15m x 3m et mesure 3m de haut. (Cf. Figure 4.15)

Tous ces exemples sont capables de se soutenir eux-mêmes sans l'ajout de systèmes structurels, grâce à la rigidité du matériau principal et de la géométrie origami choisie.



FIGURE 4.13 – Xile par Mats Karlsson, 2008, FIGURE 4.14 – Corogami Folding Hut par David Penner, 2010

Source : <https://www.dezeen.com/>

Source : <https://www.pleatfarm.com/>



FIGURE 4.15 – Glass Pavilion University of Southern California

Source : <https://www.arch2o.com/>

**Le déployable cinétique :** Ce système permet de profiter de toutes les capacités de l'origami rigide. Ce qui explique sa présence dans plusieurs outils, modèles, équipement et projets de domaines différents. On trouve par exemple, les murs reconfigurables, les installations réactives et les systèmes d'ombrage actif. Évidemment, ce concept permet aux designers non seulement d'avoir une architecture transformable mais aussi d'avoir la capacité d'interagir avec l'environnement et les exigences des usagers.

En 2011, David Letellier a exposé le modèle Versus, deux modules de fleurs communicatifs en origami placés sur des murs opposés qui réagissaient au son et communiquaient constamment entre eux : "À intervalles réguliers, chaque sculpture produit un son, simultanément enregistré et analysé par la sculpture opposée, qui se déplace alors en fonction des fréquences de ce son. Comme une boucle de rétroaction, elle rejoue ensuite le son enregistré, avec les erreurs et les perturbations provoquées par l'espace réverbérant et les visiteurs. En intervenant dans cette conversation, le spectateur devient un acteur, car il dégrade la communication par sa présence et les bruits qu'il produit. Comme les panneaux vont et viennent à un rythme déterminé par le son ambiant, ils créent une interaction non immédiate, où les imperfections de la reproduction deviennent des éléments créatifs."<sup>4</sup>

La forte interaction avec le visiteur, par les biais du son qui se propage dans l'espace quel que soit sa source (du visiteur; le son des pas, sa voix..., ou de la structure) crée une discussion inattendue avec l'installation, comme si l'objet était vivant, avec des sens comme l'être humain. (Cf. Figure 4.16)

Auxetic Origami de Christopher Connock et Amir Shahrokhi, exposé à Yale université aux États-Unis en 2011, était une structure composée de 16 modules semblables à des fleurs qui réagissaient au niveau de lumière ambiante en s'ouvrant ou en se fermant. En se basant sur une étude faite sur le comportement de la plante Oxalis, les deux chercheurs ont développé une surface réactive qui a la capacité de changer la forme suivant le niveau de lumière. La géométrie était intéressante surtout pour le niveau de simplicité de mouvement et l'optimisation de nombre des actionneurs pour la transformation géométrique. (Cf. Figure 4.17)

Fishtnk a créé la première version du Tunable Sound Cloud en 2010, une surface qui se modifie afin d'améliorer les performances acoustiques des espaces. Dans le même but, David Letellier a créé Tessel, également en 2010. Une surface similaire, appelée la chambre résonante, qui a été développée en 2012 par RVTR en partenariat avec ARUP acoustics. Resonant Chamber est un système d'enveloppe intérieure qui déploie les principes de l'origami rigide pour transformer l'environnement acoustique grâce à des technologies spatiales, matérielles et électroacoustiques dynamiques. Le projet s'est développé de manière itérative, à la fois sous forme de tests informatiques et d'installation de prototypes à grande échelle. Trois



FIGURE 4.16 – Versus, David Letellier, 2011

Source : <https://cargocollective.com/>

4. Source : <https://cargocollective.com/> et traduit avec [www.DeepL.com](http://www.DeepL.com)

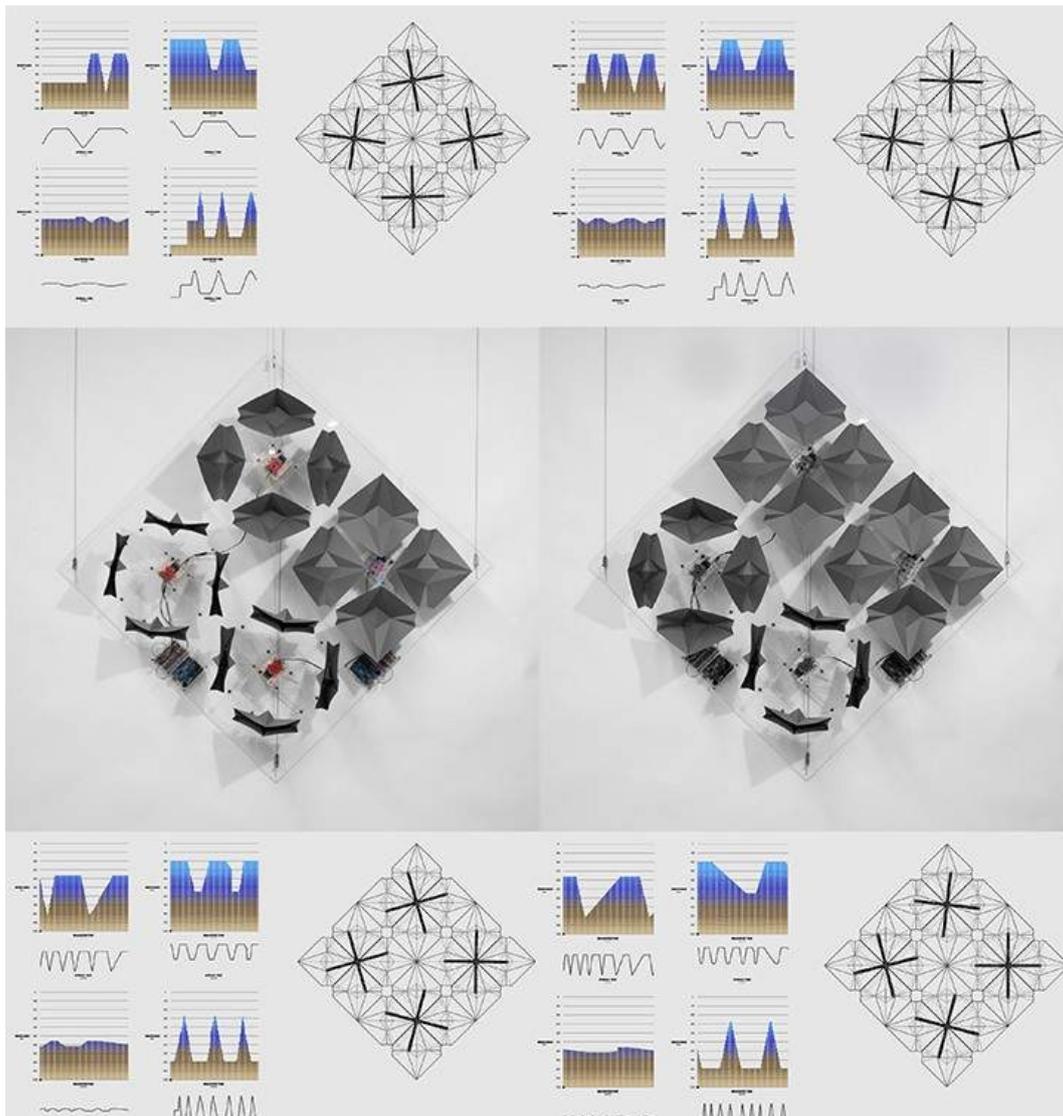


FIGURE 4.17 – Auxetic Origami Surface par Amir Shahrokhi, 2011 à l'université de YALE

Source : <http://amirshahrokhi.christopherconnock.com/>

axes de recherche ont été approfondis, les géométries de surface dynamiques, les systèmes de matériaux performants et la mise en marche avec des réponses variables. (Cf. Figure 4.18)

"Le contrôle dynamique simultané de l'exposition des matériaux et des configurations géométriques par le biais d'une déformation superficielle actionnée offre un nouveau modèle d'ajustement des environnements acoustiques. Bien qu'il existe des précédents dans le contrôle de la réponse tardive d'une pièce par l'utilisation de systèmes permettant de contrôler la hauteur ou l'orientation d'un réflecteur de plafond, l'utilisation d'un système cinétique pour contrôler la courbure du front d'onde, le niveau et le moment d'arrivée des premières réflexions est encore sans précédent dans la recherche acoustique et dans l'étude des architectures robotiques et des enveloppes réactives."<sup>5</sup>

5. Source : <http://www.rvtr.com/> et traduit avec [www.DeepL.com](http://www.DeepL.com)



FIGURE 4.18 – Resonant Chamber par RVTR en partenariat avec ARUP acoustics, 2012

### 4.3 Expérimentation des géométries

Dans ce chapitre, nous analysons différentes géométries à travers des expérimentations des maquettes afin d'évaluer les effets tridimensionnels et spatiaux de l'ombre. Le choix des géométries avant la phase d'expérimentation s'est fait par l'analyse et l'observation des potentiels de pavage, en ayant prévu les possibilités de séquences de contractions formelles qui sont primordiales pour le contrôle des radiations dans la phase d'étude d'ensoleillement.

Enfin, à l'aide de la manipulation des maquettes physiques qui donnent la possibilité d'analyser les futurs potentiels de chaque forme proposée, se déroulera l'évaluation géométrique dans une matrice permettant une évaluation qualitative des morphologies étudiées.

#### 4.3.1 Géométries étudiées

Les kaléïdocycles sont des anneaux de tétraèdres connectés entre eux, deux à deux, par leurs arêtes de même longueur. Ils peuvent être réguliers ou irréguliers. Les kaléïdocycles réguliers sont les kaléïdocycles dont les tétraèdres sont réguliers (leurs faces sont des triangles équilatéraux). Ils ne peuvent tourner sur eux-mêmes que si leur nombre de tétraèdres réguliers est supérieur à 6. Les kaléïdocycles irréguliers sont ceux dont les tétraèdres sont irréguliers (leurs faces ne sont pas des triangles équilatéraux).

Le flexaèdre qui est un polyèdre flexible de 12 faces, montre le potentiel de l'hexagone à former une surface de pavage bien structurée grâce à sa transformation séquentielle. C'est le passage d'une surface en 3 dimensions vers un pavage en 2 dimensions.

L'étoile à 8 branches a une structure basée sur la figure géométrique du double carré. Elle a une forme simple, mais avec l'origami elle semble très prometteuse.

**Les kaléidocyles :** La première morphologie étudiée proposée est formée d’anneaux rotatifs de tétraèdres appelés kaléidocyles, bien connus des mathématiques récréatives dans le cadre d’explorations d’origami volumétriques à pliage 3D (Fowler & Guest, 2005). Gao & Ramani ont développé un concept d’unité structurelle de base tétraédrique pour permettre de nouvelles formes de pliage en 3D.

De nombreuses explorations d’origami des peaux à base triangulaire ont été testées, Lee & Leounis, en 2011 ont présenté un outil de manipulation de surface qui peut transformer l’arrangement des surfaces planes de pliage, tandis que Crawford en 2010 a étudié une famille de géométrie de pliage pour fournir une ventilation à l’aide d’outils de modélisation et simulation paramétrique. La face extérieure des écrans d’origami présente une solution efficace pour fournir une performance d’éclairage naturel appropriée (Elghazi et al., 2014). Il agit comme un écran d’ombrage sur la face extérieure des systèmes de façade hybrides à double peau dans les climats chauds et arides, couplés à un système de mur-rideau haute performance comme couche intérieure de la façade (Boake, 2014). (Cf. Figure 4.19 et Cf. Figure 4.20)

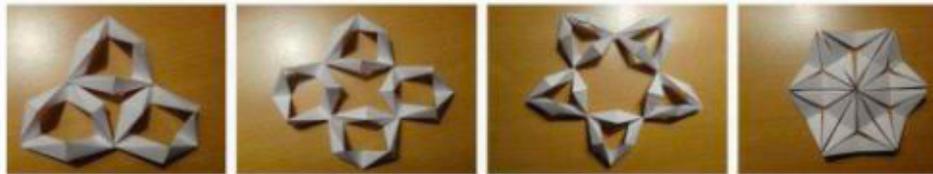


FIGURE 4.19 – Gao & Ramani, Exploration de la structures des unités de tétraèdres basiques



FIGURE 4.20 – Gao & Ramani, Exploration de la structures des unités de tétraèdres basiques

Source : From Simulation to Fabrication

**Le flexaèdre :** La possibilité du flexaèdre se résume dans la capacité des hexagones de projeter les cubes qui eux gardent l’affinité des angles entre les figures géométriques. Autrement dit, les hexagones pavent le plan parce qu’ils sont une projection des cubes qui eux pavent l’espace.

Le flexaèdre a une autre caractéristique géométrique fascinante, sa 4ème transformation séquentielle est un dodocaèdre rhombique, il se compose de 12 faces de losanges. Si on analyse cette forme géométrique on voit que c’est la projection hexagonale de l’hyper cube, notamment celui qui se caractérise de sa 4ème dimension. On peut voir clairement le cube circonscrit dans le dodocaèdre. Donc c’est la projection 3D de l’hyper cube dans l’espace de 4D. Et autrement dit, si on assemble plusieurs dodocaèdres rhombique, on peut les empiler les uns sur les autres et ils s’emboîtent parfaitement sans laisser de fentes ou de trous. (Cf. Figure 4.21)

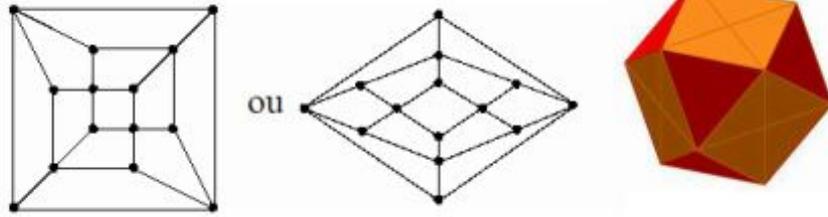


FIGURE 4.21 – Graphe et 3d du dodocaèdre rhombique

Source : <https://mathcurve.com/>

**L'étoile de 8 ou l'octagramme :** L'étoile à 8 branches ou l'octagramme est le plus ancien symbole utilisé dans les religions. Cette étoile représentait un corps céleste en Mésopotamie, ou bien le soleil rayonnant dans d'autres cultures. L'octagramme était aussi une figure symbolique associée à des déesses comme Ishtar... Dans l'Islam, il est dit que huit anges supportent le trône de Dieu. Plusieurs mosquées ont un plan fondé sur le chiffre 8, et notamment la mosquée Al-Aqsa ou du rocher, qui se trouve à Jérusalem sur l'emplacement supposé du temple de Salomon. Formé par deux carrés croisés, avec un cercle au centre, Rub El Hizb (en arabe « quart de section ») est un symbole islamique.

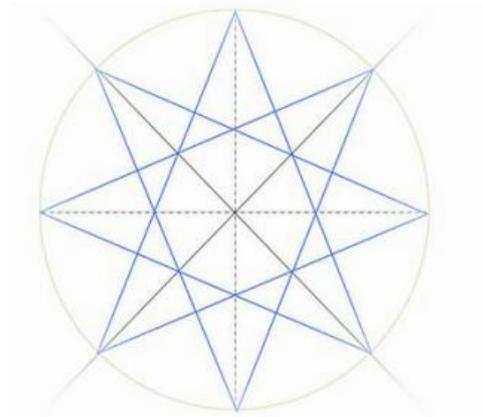


FIGURE 4.22 – Graphe de l'octogramme

Source : <https://www.seren-eirian.fr/>

À côté de son importance historique et religieuse, cette étoile présente un cas d'étude intéressant grâce à ces capacités géométriques associées à l'art de l'origami. L'octagramme a une superbe simplicité géométrique de deux carrés superposés qui créent une relation géométrique étendue dans le pattern, cela facilite la création du prototype et favorise sa maniabilité. (Cf. Figure 4.22)

### 4.3.2 Manipulation & Interprétation

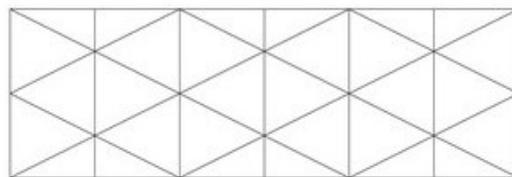


FIGURE 4.23 – Patron d'un kaléidocycle

Source : Auteur

---

**Les kaléidocyles :** À partir du patron représenté, nous avons testé cette géométrie en maquette physique, pour la manipuler et pour essayer de comprendre son comportement géométrique et ses caractéristiques, ses points forts et ses points faibles. Les kaléidocyles ont des potentiels au niveau de liberté géométrique, notamment le changement séquentiel infini avec des rotations de ses composantes. Néanmoins, ces rotations s'avèrent autour de plusieurs axes relatifs, ce qui engendre une certaine complexité au système. Les kaléidocyles sont des modules géométriques fascinants avec leurs transformations géométriques, mais cette transition nécessite un système mécanique très complexe. (Cf. Figure 4.24)

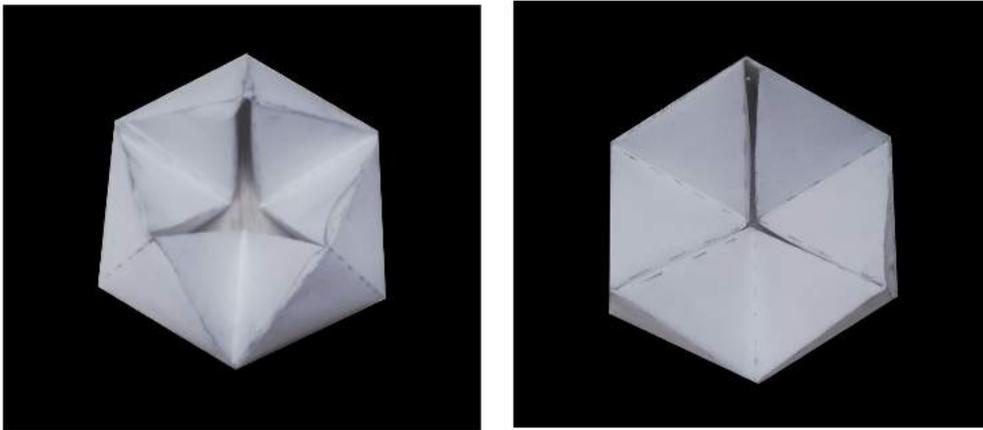


FIGURE 4.24 – Maquette de recherche d'un kaléidocycle

Source : Auteur

**Le flexaèdre :** La figure présente une maquette physique faite pour tester le comportement de cette géométrie et pour explorer ses séquences. La transition n'était pas continue comme on a vu dans les kaléidocycles, mais la séquence était plus claire et contrôlable. Cependant cette géométrie le désavantage et le rend instable durant la transition à cause de nombreux axes de rotations. (Cf. Figure 4.25)

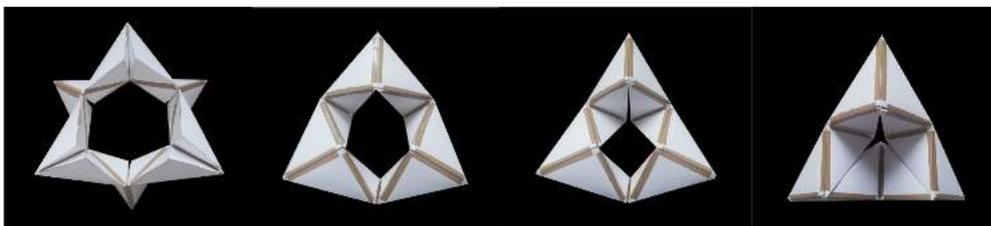


FIGURE 4.25 – Maquette de recherche d'un fléxaèdre

Source : Auteur

**L'Etoile de 8 ou l'octagramme :** L'alliage de l'octagramme avec l'art de l'origami a créé une figure plane qui se déploie dans l'espace avec les traces de l'étoile de 8 branches

en respectant les 3 règles de l'origami rigide pour donner une transition stable et remarquable. Cette transformation montre les potentiels de contrôle et du mouvement et surtout de simplicité pour des futures réalisations grâce à sa géométrie plane et à ses différents points fixes. (Cf. Figure 4.26)

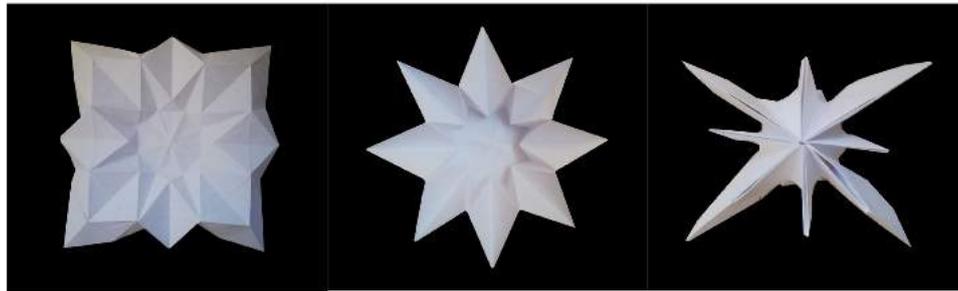


FIGURE 4.26 – Maquette de recherche d'un octagramme

Source : Auteur

### 4.3.3 Matrice géométrique

Le kaléidocycle, le fléxaèdre et l'octagramme fonctionnent sur le même principe avec des séquences différentes. (Cf. Figure 4.27)

Géométrie	Points de rotation Fixes / Mobiles	Typologie de mouvement	Retraction & Sequences	
	 ● Points de rotation			
	 ● Points de rotation			
	 ● Points de rotation ■ Points fixes ▲ Points de rotation & de translation			

FIGURE 4.27 – Matrice géométrique

## 4.4 Modélisation et évaluation des apports solaires sur un cas d'étude

### 4.4.1 Amorce choix du site

Le choix du site est primordial dans cette recherche. Nous avons opté à choisir deux sites de climat différent mais qui se caractérisent par des pics de température et des canicules pendant la saison d'été. Nous avons trouvé le climat parisien très compatible avec notre sujet de recherche. En effet, le climat de Paris devient de plus en plus chaud en été en raison du réchauffement climatique, et les journées estivales où la température maximale est

---

supérieure à 25°C augmentent de 10 journées par an à 60 journées par an. Effectivement, ces informations nous guident à poser plusieurs questions dont la suivante : comment on peut faire face à ces hausses de température à Paris ?

Nous avons aussi choisi de travailler sur un climat méditerranéen qui est plus chaud et plus humide que le climat parisien. Le climat de Tunis est dit tempéré chaud. Il bénéficie de températures douces entre 12°C en hiver et 30°C en été et peuvent grimper facilement avec l'effet de sirocco (vent chaud qui vient du désert) jusqu'à 40°C. Ce climat est connu aussi pour le soleil fort d'été et ses rayonnements insupportables. Cela nous offre un site idéal pour étudier notre géométrie. Effectivement, choisir deux sites avec deux climats complètement différents c'est préférable pour voir dans quel climat ce système de double façade est le mieux adapté pendant la période estivale.

#### **4.4.2 Géométrie simulée**

L'octograme présente une géométrie optimale pour un contrôle des radiations solaires. Surtout grâce à ses potentiels de rétractation d'une forme qui bloque 100% les radiations à une forme qui s'ouvre à 80% de sa surface. Tout ce mouvement se développe en passant par des angles d'inclinaison de la géométrie par rapport à surface perpendiculaire.

#### **4.4.3 Evaluation apport solaire**

On peut imaginer cette géométrie comme étant un module dans la paroi extérieure d'une façade double peau. En effet, ce module va prendre la taille de 1m x 1m et se développe sur toute la paroi. À travers les données environnementales des sites évoqués précédemment, et à l'aide de l'outil de simulation LADYBUG dans GRASSHOPPER, nous avons pu utiliser des données comme l'orientation, la radiation, l'ensoleillement... dans une simulation de la géométrie d'octograme (étoile de 8). Nous avons opté pour des simulations de radiations et d'ombrage selon les degrés d'inclinaisons de la géométrie possibles entre 0° et 90° et pour chaque site en choisissant la journée le 21 juin 2020, la plus longue de l'année pour les deux contextes. (Cf. Figure 4.28)

#### **4.4.4 Tableaux de résultats**

Avec le changement de l'ouverture du module progressivement de la forme ouverte vers la forme fermée, nous pouvons observer l'impact sur la radiation solaire et sur les ombres dans les deux différentes régions. Effectivement, on peut voir des différences sur la totalité des séquences choisies par l'angle d'ouverture, au niveau des rayonnements reçus en climat chaud méditerranéen par rapport à des rayonnements plus faibles en climat parisien même pendant l'été. Néanmoins, les graphiques des deux analyses de radiation et d'ombres pour les deux régions se ressemblent avec quelques différences liées aux sites choisis et de leurs contextes climatiques différents. (Cf. Figure 4.29)

Pour visualiser plus la différence de comportement de la géométrie entre les deux sites et aussi par rapport aux différentes heures de la même journée le 21 juin 2020, nous avons décidé de faire une simulation de radiation cumulée par heure pendant une période de journée sans aucun système d'ombrage et pour chaque site. A partir de ces valeurs d'énergie de radiation intégré dans le temps, nous pouvons la valeur maximale entre les deux régions. Cela, peut nous aider à déduire le changement morphologique approprié directement à la radiation cumulée et le comparer dans les deux régions. (Cf. Figure 4.30)

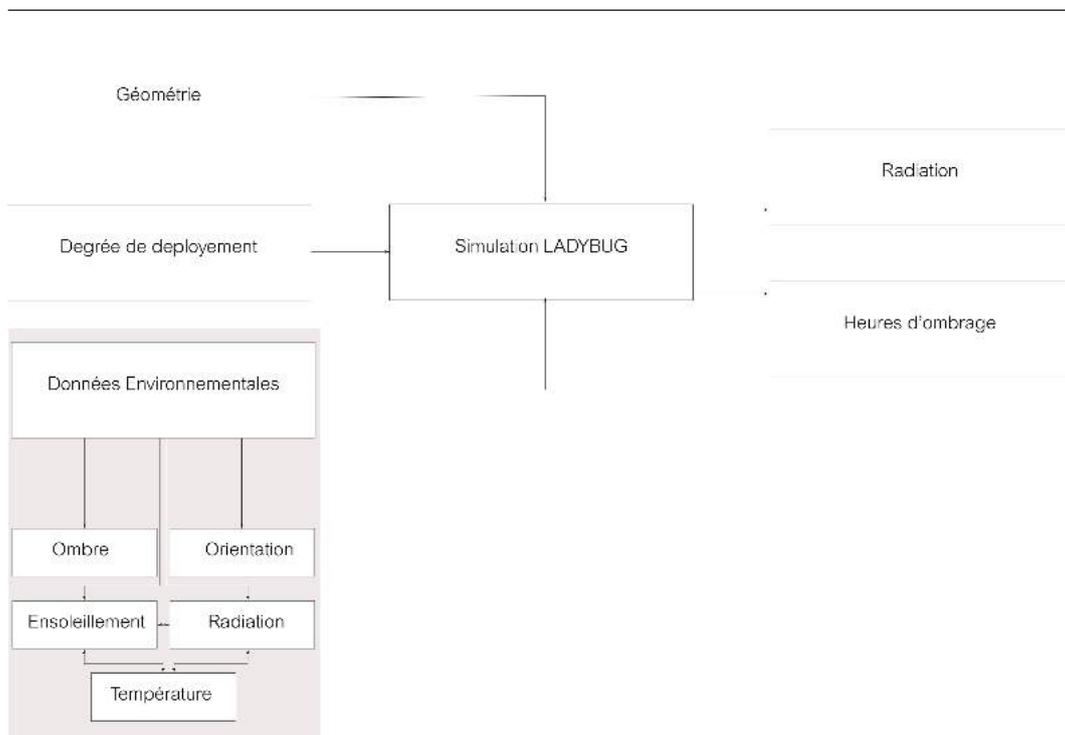


FIGURE 4.28 – Diagramme de workflow d'évaluation solaire

Source : Auteur

## 4.5 Conclusion

Cette recherche a pu montrer l'impact du mouvement morphologique d'un module intégré dans une façade, sur les radiations solaires et les ombres, à travers une manipulation morphologique et une étude approfondie sur les capacités géométriques de trois modules différents. Ces modules, les kaléidocycles, le flexaèdre et l'octograme, semblent des bonnes pistes de recherche qui méritaient d'être étudiées. Avec des maquettes d'études, nous avons pu constater des capacités séquentielles dans chacune des géométries. Ces capacités sont représentées dans une matrice géométrique. Cette matrice, illustre aussi les typologies de mouvement. À travers cette démarche nous avons constaté que la recherche géométrique présente un outil clé pour les systèmes d'ombrage actifs, afin d'avoir des séquences géométriques qui répondent aux besoins de confort thermique.

Nous avons testé les capacités de protection vis-à-vis radiations solaires, d'un de ces trois modules à l'aide des outils de simulations numériques GRASSHOPPER et LADYBUG dans deux sites de contextes climatiques différents. Ces simulations ont montré l'impact du mouvement morphologique d'un module intégré dans une façade sur les radiations solaires et les ombres. À l'aide des calculs de radiation cumulée par heure, nous avons pu démontrer les séquences morphologiques appropriées par heure dans une journée choisie et pour chacun des deux sites. Néanmoins, ces séquences pourraient être plus optimisées si l'on prend en considération également la température intérieure.

Quelques futures simulations pourraient être faites à l'aide de l'outil HONEY-BEE pour calculer les performances énergétiques liées à la température. À l'aide de cette méthodologie de recherche, d'autres modules pourraient être analysés géométriquement et numériquement.

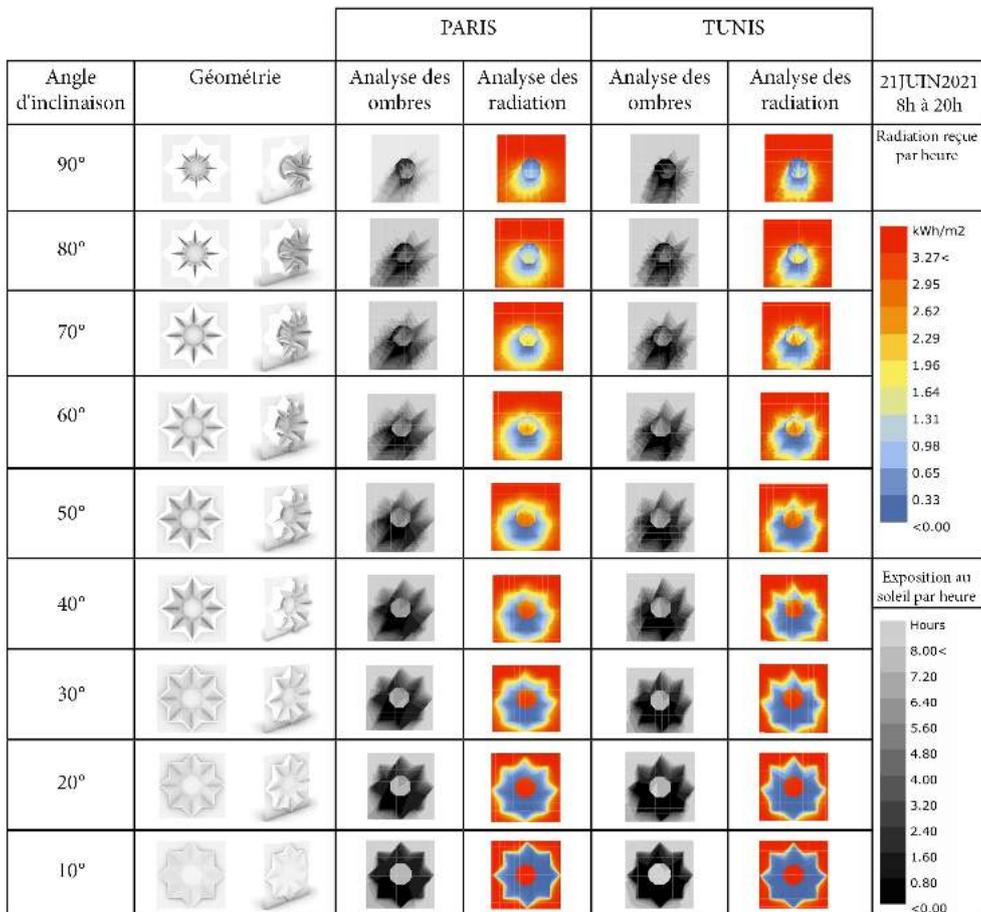


FIGURE 4.29 – Tableau 1 de simulation de radiation et d'ombre

Source : Auteur

Tunis			Paris		
Heure	Radiation Cumulée Par heure kWh/m <sup>2</sup>	Angle d'ouverture	Heure	Radiation Cumulée Par heure kWh/m <sup>2</sup>	Angle d'ouverture
10h->11h	0.497642	81,5°	10h->11h	0,315662	88,52°
11h->12h	0.592995	79,85°	11h->12h	0.44753	83,21°
12h->13h	0.713108	78,94°	12h->13h	0.604625	80,6°
13h->14h	1.13235	56,37°	13h->14h	0.837401	73,59°
14h->15h	1.883545	46,66°	14h->15h	1.161835	54,37°
15h->16h	2.637505	21,34°	15h->16h	1.445913	36,29°
16h->17h	3.007162	14,9°	16h->17h	1.66351	32,64°
17h->18h	2.667954	17,74°	17h->18h	1.682436	31,57°
18h->19h	1.559305	33,89°	18h->19h	1.382695	38,97°

FIGURE 4.30 – Tableau 2 de simulation de radiation

Source : Auteur

# Bibliographie

- [1] Joud AL DAKHEEL et Kheira TABET AOUL : Building applications, opportunities and challenges of active shading systems : A state-of-the-art review. *Energies*, 10, Octobre 2017.
- [2] G. BALDINELLI : Double skin façades for warm climate regions : Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Building and Environment*, 44:1107–1118, Juin 2009.
- [3] Laura BELLIA, Concetta MARINO, Francesco MINICHELLO et Alessia PEDACE : An overview on solar shading systems for buildings. *Energy Procedia*, 62:309–317, 2014.
- [4] Matthew GARDINER, Roland AIGNER, Hideaki OGAWA et Rachel HANLON : Fold mapping : Parametric design of origami surfaces with periodic tessellations. *In 7th Origami Science Mathematics and Education Conference*, Septembre 2018.
- [5] Milton R. GARZA, Edwin PERAZA-HERNANDEZ et Darren J. HARTL : Self-folding origami surfaces of non-zero gaussian curvature. *Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, Mars 2019.
- [6] RVTR Design Research GROUP : Resonant chamber. <http://www.rvtr.com/projects/resonant-chamber>, 2011-2013.
- [7] Fawwaz HAMMAD et Bassam ABU-HIJLEH : The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building. *Energy and Buildings*, 42:1888–1895, Octobre 2010.
- [8] Pekka HUOVILA : *Buildings and Climate Change : Status, Challenges and Opportunities*. United Nations Environment Program (UNEP), 2007.
- [9] Dennis JOHANSSON : Active solar shading. *Building Simulation*, 2009.
- [10] Jacob B. LAUSTSEN, Inês D. P. SANTOS, Svend SVENDSEN, Steen TRABERG-BORUP et Kjeld JOHNSEN : Solar shading system based on daylight directing glass lamellas. *Technical University of Denmark (DTU)*, 1:111–118, 2008.
- [11] David LETELLIER : Versus. <https://cargocollective.com/davidletellier/VERSUS>, 2011.
- [12] Filipa OSÓRIO, Alexandra PAIO et Sancho OLIVEIRA : Kos - kinetic origami surface. *Proceedings of the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, pages 201–210, 2014.
- [13] Filipa OSÓRIO, Alexandra PAIO et Sancho OLIVEIRA : Kinetic origami surfaces : From simulation to fabrication. *CAAD Futures*, 2017.

- 
- [14] Hassan RADHI, Stephen SHARPLES et Fayze FIKIRY : Will multi-facade systems reduce cooling energy in fully glazed buildings? a scoping study of uae buildings. *Energy and Buildings*, 56:179–188, Janvier 2013.
- [15] Sue ROAF, David CRICHTON et Fergus NICOL : *Adapting Buildings and Cities for Climate Change*. Elsevier, Italy, 2009.
- [16] Amir SHAHROKHI : Auxetic origami surface [aos-1]. <http://amirshahrokhi.christopherconnock.com/2011/12/11/auxetic-origami-surface/>, 2011.
- [17] A. WAGDY, Y. ELGHAZI, S. ABDALWAHAB et A. HASSAN : The balance between daylighting and thermal performance based on exploiting the kaleidocycle typology in hot arid climate of aswan. *AEI 2015 : Birth and Life of the Integrated Building - Proceedings of the AEI Conference 2015*, Mars 2015.

# Façade végétale : une solution pour la réduction des besoins énergétiques de refroidissement de bâtiment ?

Par Ksenia Konstantinova <sup>1</sup>

*Le secteur du bâtiment consomme environ 44% d'énergie en France. La réglementation énergétique 2020 fixe un objectif de consommation totale positive pour les bâtiments neufs plus contraignant. Pour atteindre cet objectif, les directives visent en premier lieu les enveloppes. Le Plan Biodiversité de Paris 2018-2024 soutient l'installation de façades et de murs végétaux comme un outil écologique dans la lutte au changement climatique. Dans ce contexte, les systèmes verticaux végétaux peuvent être considérés comme une solution architecturale durable d'économie d'énergie ainsi qu'un outil de préservation de la biodiversité en milieu urbain. L'analyse comparative des études précédentes portant sur les performances énergétiques des façades végétales a été faite pour définir les variables qui l'influencent et les outils numériques utilisés pour cette simulation. Le but de ce travail a été de réaliser une simulation d'un cas d'étude simple afin d'évaluer les gains énergétiques que la mise en place d'une façade végétale peut apporter. La simulation a été faite sur un bâtiment à un étage avec et sans murs végétaux à l'aide du logiciel OpenStudio, l'interface d'EnergyPlus. Elle a montré une économie des charges énergétiques d'environ 9% et 2% pour ce bâtiment, placé à Singapour et à Paris, respectivement.*

*Mots-clés : façade végétale ; mur végétal ; économie d'énergie ; performance énergétique ; charges énergétiques*

---

1. Née à Saint-Petersbourg en 1986, Ksenia Konstantinova a déménagé en France en 2014. Après ses études en Tourisme urbain à l'Université Côte d'Azur, elle a complété le Licence et Master à l'ENSA Paris Malaquais en 2022. Elle travaille actuellement dans l'agence d'architecture Les Particules à Paris.

## 5.1 Introduction

Aujourd'hui le secteur du bâtiment consomme 44% d'énergie en France. Chaque année, il émet plus de 123 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> ce qui en fait l'un des domaines clés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la transition énergétique. La réglementation thermique française (RT2012) a placé l'objectif d'une consommation totale d'énergie à maximum  $50\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ . Face aux impacts du secteur du bâtiment sur l'économie et l'environnement, la nouvelle réglementation thermique RE 2020 fixe un objectif la consommation totale positive pour les bâtiments neufs.

Pour atteindre cet objectif, les directives visent en premier lieu les enveloppes, parties du bâtiment qui régulent le transfert thermique entre environnement externe et interne. Ce transfert peut être simulé à l'étape de la conception afin de quantifier les besoins énergétiques de bâtiment.

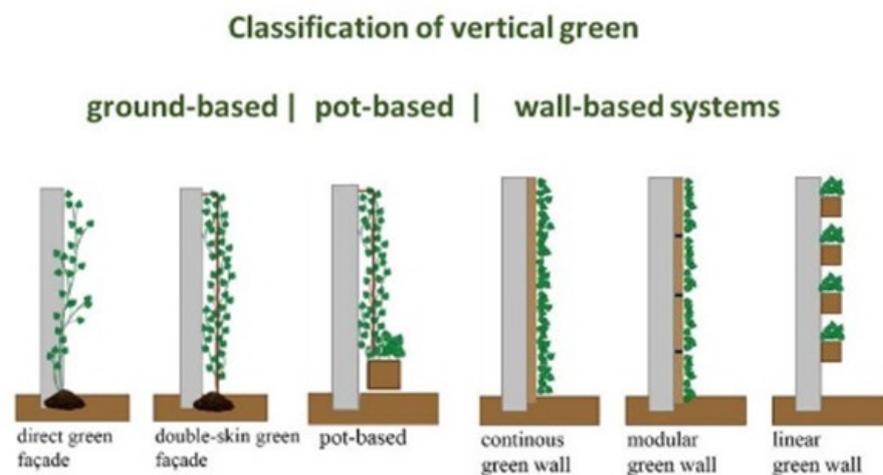


FIGURE 5.1 – Classification de systèmes verticaux végétaux avec les trois types de façade végétale puis les trois types de murs végétaux

Pendant plusieurs décennies, les villes densifient plus en plus et avec l'envahissement du béton il y a les conséquences des îlots de chaleur urbaine et une réduction de la biodiversité. Le Plan Biodiversité de Paris 2018-2024 incite la présence du végétal comme un enjeu écologique majeur dans la lutte contre le changement climatique. Le renforcement de la nature dans la ville passe par la végétalisation des murs publics et privés. Dans ce contexte, la façade végétalisée peut être considérée comme une solution architecturale durable d'économie d'énergie ainsi qu'un outil de préservation de la biodiversité dans le milieu urbain. La façade végétale est une structure verticale végétale installée sur le mur extérieur des bâtiments. Les Systèmes Verticaux Végétaux (SVV) peuvent être classifiés selon leur typologie, leur composition et leur système d'accrochage. Pérez, professeur de l'école polytechnique de l'Université de Lleida divise les SVV de bâtiments en deux catégories : façades végétales et murs végétaux. (Cf. Figure 5.1) Dans les façades végétales, les plantes grimpantes s'accrochent directement au mur ou à l'aide de structures de supports spéciaux, comme par exemple, les câbles. Les plantes sont principalement enracinées à la base de ces structures, dans le sol ou dans des jardinières intermédiaires. Les murs végétaux sont constitués de panneaux ou de feutres géotextiles, qui sont fixés sur un support vertical ou sur la structure du mur, comme par exemple, le mur végétal du musée du Quai Branly. Comme exemple du dernier système on retrouve l'Oasia Hôtel Downtown à Singapour, construit par Woha en 2016.

La façade végétale est un élément vertical qui participe activement au bilan énergé-



FIGURE 5.2 – Le mur végétal du musée du Quai Branly



FIGURE 5.3 – Oasia Hôtel par Woha

tique du bâtiment. La récente littérature montre un intérêt vers les façades végétales pour leurs capacités de réduction de l'énergie transmise à l'intérieur de bâtiment due à la couche d'isolation supplémentaire fournie par les plantes, à l'ombrage des façades et aux effets de refroidissement par évaporation de l'air ambiant. L'effet d'évapotranspiration représente l'avantage principale des façades végétales par rapport aux protections solaires ou à l'isolation des murs. Il s'agit d'un transfert d'eau dans l'atmosphère par les plantes, permettant de rafraîchir l'air environnement. Plusieurs recherches montrent les avantages de la façade végétale à différentes échelles. À l'échelle urbaine elle participe à la réduction de l'effet d'îlot de chaleur, à l'absorption des polluants et favorisant également l'infiltration des eaux de pluie.

À l'échelle du bâtiment la façade végétale peut réduire la demande d'énergie, améliorer un confort thermique et réduire le bruit extérieur. Par rapport aux toitures végétales, les murs ont une plus grande surface potentielle car dans les grands immeubles leur surface est toujours supérieure. De plus, en comparaison avec des autres systèmes végétales dans la ville, comme des pelouses, des arbres, pour l'installation des murs végétaux on n'a pas besoin d'une surface horizontale de la rue, qui est un élément précieux dans la ville dense. À l'échelle humaine, les plantes, au-delà de leur valeur esthétique, ont un impact bénéfique sur le bien-être psychologique et la santé.

Toutefois, la façade végétale reste une technologies assez peu répandue en architecture. La première raison étant les coûts d'installation et de maintien, dont souvent surpassent les avantages économiquement quantifiables. De ce fait, la façade végétale a besoin souvent de dizaines d'années pour avoir un retour de coût investi...

Dans certains cas, la façade végétale devient une forme de Greenwashing. Il s'agit d'un procédé de marketing pour créer une image écologique trompeuse d'entreprise. La façade végétale est utilisée dans ce cas-là comme une vitrine couvrant les autres buts, par exemple, un permis de construire ou une obtention de label écologique.

Du point de vue des concepteurs, il y a une difficulté liée à la complexité des simulations numériques permettant d'en quantifier les gains en termes énergétiques. Bien qu'aujourd'hui il y a une croissance exponentielle de programmes de modélisation, la simulation d'un mur végétal reste encore peu développée et elle n'est généralement pas incluse dans les logiciels commerciaux disponibles pour la simulation thermique. D'autre part, les logiciels de simulation ne sont pas toujours faciles à manipuler ou reportent des résultats peu précis.

Les bénéfices sociaux et environnementaux de la façade végétale ne sont pas facilement quantifiables à court terme. Cependant, la performance énergétique est une variable

qui peut être mesurée et peut justifier l'application de la façade végétale en architecture pour le rendre un outil passif de la réduction des besoins énergétiques de refroidissement de bâtiment. Dans cette recherche nous explorons l'impact de la façade végétale sur les besoins énergétiques de refroidissement de bâtiment. Quels outils peuvent simuler cet impact ? Quelles variables sont pris en compte par ces outils ?

Pour ce faire, dans une première partie, nous présentons les phénomènes de transfert thermique et d'évapotranspiration des plantes. Nous présenterons ensuite l'étude critique de la littérature existante, afin de mettre en lumière les limites et les potentiels des outils numériques utilisés et des expérimentations. Dans une deuxième partie, nous effectuerons une simulation de la performance énergétique de bâtiment avec et sans mur végétal. Nous argumenterons un choix de logiciel, décrirons la méthodologie utilisée et analyserons les résultats.

## 5.2 L'état de l'art

### 5.2.1 Les transferts thermiques dans les façades végétales

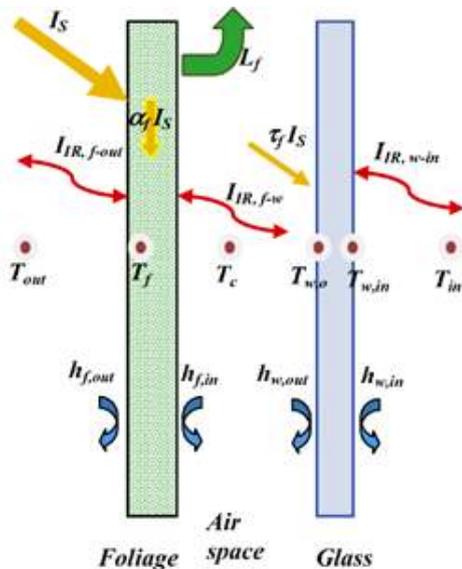


Fig. 1. Heat transfer mechanisms in the double facade with plants.

FIGURE 5.4 – Larsen S.F., Filippin S., Lesino G., Modeling double skin green facades with traditional thermal simulation software, 2015, p.4

de l'énergie absorbée est transformée en chaleur latente, expulsée par la transpiration ( $L_f$ ) des plantes. Une autre partie de l'énergie est transformée en chaleur sensible, qui augmente la température de feuille ( $T_f$ ). La chaleur est ainsi transférée par convection des deux côtés de la couche de feuillage à l'air ambiant ( $h_{f,in}/h_{f,out}$ ). Enfin, il faut prendre en compte l'échange d'énergie infrarouge entre la feuille et l'environnement ( $I_{IR,f}$ ).

Si entre les plantes et le mur il y a un substrat, ce dernier se comporte comme une couche de matériau isolant avec le passage d'énergie par conduction.

Le bilan énergétique par l'unité de la surface de feuillage peut être alors s'exprimé

La façade végétale est un élément vertical qui participe activement au bilan énergétique d'un bâtiment. Elle peut contribuer à réduire l'énergie transmise à l'intérieur de bâtiment due à la couche d'isolation supplémentaire fournie par les plantes, à l'ombrage des façades et aux effets de refroidissement par évaporation de l'air ambiant. Le dernier effet distingue davantage la façade végétale des protections solaires ou d'isolant de mur.

Afin d'effectuer le bilan énergétique, la façade végétale peut être considérée comme une "grande feuille", une couche de matériau, ayant l'épaisseur, la densité et la conductivité. Dans le transfert thermique de la façade végétale, plusieurs paramètres physiques, biologiques et ambiant sont à prendre en compte. (Cf. Figure 5.4)

Le rayonnement solaire ( $I_s$ ) qui touche les plantes est partiellement réfléchi, absorbé et transmis par le feuillage. Le feuillage est décrit par la réflectivité, l'absorptivité et la transmissivité. Une fraction

---

comme suit (eq.1), Larsen [?] :

$$\alpha_f I_s - h_{f,out}(T_f - T_{out}) - h_{f,in}(T_f - T_c) - q_{rad} - L_f = (\rho c_p)_f e_f \frac{dT_f}{dt}$$

Avec :

- $(\rho c_p)_f \cdot e_f \cdot \frac{dT_f}{dt}$  : énergie stockée dans les feuilles et branches, généralement négligée ;
- $\rho_f$  : densité de plante, [ $kg/m^3$ ];
- $c_{p,f}$  : chaleur spécifique à pression constante, [ $J/(kg K)$ ];
- $f$  : épaisseur d'une feuille, [ $m$ ].
- $\alpha_f$  : absorptivité solaire de feuilles;  $I_s$  : radiation solaire ;
- $h_{f,in}$  et  $h_{f,out}$  : coefficients de transfert de chaleur par convection entre le feuillage et la cavité d'air ;
- $T_f$  : température de la feuille ;
- $T_{out}$  : température extérieure de l'environnement ;
- $T_c$  : température de la cavité d'air entre la végétation et le mur de bâtiment ;
- $q_{rad}$  : le flux net infrarouge entre la végétation et les surfaces environnantes ;
- $L_f$  : la chaleur latente.

Stav Y. dans son étude (2012), a été prouvé que la quantité de refroidissement, le flux de chaleur et la réduction des températures ambiantes fournis par une façade végétale sont directement liés à *Leaf Area Index*. La *Leaf Area Index* (LAI) est une propriété de plante qui définit la superficie projetée de feuilles à la surface verticale de mur. Les plantes ayant une plus grande surface foliaire (LAI > 4) peuvent contribuer à des économies plus importantes. Les plantes ayant une surface foliaire inférieure à 2, ce qui peut présenter le désavantage d'une consommation majeure de ressources (l'eau et l'énergie). Une différence de deux centimètres dans l'épaisseur du milieu de culture d'une plante peut entraîner des variations drastiques dans le résultat des économies d'énergie, de 2% à 18% (Teck Allan [12]). Sans une conception appropriée de la façade végétale (choix de type de la végétation, géométrie de la façade, orientation du bâtiment), elle pourrait non seulement ne pas atteindre les valeurs durables attendues, mais également nécessiter des coûts énergétiques supplémentaires pour refroidir le bâtiment.

### 5.2.2 Les impacts énergétiques des façades végétales

Plusieurs études numériques et expérimentales ont été faites pour mesurer l'impact de la façade végétale sur la réduction des besoins énergétiques de bâtiment. Leurs résultats sont difficiles à comparer, à cause de la grande variété des cas d'étude proposés et des différentes conditions aux limites. En effet, les variables qui influencent la performance sont nombreuses. Certaines variables concernent l'environnement extérieur (climat, radiation solaire, orientation et exposition), d'autres se réfèrent au système de façade choisi (type de végétation, densité, distance de la végétation de la façade, pourcentage des feuilles), d'autres encore dépendent des conditions intérieures (système de chauffage, de ventilation et de climatisation et autres).

Afin de comparer les résultats des recherches actuelles sur le sujet, nous proposons une analyse comparative visant à mettre en lumière les repères d'échelle de valeurs et les paramètres influençant la performance. Pour ce faire, nous avons décidé de distinguer les études numériques (Num.) et les expérimentations (Exp.). Dans les études numériques nous avons regardé quels logiciels de simulation ont été utilisés et quelles variables ont été prises en compte en comparaison de celles listées dans le paragraphe précédent. En outre, dans notre analyse nous avons considéré les phénomènes physiques modélisés par les différents algorithmes. Une dernière classification de notre analyse concerne la distinction entre les

études sur la façade végétale directe, enracinée dans la terre ou dans les pots (FV) et le mur végétal avec les pots de substrat (MV). (Cf. Figure 5.5)

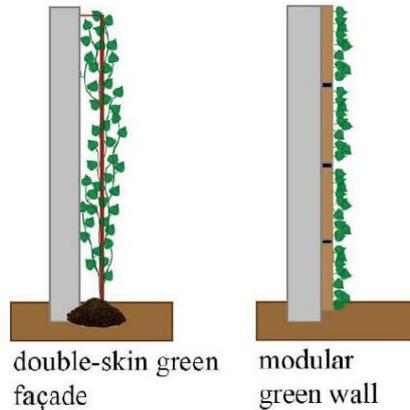


FIGURE 5.5 – La façade végétale et le mur végétal. Medl, A.; Stangl, R.; Florineth, F. Vertical greening systems [...] 2017, p.9

Les résultats comparés sont de deux types : l'économie de refroidissement pour le bâtiment en pourcentage et la réduction de la température de la surface intérieure et extérieure de la façade. (Cf. Figure 5.6)

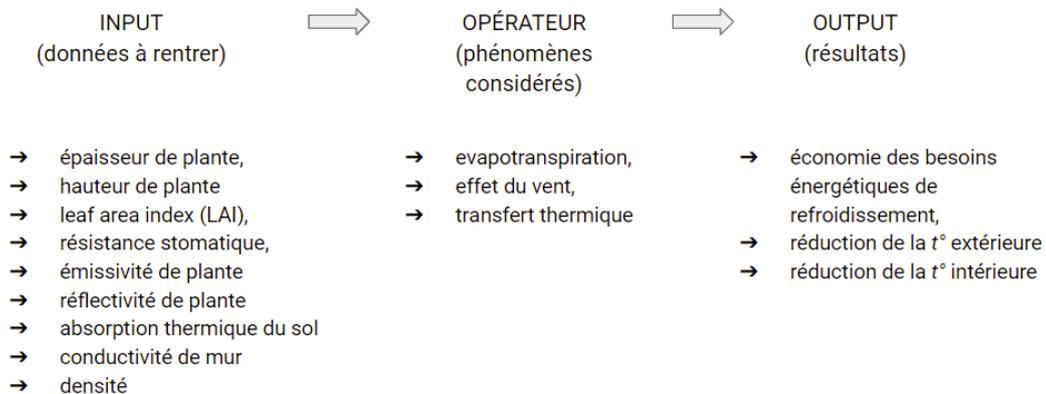


FIGURE 5.6 – Diagramme de l'analyse des études précédentes

### L'économie de besoins énergétiques de refroidissement

La simulation numérique permet de calculer la performance de la façade végétale. Elle rend possible de prévoir, par exemple, les besoins énergétiques annuels pour l'immeuble à grande hauteur. Pourtant les expérimentations sur des prototypes se sont limitées à la hauteur d'un étage, souvent le rez-de-chaussée. Cependant, il faut considérer les phénomènes physiques simulés dans les opérateurs du logiciel utilisé. Par exemple, dans le mur végétal étudié par Pulselli [11] en 2014, l'effet d'évapotranspiration n'est pas pris en compte par le simulateur EnergyPlus. Cet effet se révèle essentiel car il différencie le comportement de la façade végétale avec les autres solutions d'ombrage de l'enveloppe de bâtiment.

Bien que l'économie d'énergie pour la climatisation dépende fortement de plusieurs facteurs, les résultats obtenus montrent une réduction potentielle des besoins en énergie de

Auteurs	Méthode	Façade végétale	Période	Bâtiment	Variables	Résultats
Kontoleon [1]	Num., Modèle analytique	FV	3 mois	RDC (Thessaloniki, Grece).	Plante : type, l'épaisseur, la densité, % de couverture. Mur/toit : géométrie, les propriétés physiques et thermiques. Position des couches, orientation de la façade, les données environnementales.	<b>Economie de refroidissement</b> : 4.65% (façade nord), 18.17% (façade est), 7.60% (façade sud), 20.08% (façade ouest) par jour. <b>Réduction t°int.</b> : 0,69°C (façade nord), 2,23°C (façade est), 1,15°C (façade sud), 3,5°C (façade ouest) par jour. <b>Réduction t°ext.</b> : 1,87°C (façade nord), 12,65°C (façade est), 7,54°C (façade sud), 19,01°C (façade ouest) par jour.
Pulselli [2]	Num., EnergyPlus	MV	1 an	7 m (Siens, Italy).	Mur : géométrie, les propriétés physiques et thermiques. Plante : émissivité, absorption, LAI. Orientation de la façade.	<b>Economie de refroidissement</b> : 6.2%-15.2% par an.
Larsen [3]	Num., EnergyPlus	FV	1 jour	RDC (Salto, Argentine).	Mur : géométrie, les propriétés physiques et thermiques. Plante : émissivité, LAI, distance d'un vide d'air. La transmission solaire et visible, l'absorption et la réflexion, la densité, coefficient chaleur spécifique, la résistance stomatique, la résistance thermique, conductivité.	<b>Réduction t°ext.</b> : 1,5°C. <b>Réduction t°int.</b> : 1,5°C.
Dahanayake [4]	Num., EnergyPlus	MV	1 an	1/ RDC, 2/ 100 m, 3/ 200 m (Hong Kong, Chine).	Plante : type, LAI, résistance stomatique, hauteur, l'émissivité, réflectivité, conductivité du sol sec, absorption thermique du sol, surfaces de couverture végétale. Mur : géométrie, les propriétés physiques et thermiques. Données météo.	<b>Economie de refroidissement</b> : pour le 1er bât. - 6.6% (façade nord), 11% (façade est), 4.8% (façade sud), 11.7% (façade ouest), pour le 2ème bât. - 1.2% (façade nord), 2.1% (façade est), 0.94% (façade sud), 2% (façade ouest) en Juillet. Pour le 1er bât. - 1% (façade nord), 2% (façade est), 1.9% (façade sud), 2.1% (façade ouest), pour le 2ème bât. - 0.5% (façade nord), 1.25% (façade est), 1.5% (façade sud), 1.75% (façade ouest), pour le 3ème bât. - 1.96% (façade ouest) par an. <b>Réduction t°ext.</b> : pour le 1er bât. - 15,4°C max. le 1/07 par la façade ouest
Assimakopoulos [5]	Num., EnergyPlus	MV	1 an	App sur le 2ème étage (Athens, Greece)	Plante : type, hauteur, LAI, réflectivité, émissivité, résistance stomatique. Mur : géométrie, les propriétés physiques et thermiques.	<b>Economie de refroidissement</b> : 6,7% par an. <b>Réduction t°ext.</b> : 8,8°C/4 mois, 11°C maximum. <b>Réduction t°int.</b> : 0,5-2°C/mois.
Teck Allan [6]	Num., Rhino 3D, Honeybee, EnergyPlus	FV	1 jour	193 m (Singapour).	Mur : géométrie, les propriétés physiques et thermiques. Plante : % de couverture, type, LAI, rugosité, épaisseur, conductivité, densité, chaleur spécifique, absorption thermique, absorption solaire, absorption visible, température max. et min. moyenne pour les plantes.	<b>Réduction t°ext.</b> : 1°C - 25% couvert par FV 2°C - 50% couvert par FV 3°C - 75% couvert par FV 4°C - 100% couvert par FV.
Farrokhirad [7]	Num., Envi-met	FV	1 jour	5 étages (Tehran, Iran).	Plante : type, épaisseur, LAI, LAD, hauteur. Mur : géométrie, les propriétés physiques et thermiques.	<b>Réduction t°ext.</b> : 3°C (façade sud), 2°C (façade est).
Mazzali [8]	Exp.	MV	3 mois	RDC (Lonigo, Venice et Pisa, Italy).	Matériaux de mur, type de plantes, substrat.	<b>Réduction t°ext.</b> : 12-20°C/jour.
Manso [9]	Exp.	MV	4 mois	Toit env 10 m (Covilhã, Portugal)	Matériaux, type de plantes, substrat. Set-point température. Données météo.	<b>Réduction t°ext.</b> : 15°C maximum/4 mois. <b>Réduction t°int.</b> : 11,3°C maximum par jour.
Coma [10]	Exp.	FV et MV	2 an	RDC (Puigverd de Lleida, Spain).	Matériaux, type de plantes, substrat. Set-point température. Données météo.	<b>Economie de refroidissement</b> : façade végétale - 33,8%, mur végétal - 50,9%/ juillet, façade sud, set point 24°C. <b>Réduction t°ext.</b> MV: 4,5°C (façade est), 16,5°C (façade sud), 6,5°C (façade ouest) moyen/6 jours en hiver, sans set-point/HVAC.
Coma [11]	Exp.	FV	3 mois	RDC (Puigverd de Lleida, Spain).	Matériaux, plantes, substrat. Set-point température. Données météo. Orientation de la façade, % de la couverture par les plantes.	<b>Economie de refroidissement</b> : 1% (façade sud, couverture 50%, set-point of 24°C) par jour moyen (7-12/07/11). <b>Réduction t°ext.</b> : 14°C max (façade sud)/(2-8/09/11). <b>Réduction t°int.</b> : 1°C (façade sud)/(2-8/09/11).
Perini [12]	Exp.	MV	4 mois	4 étages (Genoa, Italy).	Matériaux de mur, type de plantes, substrat.	<b>Economie de refroidissement</b> : 26,5%, moyen de juin à septembre 2014. <b>Réduction t°ext.</b> : 20°C maximum, 5°C moyen.

FIGURE 5.7 – Table 1 - Les résultats des études récentes de la performance énergétique de la façade végétale

---

refroidissement. L'analyse de la littérature nous reporte une économie d'énergie de bâtiment qui varie de 3 à 15% par an.

Les résultats des études analysés, nous induit à affirmer que l'économie d'énergie est majeure pour le mur végétal que pour la façade végétale. Ce résultat est sûrement dû à la couche supplémentaire opaque de substrat présente dans le mur. Si on considère les résultats de l'économie de refroidissement pour le mois de juillet, Dahanayake [4] reporte une réduction de 11% par rapport à la même façade sans mur végétal. Cette valeur est bien différente de celle reporté par Coma [2] qui a calculé une réduction bien plus haute de 58% pour le mois de juillet 2015. Cette différence peut être due à la différence de localisation de l'analyse faite et l'exposition de la façade considérée. En effet, Coma a fait son étude sur un mur végétal d'un étage au RDC en Espagne, exposé sud. L'étude de Dahanayake montre le résultat pour une façade exposée ouest et est d'un RDC d'un bâtiment à Hong-Kong.

Considérons à présent la réduction de l'énergie par la façade végétale, les résultats de Kontoleon [6] donnent une valeur maximale de réduction de 20% pour la façade ouest pour un jour « moyen » d'été. La température et l'humidité moyennes pour les données environnementales ont été prises. Elles étaient calculées pendant les mois de juin, de juillet et d'août de 2004 à 2008. Une expérimentation de Coma [3] a montré le résultat d'1% par jour dans la période analysée du 7 au 12 juillet 2011 pour la façade sud avec la couverture de 50% des plantes. Dans le modèle thermique calculé par Kontoleon la couverture par les plantes a été de 100%, ce qui peut expliquer la différence entre les résultats. La valeur de la réduction des besoins énergétiques de refroidissement pour la façade sud dans l'étude de Kontoleon est de 7,6% pour la façade sud pour un jour moyen d'été.

Ces deux études ont montré également l'impact de la température de consigne par le système de la climatisation sur l'économie d'énergie. La performance est plus faible lorsque le point de consigne devient plus restrictif selon Coma [3]. Par exemple, pour la température de consigne de 24°C, l'économie d'énergie de refroidissement est de l'ordre de 58% pour le mois de juillet 2015, pour la température de consigne de 21°C elle est de 42,93% pour le mois de juin 2015.

Un autre paramètre à considérer est l'impact de la hauteur de bâtiments sur la performance énergétique de mur végétal. Dahanayake [4] a simulé trois bâtiments : un bâtiment à un seul RDC, le premier de 100 m d hauteur et le deuxième de 200 m de hauteur à Hong Kong. Les résultats ont montré une économie d'énergie annuelle qui varie entre 0,5 et 2%. Si on compare la façade ouest, la plus performante : pour le 1er bâtiment l'économie est de 2,1% - ce qu'est la plus grande valeur relative, pour le bâtiment de 100 m d hauteur l'économie est de 1,75% et pour le bâtiment de 200 m de 1,96% ce qui a donné, à la fin l'économie la plus importante en KWh absolue ( $113kWh/m^2 * 5000m^2 = 565MWh/an$ ). D'autre part, l'étude expérimentale d'un mur végétal de Perini [10], qui a fait un test sur un bâtiment à 4 étages, a montré l'économie d'énergie de refroidissement de 26,5% moyen de juin à septembre 2014. Ce chiffre dépend fortement de la période d'analyse. Par exemple, l'étude a montré une économie de 40,3% (maximale) pour le mois de juin et 17,1% pour le mois d'août.

Plusieurs études ont montré l'impact de l'orientation de la façade sur la réduction de la charge de refroidissement. La simulation Dahanayake [4] a montré que dans le cas de bâtiment à RDC les façades ouest et est (dans l'ordre décroissante) économisent plus d'énergie. Cependant pour le bâtiment de la hauteur de 100 m ce sont les façades ouest et sud qui économisent plus d'énergie. L'étude de Kontoleon [6] confirme que pour les RDC des bâtiments, les façades végétales qui économisent plus d'énergie sont d'ouest et d'est.

Pour terminer cette analyse, il est important de souligner également l'impact de la composition de mur (pose d'isolant) sur la réduction d'économie d'énergie de refroidissement de

---

bâtiment. L'étude de Kontoleon [6] a montré que la pose d'isolant au milieu ou à l'intérieur de la maçonnerie engendre moins de besoins énergétiques que la pose d'isolant à l'extérieur (21,5% et 17,7% pour la façade avec l'isolant à l'intérieur et à l'extérieur, respectivement).

### **La réduction de la température de la surface extérieure**

Concernant la réduction de la température d'une surface extérieure de la façade végétale, la littérature nous reporte des valeurs très variées allant de la réduction de la température de 1 à 19°C. Le calcul par un modèle thermique de Kontoleon [6] a donné la réduction à 19°C de la surface extérieure de la façade ouest de bâtiment à RDC. Le bâtiment à RDC simulé sur EnergyPlus par Larsen [7] a montré la réduction à 1,5°C. Cette grande différence peut être expliquée par le fait que le logiciel Energy Plus v.7.1 n'est pas adapté pour la simulation de la façade végétale. Elle a été simulée comme un dispositif d'ombrage de verre avec les propriétés fictives de plante.

La simulation sur un bâtiment de 5 étages fait sur le logiciel Envi-met par Farrokhirad [5] a montré la réduction de 3°C d'une surface extérieure de la façade sud et de 2°C pour la façade est.

Teck Allan [12] a réalisé une simulation d'un immeuble de 193 m de hauteur sur Honeybee/EnergyPlus. Il a montré l'impact de différent pourcentage de la couverture par la façade végétale sur la réduction de la température d'une surface extérieure. Les résultats montrent que l'augmentation de la densité de la façade végétale diminue la température d'une surface extérieure de bâtiment : 1°C pour la façade couverte à 25% de plantes, 2°C pour la façade couverte à 50%, 3°C pour la façade couverte à 75%, 4°C pour la façade couverte à 100%.

Les études expérimentales ont montré la réduction de la température de la surface extérieure de 4 à 20°C (Table 1). Le mur végétal est le plus performant. Il donne la réduction de la température de la surface intérieure jusqu'à 20°C selon les études de Perini [10], Mazzali [9], pour la façade végétale – jusqu'à 14°C, selon l'étude de Coma [3]. L'expérimentation menée par Coma [2] a montré l'impact de l'orientation de la façade sur la réduction de la température de la surface extérieure pour un mur végétal : 4,5°C (façade est), 16,5°C (façade sud), 6,5°C (façade ouest) moyen/6 jours en hiver, sans set-point/HVAC. Donc la performance de la façade en hiver est la plus importante.

### **La réduction de la température de la surface intérieure**

Il y a peu, des études numériques ont simulé la réduction de la température de la surface intérieure. Les résultats varient de 0,5°C à 3,5°C. Pour le mur végétal simulé par Assimakopoulos [1] la réduction de la température de la surface intérieure varie entre 0.5 à 2°C en fonction de l'heure de la journée. La réduction de la température de la surface intérieure pour la façade végétale directe dépend de l'orientation selon l'étude de Kontoleon [6]. Elle peut arriver jusqu'à 0,69°C pour la façade nord, 2,23°C pour la façade est, 1,15°C pour la façade sud et finalement 3,5°C pour la façade ouest.

D'autres études ont montré une variation de la réduction de 1 à 11°C. L'étude de Manso [8] sur un mur végétal installé sur la hauteur du 3ème étage avec la température de consigne par le système de la climatisation de 20°C montre une réduction de température de la surface intérieure de 11°C. L'expérimentation, menée par Coma [3], sur un cube installé au RDC sans la température de consigne ou un système de HVAC a montré la réduction de 1°C. Nous pouvons donc affirmer la hauteur de bâtiment et la présence d'un système HVAC contribuent à la réduction de la température de la surface intérieure de bâtiment.

En résumé, les résultats de la performance de la façade végétale sont très différents. Ils dépendent de nombreuses variables, telles que la géométrie du bâtiment, l'orientation de la

façade, le type de façade, la période et l'heure de la journée considérée, la température de consigne du système de climatisation, le pourcentage de couverture des plantes, le logiciel et autres.

### 5.2.3 La modélisation numérique des transferts thermiques : les outils de simulations

Recemment avec la transition à la construction écologique et durable l'enveloppe végétale devient de plus en plus courant pour les bâtiments neufs ou en rénovation. La littérature analysée dans le paragraphe ci-dessous, montre que la façade végétale peut réduire la consommation d'énergie des bâtiments.

La complexité du système, due aux nombreux paramètres à considérer ainsi qu'aux phénomènes de transferts thermiques et d'évapotranspiration, a poussé la recherche d'outils numériques fiables pour la modélisation et l'évaluation des impacts énergétiques. Cependant, ces outils restent souvent trop complexes et difficiles à utiliser. En effet, il existe actuellement peu d'outils d'aide à la décision permettant aux promoteurs et aux architectes d'évaluer de manière fiable l'ampleur probable des économies d'énergie associée à différentes options de conception, mise en œuvre et manutention (par exemple, le type et l'épaisseur du substrat, les options d'irrigation ou bien le type de plante).

Les logiciels de la simulation permettent de prévoir l'efficacité énergétique des bâtiments et l'améliorer, en tenant compte des facteurs actifs. Parmi les logiciels utilisés en littérature, deux logiciels de simulation de façade végétale ont été le plus souvent utilisés : EnergyPlus et Envi-Met. La table 2 compare les caractéristiques de ces logiciels ainsi que leurs limites. (Cf. Figure 5.8)

	Destination	Interface	Prix	Phénomènes	Input	Output	Limites
<b>EnergyPlus, OpenStudio</b>	Modéliser à la fois la consommation d'énergie (chauffage, refroidissement, ventilation, éclairage) et la consommation d'eau dans les bâtiments.	Les interfaces pour la modélisation énergétiques comme par ex. OpenStudio, DesignBuilder, eQuest peuvent être téléchargées avec EnergyPlus inclus	Gratuit	Thermodynamique avec les plantes, évapotranspiration, le bilan d'humidité simplifié, le bilan énergétique du sol et du couvert végétal basé sur les modèles de végétation FASST du Army Corps of Engineers (Frankenstein et Koenig).	Données météo en .epw, la géométrie et propriétés de matériaux, de plantes et de sol.	Consommation énergétique de refroidissement et de chauffage, $t^{\circ}$ de la surface intérieure et extérieure de bâtiment, $t^{\circ}\text{C}$ de plantes et de sol.	N'est pas recommandé d'utiliser le logiciel pour la simulation des systèmes verticaux végétaux (pas horizontaux comme le toit). Cependant, plusieurs études ont utilisé ce logiciel pour le calcul de mur végétal avec les résultats approuvés
<b>EnviMet</b>	Modèle climatique 3D avec pronostic	Avec interface inclus	2900€ pour les architectes, 290€ pour les étudiants	Hydrodynamique et thermodynamique. Évapotranspiration, absorption de CO2 et température des feuilles en fonction du taux de photosynthèse de la plante. Conditions climatiques, et processus atmosphériques.	Location et géométrie de bâtiment, matériaux, sol, l'orientation de la façade, type de plantes, l'épaisseur, la hauteur, LAL.	$T^{\circ}$ de la surface intérieure et extérieure de bâtiment et autres données physiques de la végétation, du substrat et du mur comme la quantité de la radiation solaire transmise ou réfléchi.	Ne calcule pas la consommation énergétique.

FIGURE 5.8 – Table 2 - Comparatif des logiciels de la simulation énergétique de la façade végétale

Le logiciel EnergyPlus est un programme libre de simulation thermique et énergétique des bâtiments développé par le DOE (Department Of Energy, États-Unis). EnergyPlus est un moteur de simulation. Pour la modélisation et le paramétrage, les interfaces utilisées sont principalement OpenStudio, DesignBuilder etc. EnergyPlus présente l'avantage d'être gratuit. Il inclut le module Material : RoofVegetation pour la simulation de toit végétal. Selon la documentation d'EnergyPlus, son modèle énergétique a été développé pour les surfaces extérieures à faible pente (toitures) et n'est pas recommandé pour les surfaces extérieures à forte pente (les murs), à cause de différent angle d'application de la radiation solaire. Cependant, pour la simulation de système vertical végétal, EnergyPlus a été souvent utilisé dans les études précédentes avec les résultats approuvés (Assimakopoulos [1]).

La version EnergyPlus 9.3 prend en compte l'échange radiatif à travers la végétation

---

(ondes longues et ondes courtes), l'évapotranspiration du sol et des plantes, les effets des couches végétales et du sol sur le transfert de chaleur par convection et par conduction. Le modèle comprend les éléments suivants : un bilan hydrique simplifié qui tient compte des précipitations, de l'irrigation, un bilan énergétique du sol et du couvert végétal basé sur les modèles de végétation FASST du Army Corps of Engineers (Frankenstein et Koenig). Les principales données à rentrer sont les dimensions et les propriétés des matériaux de construction et des plantes (considérées comme un matériau de construction). EnergyPlus calcule l'énergie nécessaire au chauffage, à la climatisation, à l'éclairage, à la ventilation et à la production d'eau chaude dans les bâtiments.

EnviMet, moins utilisé, permet d'effectuer une modélisation climatique avec des prévisions. Il ne calcule pas les besoins énergétiques de bâtiment. Cependant, il simule les températures des surfaces extérieures et intérieures du bâtiment à partir desquelles on peut mesurer l'impact sur le bilan énergétique de bâtiment. EnviMet a sa propre interface inclus. Le logiciel est payant. Donc EnviMet est une alternative pour simuler l'impact de la façade végétale sur le bilan énergétique des bâtiments même si EnergyPlus reste aujourd'hui le principal outil de simulation énergétique des façades et des toitures végétalisées.

### **5.3 La simulation énergétique sur deux cas d'étude : analyse d'un mur végétal à Singapour et à Paris**

Les résultats de l'analyse des études précédentes nous ont permis de comprendre les enjeux liés à la conception d'une façade végétale et à sa simulation à l'aide d'outils numériques. Ils constituent un point de départ utile pour pouvoir tester les avantages énergétiques de l'installation d'une telle façade dans un contexte climatique défini. Pour ce faire, nous menons une analyse énergétique à l'aide de OpenStudio sur un petit bâtiment placé à Singapour et à Paris, ayant trois façades végétales afin de vérifier l'hypothèse de réduction de la charge énergétique de refroidissement de bâtiment.

#### **5.3.1 L'outil numérique**

Pour vérifier notre hypothèse nous allons effectuer une simulation sur OpenStudio Application v1.1.0, interface de EnergyPlus 9.3. La géométrie de bâtiment est construite sur SketchUp 2020 avec OpenStudio Plug-in v1.1.0. Ce modèle OpenStudio est importé ensuite dans l'application principale. Nous attribuons à notre modèle le site de location, le programme, les matériaux de chaque partie de construction et un scénario d'occupation du bâtiment afin de définir les gains internes (équipements et usagers). À la fin les résultats peuvent être visualisés dans les différents formats : IDF comme un scripte, DViewer en graphique, OpenStudio report results. (Cf. Figure 5.9)

#### **5.3.2 La méthodologie**

Afin de mesurer l'avantage de l'installation des murs végétaux, la méthodologie employée a consisté à simuler le bilan énergétique d'un simple bâtiment avec et sans mur végétal. Les données de climat et de météo sont fournies par le site officiel EnergyPlus (Weather Data) dans le format .epw et .ddy. Les deux sites ont été choisis : Singapour et Paris. La température moyenne à Singapour est environ 27°C tous les mois, ce qu'est toujours plus haut que la température de confort thermique (supposée entre 19 et 24°). Le bâtiment à Singapour a des besoins énergétiques pour le refroidissement. Le bâtiment à Paris a des besoins énergétiques de refroidissement et de chauffage.

Le bâtiment présente un plan carré de dimensions 10x10 mètres et une hauteur de 3 m. Il a été modélisé sur Plug-in OpenStudio SketchUp. (Cf. Figure 5.10) Le mur végétal a été

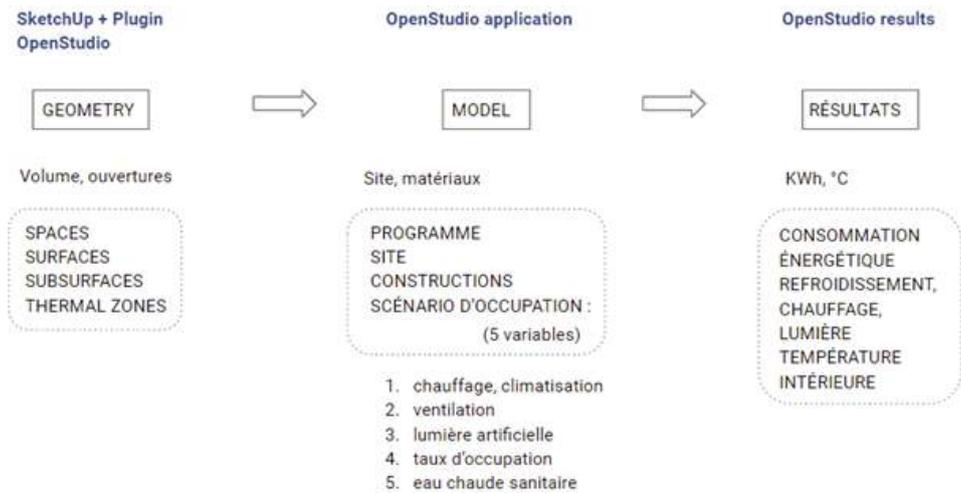


FIGURE 5.9 – Workflow de la simulation sur OpenStudio Application

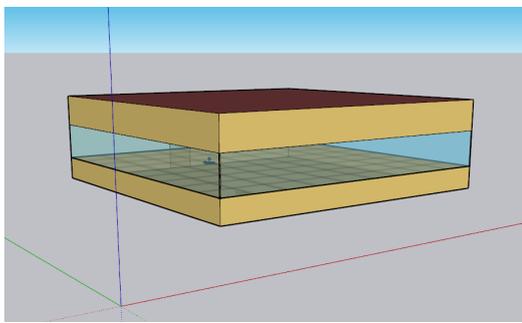


FIGURE 5.10 – La géométrie du bâtiment sur Plug-in OpenStudio SketchUp

Dimensions	10x10x3 m (300 m <sup>2</sup> )
Programme	Office
Rapport murs-fenêtres	0,4 (façades est, sud et ouest)
Porte	0,9x2 m (façade nord)
Site	Singapour/Paris
Année	2020
HVAC	Climatiseur et pompe à chaleur sur le toit. Set-point température 24°C (refroidissement), 21°C (chauffage)
Mur végétal	Façades est, sud et ouest
Gains thermiques internes	Personnes : 0.05 personne/m <sup>2</sup> Lumière : 10.54 W/m <sup>2</sup> Equipment électrique : 7.64 W/m <sup>2</sup>

FIGURE 5.11 – Les détails de deux cas d'étude

appliqué à toutes les façades. La simulation a été faite pour l'année 2020. Les détails des deux cas d'étude sont décrits dans le tableau ci-dessous. (Cf. Figure 5.11)

Les matériaux de construction ont été pris de la base du logiciel selon les zones climatiques ASHRAE : zone 2 pour Singapour et zone 4 pour Paris. Ils sont décrits dans les tableaux suivants. (Cf. Figure 5.12 et Cf. Figure 5.13)

Concernant le type de végétation du mur végétal, les graminées, les fougères, les arbustes, les conifères et les succulentes sont souvent utilisées pour le mur végétal. La couche végétale a été identique pour les deux cas d'étude. Ses propriétés ont été prises de l'étude de Dahanayake [4]. Ils sont décrits dans le tableau ci-dessous. (Cf. Figure 5.14)

### 5.3.3 Les résultats

La Figure 5.15 montre les résultats de la simulation pour le bâtiment à Singapour avec trois façades avec et sans mur végétal. Nous pouvons remarquer, en général, une baisse des charges énergétiques de refroidissement de bâtiment avec les murs végétaux, avec une économie annuelle d'environ 9%.

Dans le mois de juin, le plus chaud en 2020, la charge de refroidissement du bâtiment sans mur végétal est égale à 923 KWh et à 844 KWh avec le mur végétal. L'économie de refroidissement pour le mois de juin est de 9%. L'économie annuelle est également de 9%. Les charges de refroidissement sont présentées dans le tableau 5.16.

Matériau	Epaisseur, m	Conductivité, W/m*K	Densité, kg/m <sup>3</sup>	Chaleur spécifique, J/kg*K
<b>Mur extérieur</b>				
Stuc	0.025	0.69	1858	837
Béton lourd	0.203	1.72	2243	837
Isolation	0.045	0.04	91	837
Gypse	0.012	0.16	784	830
<b>Mur intérieur</b>				
Plaque de plâtre	0.019	0.16	800	1090
Espace aérien				
Plaque de plâtre	0.019	0.16	800	1090
<b>Toit extérieur</b>				
Membrane	0.009	0.16	1121	1460
Isolation	0.211	0.049	265	836
Couverture métallique	0.0015	45.006	7680	418
<b>Toit intérieur</b>				
Béton léger	0.1016	0.53	1280	840
Espace aérien				
Couche d'isolation acoustique	0.0191	0.06	368	590
<b>Dalle extérieure</b>				
Béton lourd	0.1016	1.311	2240	836
Tapis de sol				
<b>Plancher intérieur</b>				
Couche d'isolation acoustique	0.0191	0.06	368	590
Espace aérien				
Béton léger	0.1016	0.53	1280	840
<b>Porte extérieure</b>				
Revêtement métallique	0.0008	45.28	7824	500
Isolation	0.0254	0.03	43	1210
<b>Porte intérieure</b>				
Bois	0.0254	0.15	608	1630

FIGURE 5.12 – Détails de construction de bâtiment à Singapour

Les figures 5.17 et 5.18 montrent les résultats de la simulation pour le bâtiment à Paris. Dans le deuxième cas, la baisse des charges énergétiques de refroidissement et de chauffage du bâtiment avec les murs végétaux est plus petite, avec une économie annuelle d'environ 2%. La performance de mur végétal est mieux dans le climat plus chaud. Les meilleurs résultats dans le cas de Paris sont pour les mois de novembre, décembre, janvier, février et pour le mois de juillet, le mois le plus chaud à Paris. Donc plus la température extérieure est loin de la température de confort (ou set-point pour les systèmes de refroidissement et de chauffage), mieux est la performance de mur végétal. En outre, on peut remarquer que les besoins énergétiques de refroidissement et de chauffage sont plus petits pour le cas à Paris, que à Singapour.

## 5.4 Conclusion

Dans notre recherche nous avons effectué une simulation sur OpenStudio Application d'un type de la façade végétale : le mur végétal. Nous avons confirmé que le mur végétal peut diminuer les charges de refroidissement de bâtiment.

Nous avons simulé un bâtiment dans les deux climats différents : à Singapour et à Paris. Les données de météo, la géométrie de bâtiment, les propriétés de matériaux et de la couche végétale ont été pris en compte ainsi que le système de CVC, de la lumière artificielle, de

Matériau	Epaisseur, m	Conductivité, W/m*K	Densité, kg/m <sup>3</sup>	Chaleur spécifique, J/kg*K
<b>Mur extérieur</b>				
Stuc	0.025	0.69	1858	837
Béton lourd	0.203	1.72	2243	837
Isolation	0.068	0.04	91	837
Gypse	0.012	0.16	784	830
<b>Mur intérieur</b>				
Plaque de plâtre	0.019	0.16	800	1090
Espace aérien				
Plaque de plâtre	0.019	0.16	800	1090
<b>Toit extérieur</b>				
Membrane	0.009	0.16	1121	1460
Isolation	0.211	0.049	265	836
Couverture métallique	0.0015	45.006	7680	418
<b>Toit intérieur</b>				
Béton léger	0.1016	0.53	1280	840
Espace aérien				
Couche d'isolation acoustique	0.0191	0.06	368	590
<b>Dalle extérieure</b>				
Béton lourd	0.1016	1.311	2240	836
Tapis de sol				
<b>Plancher intérieur</b>				
Couche d'isolation acoustique	0.0191	0.06	368	590
Espace aérien				
Béton léger	0.1016	0.53	1280	840
<b>Porte extérieure</b>				
Revêtement métallique	0.0008	45.28	7824	500
Isolation	0.0254	0.03	43	1210
<b>Porte intérieure</b>				
Bois	0.0254	0.15	608	1630

FIGURE 5.13 – Détails de construction de bâtiment à Paris

Hauteur de plantes	0.3 m
Leaf area index (LAI)	3
Emissivité de feuillage	0.9
Réfectivité de feuillage	0.2
Resistance Stomatique Minimale [s/m]	180
Rugosité	Smooth
Epaisseur	0.1 m
Conductivité du sol sec	0.4 W/m*K
Densité du sol sec	1100 kg/m <sup>3</sup>
Chaleur spécifique du sol sec	1200 J/kg*K
Absorption thermique	0.96
Absorption solaire	0.7
Absorption visible	0.75
Méthode de calcul de la diffusion de l'humidité	Simple

FIGURE 5.14 – Les propriétés de plantes

l'eau chaude sanitaire et le taux d'occupation de bâtiment.

L'économie annuelle de charges énergétiques de refroidissement de bâtiment pour le cas d'étude à Singapour est 9%. L'économie des charges énergétiques de chauffage et de refroidissement pour le cas à Paris se varie de 0,3% à 3,2%. La performance de mur végétal est meilleure dans le climat plus chaud.

Nous avons comparé l'impact d'une variable, le climat sur la performance énergétique

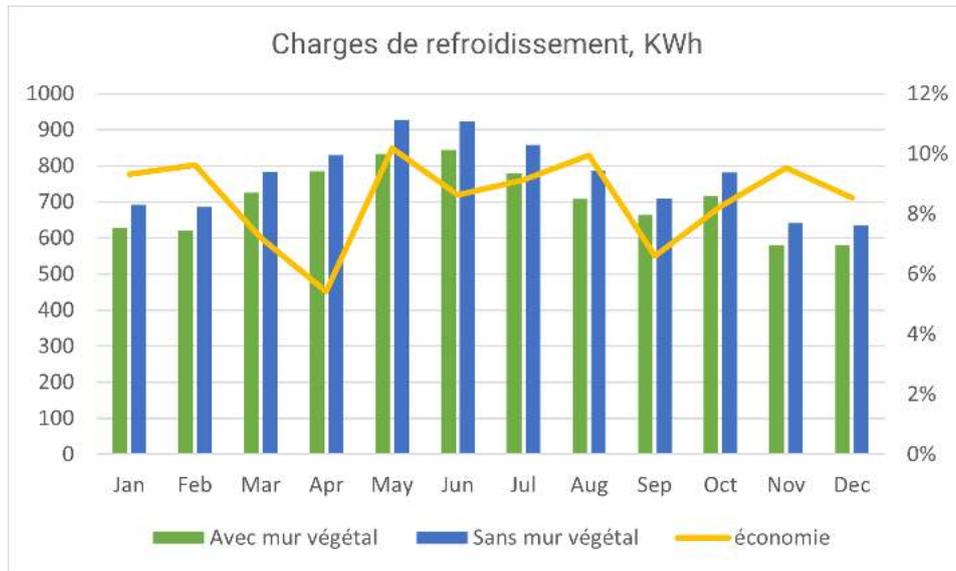


FIGURE 5.15 – Charges énergétiques de refroidissement de bâtiment sans et avec le mur végétal, KWh

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Avec mur végétal	628	620	726	784	832	844	780	709	664	717	580	581	8465
Sans mur végétal	692	686	783	829	927	923	858	787	711	781	641	635	9254
Economie	9,3%	9,6%	7,2%	5,4%	10,2%	8,6%	9,1%	10,0%	6,6%	8,3%	9,5%	8,5%	8,5%

FIGURE 5.16 – Charges énergétiques de refroidissement de bâtiment sans et avec le mur végétal à Singapour, KWh

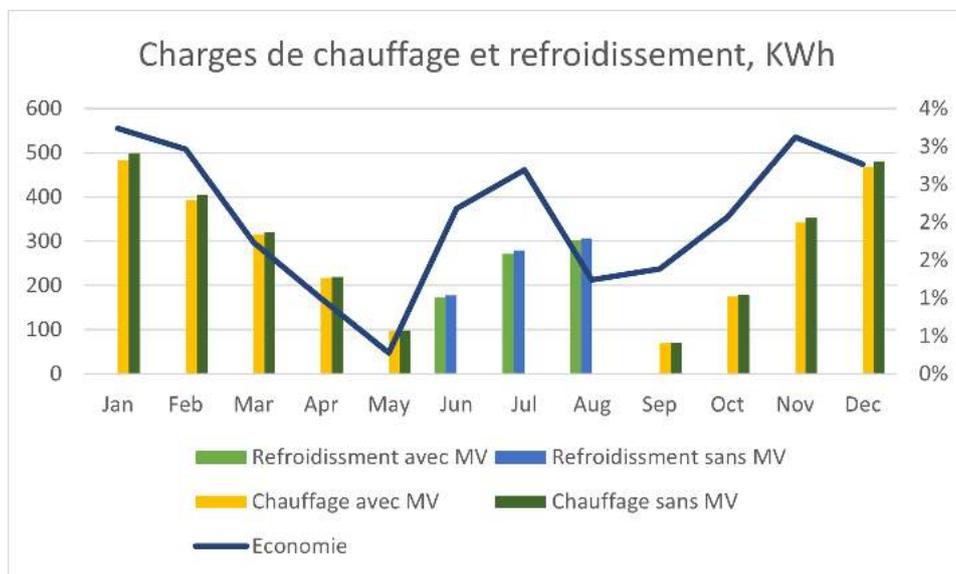


FIGURE 5.17 – Charges énergétiques de refroidissement et de chauffage de bâtiment sans et avec le mur végétal, KWh

de mur végétal. Dans une perspective de cette recherche l'exploration de l'impact des autres variables est envisagée.

Le moteur de la simulation EnergyPlus n'est pas encore totalement adapté pour la si-

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Refroidissement avec MV						173,7	271,6	303					748
Refroidissement sans MV						177,6	279,1	306					763
Chauffage avec MV	483,1	393,7	315	217,1	97				70	175,4	342,6	467,3	2561
Chauffage sans MV	499,2	405,7	320,5	219,3	98				71	179,1	353,7	480,7	2626
Economie	3,2%	3,0%	1,7%	1,0%	0,3%	2,2%	2,7%	1,2%	1,4%	2,1%	3,1%	2,8%	2,1%

FIGURE 5.18 – Charges énergétiques de refroidissement et de chauffage de bâtiment sans et avec le mur végétal, KWh

mulation de façade végétale vertical, cependant il donne des résultats assez précis, soutenus par la cohérence avec les études expérimentales. Convaincue de la nécessité pour les architectes de s'approprier des outils de simulation numérique, ce travail veut être une réflexion sur les façades végétalisées finalisé à développer des solutions énergétiques efficaces pour l'environnement urbain plus vert.

# Bibliographie

- [1] Margarita-Niki ASSIMAKOPOULOS, Rosa Francesca DE MASI, Filippo de ROSSI, Dimitra PAPADAKI et Silvia RUGGIERO : Green wall design approach towards energy performance and indoor comfort improvement : A case study in athens. *Sustainability*, 12(9), 2020.
- [2] Julià COMA, Gabriel PÉREZ, Alvaro de GRACIA, Silvia BURÉS, Miguel URRESTARAZU et Luisa F. CABEZA : Vertical greenery systems for energy savings in buildings : A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111:228–237, Janvier 2017.
- [3] Julià COMA, Gabriel PÉREZ, Cristian SOLÉ, Albert CASTELL et Luisa F. CABEZA : New green facades as passive systems for energy savings on buildings. *Energy Procedia*, pages 1851–1859, 2014.
- [4] Kalani C. DAHANAYAKE et Cheuk Lun CHOW : Comparing reduction of building cooling load through green roofs and green walls by energyplus simulations. *Building Simulation*, 11:421–434, Juin 2018.
- [5] Ensiyeh FARROKHIRAD : A simulation study if the direct green façades in semi-arid climate by envi-met. *University of Naples Federico II (DiARC)*, Décembre 2020.
- [6] K.J. KONTOLEON et E.A. EUMORFOPOULOU : The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, 45:1095–1352, Mai 2010.
- [7] Silvana Flores LARSEN, Celina FILIPPÍN et Graciela LESINO : Modeling double skin green facades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy*, 121:56–67, Novembre 2015.
- [8] M. MANSO et J.P. CASTRO-GOMES : Thermal analysis of a new modular system for green walls. *Journal of Building Engineering*, 7:53–62, Septembre 2016.
- [9] Ugo MAZZALI, Fabio PERON, Piercarlo ROMAGNONI, Riccardo M. PULSELLI et Simone BASTIANONI : Experimental investigation on the energy performance of living walls in a temperate climate. *Building and Environment*, 64:57–66, 2013.
- [10] Katia PERINI, Francesca BAZZOCCHI, Lorenzo CROCI, Adriano MAGLIOCCO et Enrica CATTANEO : The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. *Energy and Buildings*, 143:35–42, Mai 2017.
- [11] Riccardo M. PULSELLI, F.M. PULSELLI, Ugo MAZZALI, Fabio PERON et Simone BASTIANONI : Energy based evaluation of environmental performances of living wall and grass wall systems. *Energy and Buildings*, 73:200–211, Avril 2014.
- [12] Seah Soon TECK ALLAN et Hyeong-Ill KIM : A study of workflow for simulations of vertical greenery systems. *Architecture Research*, pages 142–153, 2016.



# La réflectance comme outil de gestion thermique du bâti

Par Aymeric Manté<sup>1</sup>

*Face à l'évolution climatique rapide affectant la consommation énergétique des environnements clos, l'objectif de cette recherche est de proposer une solution de gestion dynamique du comportement thermique des façades du bâti. L'article propose d'exploiter le phénomène de réflectance, afin de maîtriser le comportement thermique radiatif des surfaces. La proposition repose sur l'hypothèse selon laquelle le détournement de la technologie d'affichage électrophorétique permettrait une réduction de la consommation énergétique du bâtiment. L'étude consiste donc à vérifier la viabilité de cette hypothèse, quantifier les apports théoriques de ce système, et proposer des pistes d'adaptation de cette technologie à l'usage architectural. Les résultats de l'étude constituent un socle pour l'énonciation de multiples propositions de développements futurs, permettant à cette technologie de constituer une réponse efficace aux objectifs thermiques contemporains.*

---

1. Aymeric Manté, né en 1999. Après une licence en architecture à l'École Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Lille, il a complété son cycle d'études Master à l'ENSA Paris Malaquais de 2020 à 2022. Il travaille actuellement en région lyonnaise, au sein d'une entreprise de construction modulaire hors-site, en tant que responsable de production et chargé de recherche et développement.

## 6.1 Introduction

### 6.1.1 Contexte et état de l'art

L'évolution récente du climat a pour conséquence une augmentation importante des températures moyennes annuelles en France métropolitaine (cf. Figure 6.1). Selon le Service des Données et Etudes Statistiques (SDES), les années 2014, 2018 et 2019 sont ainsi les trois années les plus chaudes depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle [1]. Cette multiplication des périodes de forte chaleur entraîne une chute du confort dans les environnements clos, et/ou une hausse conséquente de la consommation énergétique du bâti (qui se dote de systèmes de climatisation).

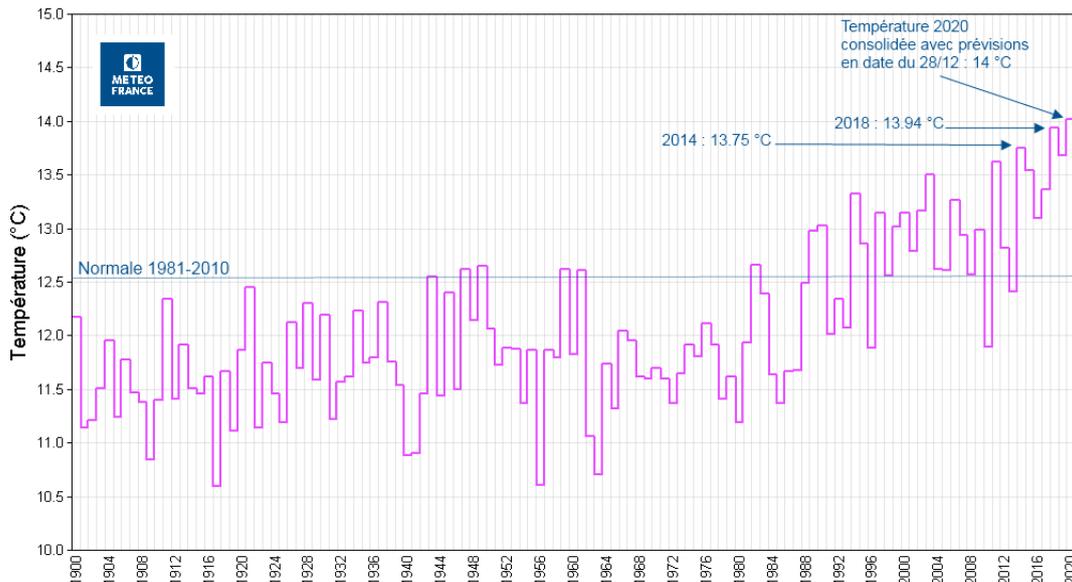


FIGURE 6.1 – Évolution de la température moyenne annuelle en France métropolitaine  
Source : <https://météofrance.com/actualites-et-dossiers-0/2020-lannee-la-plus-chaude-en-france-depuis-1900>

L'impact de cette évolution climatique se retrouve aussi à l'extérieur du bâti, à l'échelle de la ville, au travers notamment de la formation d'îlots de chaleur urbains (ICU)<sup>2</sup> qui frappent nos villes contemporaines. Ce phénomène est d'autant plus inquiétant que 80% de la population habite aujourd'hui en milieu urbain [3], et se trouve donc directement affectée par ces microclimats.

Afin de lutter contre ces nouveaux épisodes de fortes chaleurs, de nombreuses études sont menées sur les enveloppes du bâti, et mettent en lumière l'importance du phénomène de réflectance dans leur comportement thermique [10, 5, 14]. La réflectance (ou albedo) désigne la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire. Elle s'exprime sous la forme d'un coefficient de réflexion, désignant le pourcentage de rayonnement réfléchi par rapport à un rayonnement incident<sup>3</sup>. Dans le cas des surfaces opaques, la réflectance est l'inverse de l'absorbance, qui désigne quant à elle la capacité d'une surface à absorber le rayonnement solaire et à en capter ainsi l'énergie (Cf. Figure 6.2) [7].

2. Le concept d'îlot de chaleur urbain (ICU), énoncé pour la première fois par Luke Howard au 19<sup>ème</sup> siècle [8], désigne une élévation locale de la température en milieu urbain, par rapport aux températures relevées en milieu rural ou par rapport aux moyennes des températures de la région.

3. Il est important de préciser que la réflectance est calculée sur l'ensemble du spectre solaire. En réalité, toute surface présente des coefficients de réflexion différents en chaque longueur d'onde du spectre électromagnétique, formant ainsi son spectre de réflexion propre.

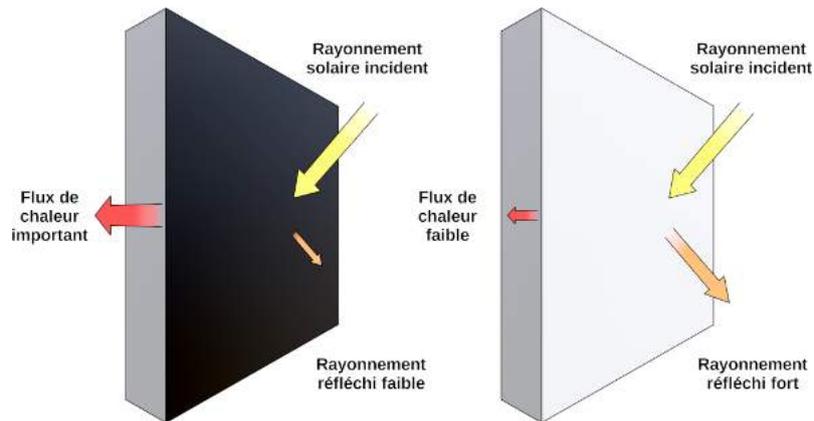


FIGURE 6.2 – Schéma du phénomène de réflectance d'une façade opaque

Suivant ce constat, des initiatives contemporaines s'inspirent de l'architecture cycladique, dont les habitations blanchies à la chaux exploitaient déjà ce phénomène depuis l'antiquité afin de réfléchir une plus grande partie du rayonnement solaire et éviter ainsi son apport énergétique. (Cf. Figure 6.3) Imitant cette architecture, des villes comme celle de Los Angeles ont vu certaines de leurs routes peintes en blanc dans l'objectif de lutter contre les ICU. (Cf. Figure 6.4)



FIGURE 6.3 – Exemple d'architecture cycladique

Source : <https://www.novo-monde.com/visiter-ile-santorin-cyclades/>



FIGURE 6.4 – Peinture des rues de Los Angeles

Source : <https://detours.canal.fr/limiter-rechauffement-peignons-routes-blanc/>

Au delà de l'utilisation de peinture acrylique classique (comme dans le cas de la ville de Los Angeles), nous pouvons aussi observer le développement de matériaux de recouvrement innovants, présentant des propriétés de réflexion solaire améliorées. Différentes recherches évaluent ainsi les performances de « peintures froides »<sup>4</sup>, présentant un meilleur coefficient de réflexion solaire que les peintures classiques, notamment dans le domaine des infrarouges proches<sup>5</sup> (Cf. Figure 6.5) [2, 17]. Les matériaux à changement de phase et les matériaux thermochromiques (Cf. Figure 6.6) représentent eux aussi une part grandissante de la recherche en matière de contrôle thermique des enveloppes [9, 12].

### 6.1.2 Objectif et organisation de la recherche

La recherche autour de matériaux innovants est principalement menée dans une optique de lutte contre la chaleur, qui constitue une nouvelle menace dans de nombreuses régions du globe. Cependant, l'architecture de France métropolitaine doit faire face à un problème

4. Traduit de l'anglais « cool paintings », ou plus généralement « cool materials ».

5. Les infrarouges proches représentent une part importante des échanges thermiques radiatifs.

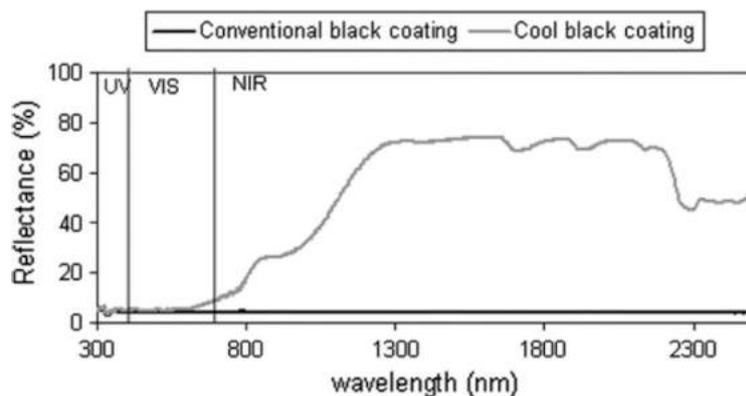


FIGURE 6.5 – Spectre de réflexion d'une peinture froide noire

Source : Santamouris [12]

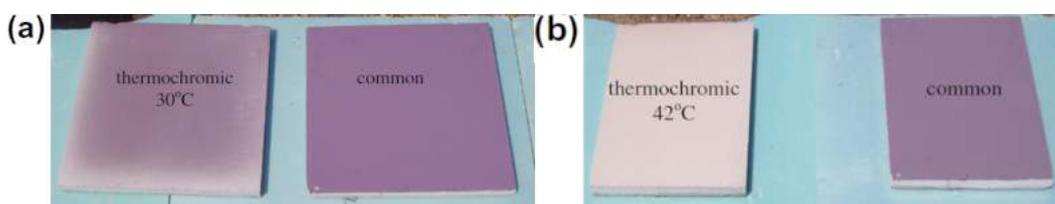


FIGURE 6.6 – Observation du comportement d'une peinture thermochromique

Source : Santamouris [12]

thermique complexe : il est à la fois nécessaire de se protéger contre les nouveaux épisodes de fortes chaleurs, tout en continuant à lutter contre les périodes hivernales parfois rigoureuses. Il est donc nécessaire de développer une stratégie thermique hybride, capable de s'adapter de manière dynamique aux évolutions de l'environnement <sup>6</sup>.

Pour ce faire, cette recherche propose d'étudier les possibilités d'adaptation de la technologie d'affichage électrophorétique à un usage architectural. Cette technologie d'écran, autrement appelée « papier électronique » <sup>7</sup>, a été originellement développée comme solution d'affichage pour les liseuses. Aujourd'hui, les affichages électrophorétiques se retrouvent dans de plus en plus de produits, comme des accessoires de mode ou encore en tant qu'étiquette de prix dans les grandes surfaces. Ces écrans n'ont pour le moment jamais été développés pour l'échelle du bâtiment, mais présentent certains atouts qui pourraient se révéler utiles à une stratégie d'exploitation dynamique de la réflectance en façade.

L'objectif est ici d'évaluer l'impact théorique de cette technologie sur le comportement thermique des façades, et plus largement sur la consommation énergétique du bâti. Il est aussi question d'identifier les verrous technologiques qui font aujourd'hui obstacle à une utilisation directe des affichages électrophorétiques <sup>8</sup> en architecture, pour pouvoir ensuite proposer des stratégies d'évolution.

Pour déterminer l'impact des AEP dans la consommation énergétique d'un bâtiment, il est nécessaire de diviser la recherche en trois temps :

- Dans un premier temps, l'élaboration d'une hypothèse d'implantation des AEP en façade permet de définir les conditions d'utilisation des affichages, et de préciser

6. Les peintures thermochromiques pourraient constituer une réponse potentielle à ce problème, mais présentent de nombreux inconvénients que nous ne détaillons pas ici.

7. Les termes anglais « e-paper » ou « e-ink » sont aussi des appellations largement répandues.

8. Abrégé « AEP » dans la suite de l'article.

leur rôle au sein du bâti. Cette hypothèse s'énonce sur la base de considérations thermiques et de mise en œuvre, en prenant en compte les possibilités actuelles de la technologie.

- Ensuite, des analyses radiatives sont réalisées en laboratoire sur des échantillons d'AEP, afin de préciser les caractéristiques optiques de la technologie. Ces expérimentations sont primordiales dans l'évaluation des performances des affichages, et les sujets d'analyse sont choisis selon l'usage prévu par l'hypothèse d'implantation précédemment énoncée.
- Enfin, une simulation informatique est effectuée afin d'évaluer les performances des AEP ainsi considérés dans le comportement thermique et la consommation énergétique du bâti. Cette simulation se nourrit des résultats obtenus lors des analyses en laboratoire, et présente des estimations théoriques de performances sur un exemple générique de bâtiment.

Ces trois étapes successives permettent de conclure sur l'intérêt théorique d'une adaptation de la technologie d'affichage électrophorétique à une gestion dynamique du comportement thermique du bâti. Cette recherche constitue une base pour de multiples propositions de pistes de développements futurs poursuivant ce but.

## 6.2 Méthodologie de la recherche

### 6.2.1 Propriétés des affichages électrophorétiques

Le premier affichage électrophorétique a vu le jour dans les années 1970 au centre de recherche Palo Alto (Californie). Appelé Gyricon, cet affichage est constitué de micro-billes de polyéthylène divisées en deux parties, noire et blanche, respectivement chargées négativement et positivement, placées entre deux matrices d'électrodes générant un champ électrique. Cela permet au système de modifier l'orientation des billes en fonction du champ électrique qui leur est appliqué, et donc de faire varier la couleur apparente du système. (Cf. Figure 6.7)

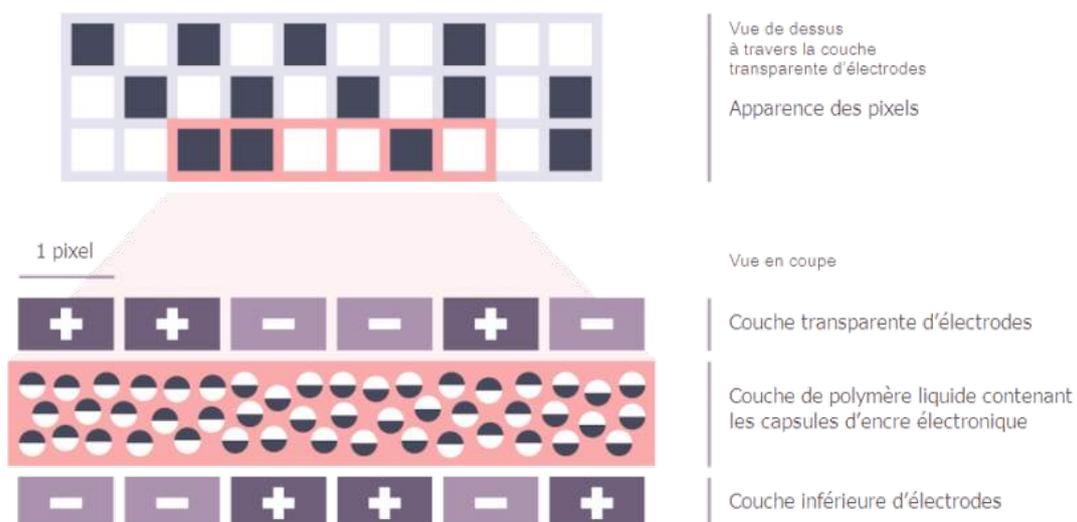


FIGURE 6.7 – Schéma de composition du papier électronique Gyricon  
Auteur : M. Nicolas, Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Papier\\_électronique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Papier_électronique)

Cette technologie a ensuite rapidement évolué pour donner les écrans électrophorétiques que nous connaissons aujourd'hui. Les billes en polyéthylène ont été remplacées par des

particules microscopiques électriquement chargées, encapsulées dans un milieu liquide apolaire [11]. Cette couche de micro-capsules est maintenue entre deux matrices d'électrodes, dont une est transparente<sup>9</sup>. Ici encore, c'est le sens du champ électrique appliqué qui va permettre la migration des particules, et ainsi l'affichage des différentes nuances de gris. (Cf. Figure 6.8)

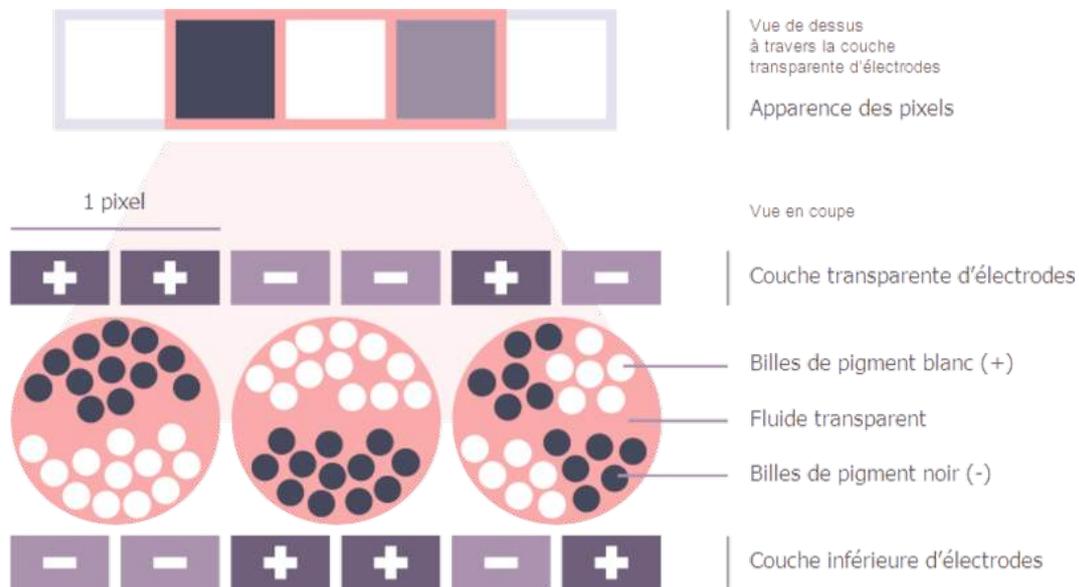


FIGURE 6.8 – Schéma de fonctionnement d'un affichage électrophorétique actuel  
Auteur : M. Nicolas, Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Papier\\_électronique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Papier_électronique)

Le principe de fonctionnement et les caractéristiques physiques de l'affichage électrophorétique en font une réponse potentielle au problème de variation dynamique de la réflectance en façade. En effet, le système présente de nombreux atouts essentiels :

- Il ne requiert que très peu d'énergie pour son fonctionnement (négligeable dans la consommation énergétique du bâti).
- Il est capable d'afficher deux états de surface opposés, et dans certains cas d'afficher des valeurs intermédiaires, ce qui permet une gestion précise du facteur de réflexion de la façade.
- L'utilisation de matrices d'électrodes donne la possibilité de contrôler de manière différente des parties de façade délimitées.
- Sa flexibilité ouvre son utilisation aux surfaces courbes.
- Il peut être construit sous diverses formes (panneaux fins, peinture), ce qui le rend adapté à de nombreux usages (en projet de réhabilitation notamment).

Néanmoins, il reste un certain nombre de verrous technologiques à ouvrir pour espérer adapter ce type de système à une utilisation en architecture. Cela est notamment dû au fait que cette technologie n'a pour le moment jamais été développée pour la grande échelle, ni pour faire face aux aléas climatiques. Des nombreux verrous technologiques, nous pouvons d'ores et déjà en identifier certains essentiels au bon fonctionnement du dispositif :

- Le système doit faire face aux intempéries (vent, pluie, neige...), ainsi qu'aux variations de températures (gel, canicule...).

9. Il existe aujourd'hui différentes méthodes de construction d'un affichage électrophorétique, mais la méthode présentée ici reste la plus largement utilisée. C'est en effet la méthode de fabrication de la société taïwanaise E-Ink, qui possède actuellement le quasi-monopole du marché.

- 
- Le système doit résister aux chocs et autres dégâts causés par l'activité humaine.
  - Le système doit présenter des propriétés radiatives intéressantes, non seulement dans le spectre visible mais aussi dans le domaine de l'infrarouge proche.
  - Le système doit avoir une certaine longévité, et être facile d'entretien.
  - Le système ne doit pas présenter de risque pour la santé des usagers.
  - Le système doit pouvoir être produit industriellement à un coût raisonnable.

La mise en relation des atouts et des contraintes énoncés permet d'établir un cahier des charges énumérant les caractéristiques d'un système parfait d'AEP en façade. Pour tenter de fournir des pistes de réponses à ce cahier des charges, il est nécessaire de mener des analyses en laboratoire, et d'établir une stratégie d'implantation des AEP en façade.

### 6.2.2 Formulation d'une hypothèse d'implantation des AEP en façade

À l'heure actuelle, la technologie d'affichage électrophorétique reste relativement onéreuse. Ramené au mètre carré, le prix des AEP à la disposition du grand public est bien plus conséquent que la grande majorité des solutions de bardages en façade. Cependant, le système d'AEP comme outil de gestion thermique de façade ne requiert pas les mêmes fonctionnalités ni la même précision d'affichage que les produits développés pour d'autres usages : le prix des AEP disponibles actuellement sur le marché est donc plutôt à considérer comme un ordre de grandeur permettant une première estimation du coût éventuel d'un tel système. Malgré tout, sans évolution notable de la technologie, il semble ici difficile d'envisager l'utilisation d'AEP comme nouvelle solution de bardage de façade.

Néanmoins, les menuiseries sont des éléments de plus en plus présents en façade, et notamment sur les façades les plus soumises au rayonnement solaire : celles-ci pourraient donc constituer des hôtes plus appropriés au système. De plus, la question de l'isolation thermique des menuiseries a aussi pris une place importante dans les récentes considérations énergétiques, étant donné que ces éléments sont souvent le lieu de ponts thermiques importants au sein du bâtiment [13]. Enfin, d'un point de vue économique, les menuiseries étant déjà des éléments de façade onéreux, y installer un système d'AEP n'entraînerait pas de surcoût trop important (contrairement à une utilisation comme bardage).

Parmi les différents types de menuiseries disponibles sur le marché, il est possible de sélectionner un type particulièrement adapté à l'intégration d'AEP : les menuiseries aluminium. Ce choix s'explique par trois caractéristiques des menuiseries aluminium :

- L'aluminium est un matériau thermiquement très conducteur, ce qui peut entraîner la formation de ponts thermiques importants. (Cf. Figure 6.9) Le système d'AEP pourrait alors agir comme rupteur adaptatif de pont thermique.
- Le cadre en aluminium est un profilé creux, ce qui permet le passage des câbles d'alimentation et de l'électronique, nécessaires à un système d'AEP. (Cf. Figure 6.10)
- Les menuiseries en aluminium sont des produits « luxueux », plus chers que les autres types de menuiseries. Ces produits sont ainsi économiquement plus propices à l'intégration des AEP.

Nous allons donc ici nous concentrer sur l'intégration des AEP sur les menuiseries aluminium sous toutes leurs formes : fenêtres simples, baies vitrées, portes-fenêtres, portes, portes de garage, mais aussi les éléments constituant les murs-rideaux (très utilisés dans les bâtiments de bureaux)<sup>10</sup>.

---

10. L'installation d'AEP aux menuiseries soulève aussi de nombreuses questions psycho-sociologiques et

Type de matériau	Conductivité thermique (W/mK)
Béton	0,8
Verre	0,8
PVC	0,19
Bois	0,04 – 0,12
Aluminium	205,0

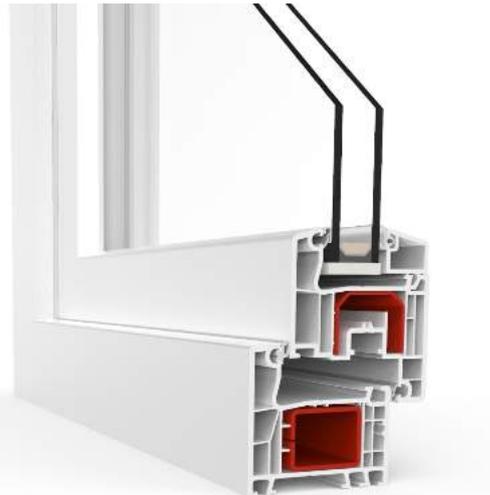


FIGURE 6.9 – Tableau des conductivités thermiques de matériaux relatifs à la menuiserie.

FIGURE 6.10 – Exemple de profilé utilisé en menuiserie.

Il est toutefois plus prudent de vérifier le bien-fondé du choix énoncé précédemment, au travers d'une étude de l'impact d'un système d'AEP sur les performances thermiques d'une fenêtre simple en aluminium. Bien que simplifiée, cette première étude peut fournir une approximation des effets potentiels du système, et pourra par la suite être précisée par les résultats des analyses en laboratoire.

Nous considérons ici une fenêtre à simple battant, d'une taille de 125 par 80 centimètres, soit une superficie de 1 mètre carré (Cf. Figure 6.11). Le cadre en aluminium (Cf. Figure 6.12) a une largeur de 10,7 centimètres, ce qui engendre une superficie de châssis exposée à l'extérieur avoisinant les 0,4 mètres carrés. Ces dimensions proviennent d'un site internet de constructeur, qui fournit aussi les coefficients de transfert thermique du châssis aluminium ( $U_f = 2,2 W/m^2K$ ), et du vitrage ( $U_g = 1,1 W/m^2K$ ) [16]. On soumet ce modèle de fenêtre à une différence de température de 10°C entre l'intérieur et l'extérieur, pour calculer le flux thermique stationnaire en son sein.

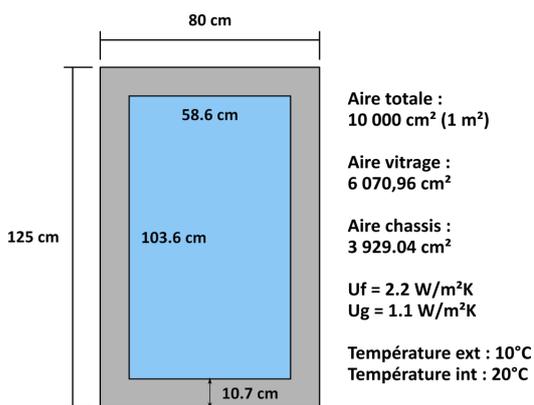


FIGURE 6.11 – Schéma du modèle de fenêtre sis. pour le calcul du flux thermique.

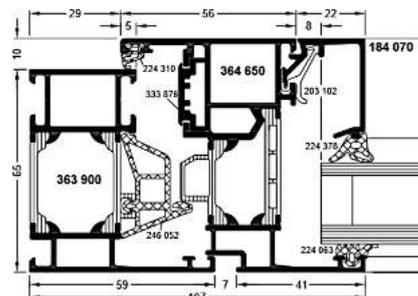


FIGURE 6.12 – Coupe transversale du châssis.

Source : Roplast [16]

Tout d'abord, il est possible de déterminer le coefficient de transfert thermique général réglementaires. En effet, le changement soudain de couleur des menuiseries n'est pas sans conséquence sur l'environnement urbain, et ces variations ne sont généralement pas prévues par les textes de réglementation de la construction. Nous ignorons ici ces questions.

---

de cette fenêtre, qui se rapproche de coefficients que l'on trouve couramment sur le marché :

$$Uw = Aire_{vitrage} \times Ug + Aire_{chassis} \times Uf = 0,6 \times 1,1 + 0,4 \times 2,2 = 1,54W/m^2K \quad (6.1)$$

Cette première formule n'entre pas dans le calcul des flux thermiques du châssis, mais permet de vérifier l'exactitude des données récupérées sur le site du constructeur. Ensuite, le calcul du flux thermique stationnaire dans le châssis aluminium soumis à une différence de température de 10°C se formule ainsi :

$$\Phi = Aire_{chassis} \times \Delta T \times Uf = 0,4 \times 10 \times 2,2 = 8,8W \quad (6.2)$$

Nous pouvons maintenant comparer ce résultat au flux thermique stationnaire mesuré dans un châssis de dimensions identiques, mais de composition différente. Considérons donc un châssis en PVC, de coefficient de transfert thermique  $Uf = 1,3W/m^2K$  :

$$\Phi = 0,4 \times 10 \times 1,3 = 5,2W \quad (6.3)$$

Nous pouvons ainsi remarquer que, comme supposé précédemment, le PVC est ici presque deux fois plus performant que l'aluminium. Admettons alors qu'un système d'AEP appliqué au châssis aluminium permette une réduction de 4°C de la différence de température appliquée au châssis :

$$\Phi = 0,4 \times 6 \times 2,2 = 5,28W \quad (6.4)$$

Dans cette configuration, le flux thermique au sein du châssis aluminium est similaire à celui du châssis en PVC. L'ajout d'un système d'AEP aux menuiseries aluminium permettrait donc de les rendre plus performantes. Cette technologie serait particulièrement adaptée à la rénovation, par exemple pour éviter d'avoir à remplacer toutes les menuiseries aluminium d'un bâtiment. Cependant, pour atteindre ces performances, le système d'AEP devrait être capable de réduire de 4°C la différence de température, ce qui doit être évalué par les résultats d'analyses en laboratoire et la simulation informatique.

### 6.2.3 Caractéristiques des échantillons d'analyses

Deux affichages électrophorétiques différents ont été sélectionnés pour servir d'échantillons aux analyses radiatives. Ces analyses sont réalisées dans les laboratoires de l'école de Chimie ParisTech. Les affichages ont été sélectionnés selon les critères suivants :

- Ils offrent la possibilité d'afficher quatre niveaux de gris.
- Leur taille est identique et adaptée aux machines du laboratoire.
- Aucune électronique n'est liée aux écrans, afin d'éviter d'interférer dans les mesures.
- L'unique différence entre les deux écrans se trouve dans le substrat, dont un est rigide et l'autre souple.

L'utilisation d'un substrat souple permet à l'affichage de s'adapter aux géométries complexes que l'on peut parfois rencontrer en menuiserie. C'est pourquoi il est intéressant de le comparer ici à un substrat rigide, pour déterminer si le type de substrat influe sur les capacités radiatives et/ou thermiques du système.

### 6.2.4 Présentation du protocole des analyses radiatives

Les mêmes analyses radiatives ont été réalisées sur les deux échantillons sélectionnés, dans les laboratoires de l'école Chimie ParisTech. L'expérience consiste à soumettre



FIGURE 6.13 – Photographie des échantillons d'analyse affichant les 4 niveaux de gris.

l'échantillon à une radiation électromagnétique, tout en mesurant la quantité de rayonnement renvoyé par celui-ci. La quantité de rayonnement réfléchi, rapportée à la quantité de rayonnement émis par la source, nous permet de déduire le coefficient de réflexion de l'échantillon<sup>11</sup>. Ce coefficient pourra ensuite constituer une des données d'entrée de la simulation énergétique.

Les analyses ont été effectuées selon un protocole permettant la mesure de la réflectance de surfaces opaques. Une source lumineuse (dont la nature dépend des longueurs d'ondes que l'on souhaite mesurer), émet des ondes électromagnétiques guidées par une fibre optique jusqu'à une plateforme goniométrique, sur laquelle est disposé l'échantillon. Les ondes électromagnétiques réfléchies sont ensuite captées par une deuxième fibre optique, dirigée vers un spectromètre (dont le spectre de mesure est adapté au spectre d'émission de la source lumineuse). La source lumineuse comme le spectromètre sont tous deux orientés selon un certain angle par rapport à l'échantillon. (Cf. Figure 6.14) Tout le dispositif est contenu dans une enceinte close, assurant que les mesures ne soient pas perturbées par des sources électromagnétiques extérieures.

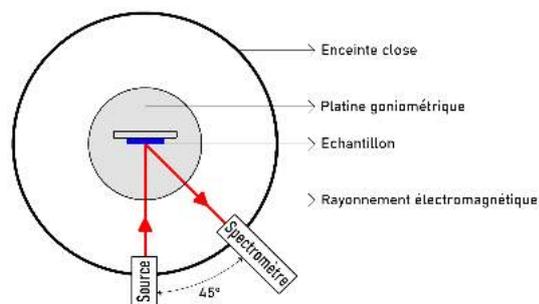


FIGURE 6.14 – Schéma du système de mesure de la réflectance des échantillons.

Dans notre cas, les échantillons ont été soumis à deux sources lumineuses différentes, couvrant le spectre visible : d'abord une led blanche émettant principalement dans les petites longueurs d'onde (Cf. Figure 6.15), puis une lampe halogène émettant principalement dans le rouge. (Cf. Figure 6.16) La source est placée perpendiculairement à l'échantillon, et le récepteur est placé selon un angle de 45°. Suite à la prise de mesures, une dernière

11. Il reste important de préciser que le coefficient de réflexion est susceptible d'évoluer selon la longueur d'onde considérée du spectre électromagnétique. Le coefficient de réflexion général intègre tous les coefficients de réflexion sur un spectre donné.

étape consiste à comparer les quantités d'ondes captées par rapport aux quantités d'ondes émises, pour pouvoir extraire le spectre de réflexion de l'échantillon, et déterminer ainsi son coefficient de réflexion.

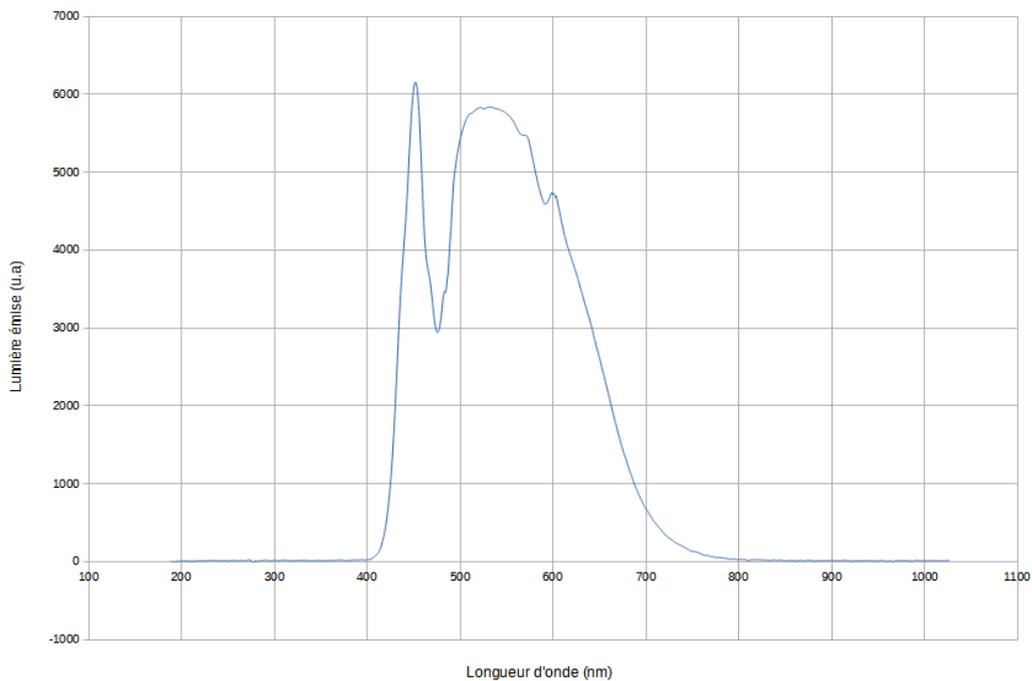


FIGURE 6.15 – Spectre d'émission de la LED blanche.

### 6.2.5 Détails de la simulation énergétique

L'objectif de la simulation énergétique est de proposer une estimation des effets théoriques de l'utilisation d'AEP en menuiserie (et plus hypothétiquement en tant que revêtement de façade) sur les performances énergétiques du bâti, en France métropolitaine. Cette simulation informatique est réalisée avec les logiciels *Rhinoceros 3D* et *Grasshopper*, ainsi que les plugins *Ladybug* et *Honeybee*. Le protocole suivi est identique à une simulation précédemment menée par les universités de Skikda, Constantine 3 et La Rochelle, sur une unité d'habitation située en Algérie [10].

Les calculs sont effectués sur une morphologie de bâti générique : un parallélépipède rectangle de 3m de hauteur pour 7m de large et 10m de long. Selon la réglementation thermique en vigueur (RT2012), les surfaces vitrées doivent représenter au minimum 1/6 de la surface habitable (soit environ  $12m^2$  dans notre cas) [4]. Nous considérons ici que le bâtiment dispose de  $15m^2$  de surface vitrée (légèrement supérieure à la réglementation), et que les façades Ouest, Sud et Est se partagent respectivement 15%, 70% et 15% de cette surface. (Cf. Figure 6.17) La surface des châssis de menuiserie est quant à elle estimée au moyen d'un coefficient de proportionnalité égal à 0,4, qui peut être calculé à partir des données du fournisseur Roplast cité précédemment.

Concernant les caractéristiques des différents éléments, les parois opaques (murs, plancher et toiture plate) forment une coque monobloc en béton d'une épaisseur constante de 0,2m, doublée d'une couche intérieure d'isolant de 0,12m. La réflectance de cette coque est supposée constante dans une première partie de la simulation, puis variable pour ses parois verticales uniquement dans une seconde partie. Le vitrage des menuiseries est double, et les châssis sont en aluminium [6]. La réflectance des châssis (ainsi que des parois opaques

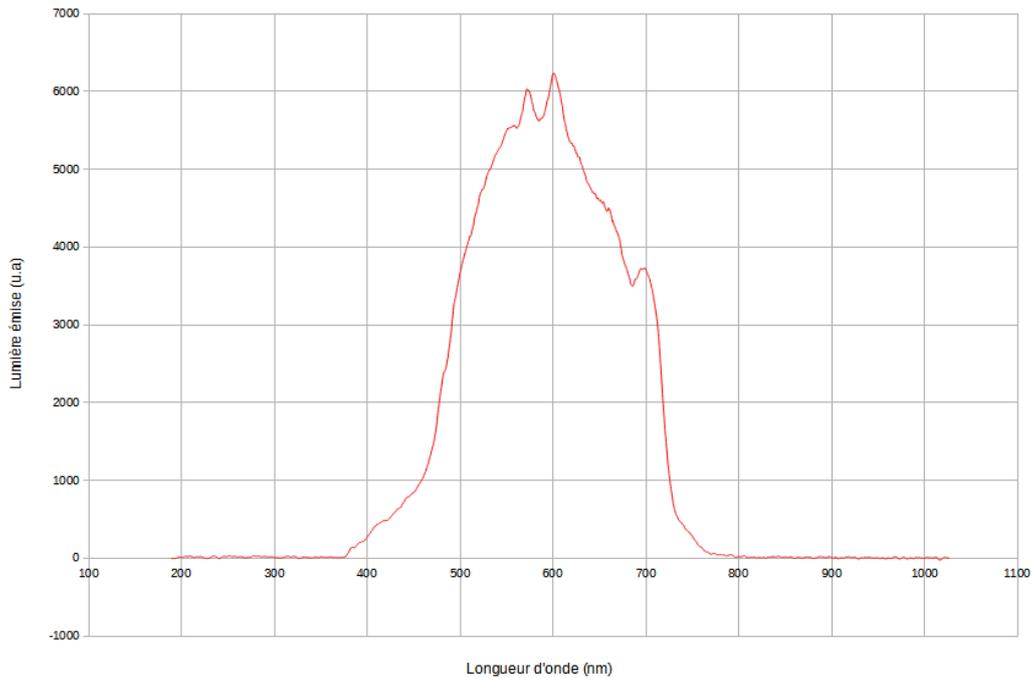


FIGURE 6.16 – Spectre d'émission de la lampe halogène.

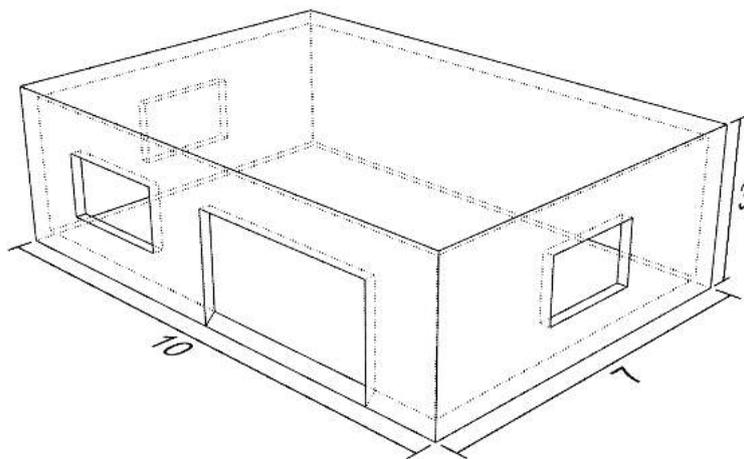


FIGURE 6.17 – Morphologie du bâtiment générique support de la simulation.

verticales en seconde partie) est variable, et déterminée par les coefficients de réflexion obtenus lors des analyses en laboratoire. Toutes les caractéristiques thermiques et radiatives des différents éléments sont résumées dans le tableau 6.1.

Le bâtiment générique considéré est localisé dans l'unité urbaine de Dijon<sup>12</sup>, qui dispose d'une station météorologique fournissant un grand nombre de mesures précises des conditions climatiques de la région. Ces données sont intégrées à la simulation, car le comportement thermique du bâti dépend des conditions auxquelles il est soumis<sup>13</sup>.

Enfin, il est nécessaire d'établir certaines constantes, afin de faciliter les calculs et de concentrer l'étude sur l'impact du phénomène de réflectance. Ainsi, on suppose un bâtiment vide et inoccupé (s'affranchissant ainsi de la consommation énergétique et de l'émission

12. Coordonnées géographiques : 47.27° ; 5.08°, élévation : 227m

13. Nous considérons donc ici que l'unité urbaine de Dijon est assez représentative du climat auquel est soumis le parc urbain de France métropolitaine.

Éléments du bâti	Conductivité thermique (en $W/m.K$ )	Coefficient de réflexion
Béton en toiture et plancher	1,7	0,7
Béton en façade	1,7	0,7 puis 0,05 à 0,68
Isolant	0,24	n/a
Chassis aluminium	2,2 ( $W/m^2K$ )	0,05 à 0,68
Vitrage	0,9	n/a

TABLE 6.1 – Tableau récapitulatif des caractéristiques des éléments.

de chaleur liée aux activités humaines). On considère également une température de sol constante de 18°C, et une infiltration d'air nulle (bâti complètement hermétique).

Le bâtiment sera chauffé et/ou climatisé afin de conserver la température de l'air intérieur entre 20°C et 25°C. Nous observons ici la consommation énergétique totale (en kWh/an) du bâtiment, ainsi que les parts que représentent les consommations en chauffage et en climatisation au sein de cette consommation globale.

## 6.3 Résultats et interprétations

### 6.3.1 Résultat des analyses radiatives

Afin d'obtenir les résultats les plus homogènes possibles sur les longueurs d'onde considérées, les spectres d'émission des deux sources utilisées sont joints (tout comme les spectres de réflexion des échantillons). Une mesure de réflexion d'un échantillon de papier blanc a aussi été effectuée, pour servir de spectre de référence et aider à la lecture. (Cf. Figure 6.18)

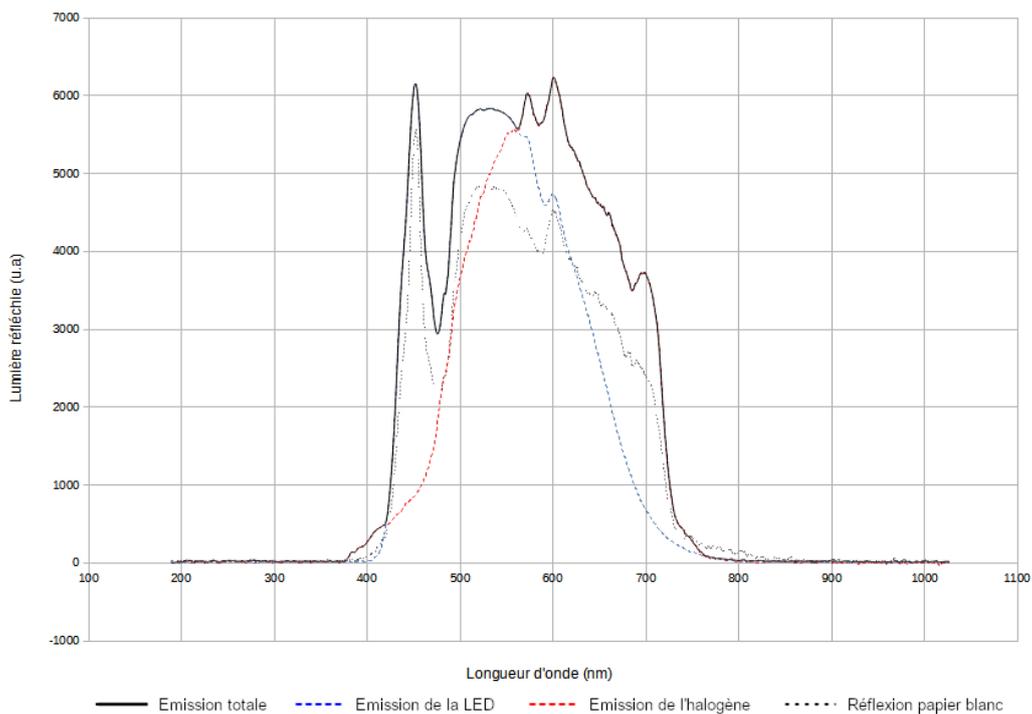


FIGURE 6.18 – Spectre d'analyse total.

Grâce à l'adjonction de deux sources électromagnétiques différentes, il est possible d'analyser les échantillons dans l'entièreté du spectre visible (380nm à 780nm), de façon relativement homogène<sup>14</sup>. Le spectre de réflexion de l'échantillon de papier blanc, une fois comparé au spectre d'émission total, nous permet d'obtenir le coefficient de réflexion de ce papier dans le domaine visible, soit : 0,75 (ce qui correspond bien à un papier très blanc) [15].

L'analyse de l'échantillon d'affichage électrophorétique souple, effectuée sur chacun des quatre niveaux de gris, génère les spectres de réflexion de la Figure 6.19. Tout d'abord, l'affichage semble réfléchir les longueurs d'onde du spectre visible de manière relativement homogène (légèrement plus faible dans les grandes longueurs d'onde). Nous pouvons aussi constater que le spectre de réflexion de la partie la plus claire de l'affichage ressemble fortement au spectre de réflexion de l'échantillon de papier. En effet, les coefficients de réflexion obtenus pour chacun des niveaux de gris (du plus sombre au plus clair) sont 0,06, 0,09, 0,31 et 0,69.

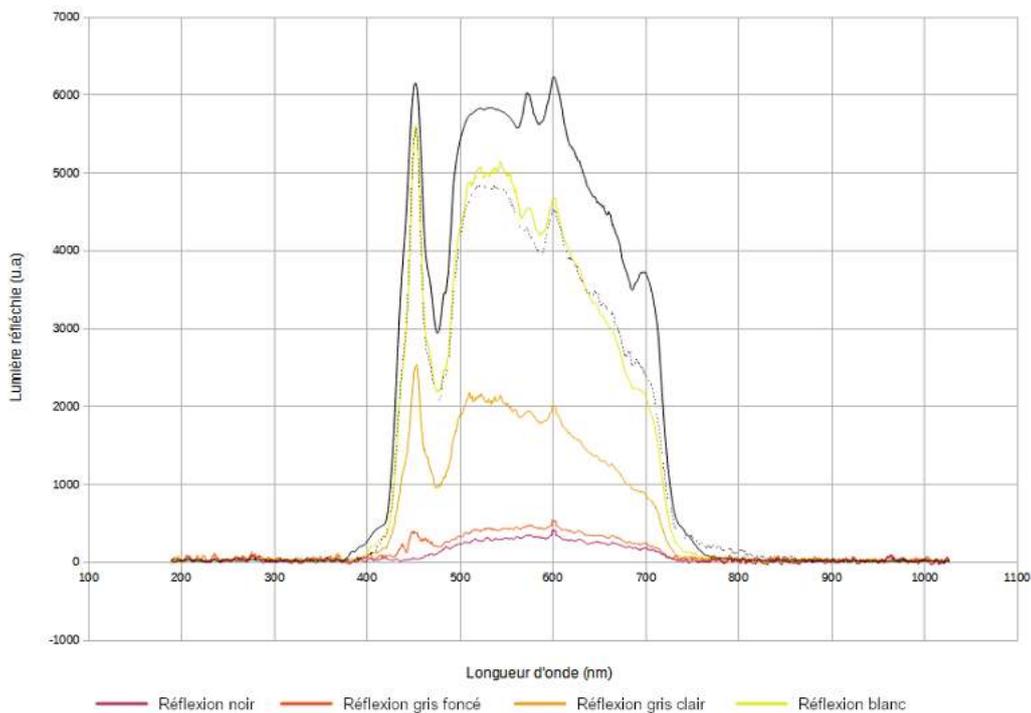


FIGURE 6.19 – Spectres de réflexion de l'AEP souple.

Cet affichage, dans son état le plus réfléchissant, s'approche donc des performances du papier, mais ne parvient pas à atteindre les coefficients de réflexion de peintures blanches (d'environ 0,80). Cependant l'AEP, dans son état le plus sombre, rivalise avec les peintures noires, dont les coefficients de réflexion sont autour de 0,05 [15]. Nous pouvons enfin constater l'évolution non linéaire de la réflectance des différents niveaux de gris de l'affichage souple.

L'analyse de l'échantillon d'affichage électrophorétique rigide, effectuée sur chacun des quatre niveaux de gris, génère les spectres de réflexion de la Figure 6.20. Les spectres générés sont très proches de ceux de l'affichage souple, ce qui peut s'expliquer par la composition chimique identique des deux échantillons. La nature du substrat ne semble donc pas

14. Nous pouvons remarquer une chute de l'émission au niveau des longueurs d'onde correspondant à la couleur verte. Cette discontinuité se retrouve dans la grande majorité des LED, et impacte le profil des spectres de réflexion.

modifier significativement le comportement radiatif de l’affichage. Comme pour l’affichage souple, la partie la plus claire de l’AEP rigide possède un spectre de réflexion similaire à celui du papier. Nous pouvons cependant constater que les coefficients de réflexion obtenus sont différents de l’échantillon précédent : 0,04, 0,15, 0,32 et 0,67 (du plus sombre au plus clair).

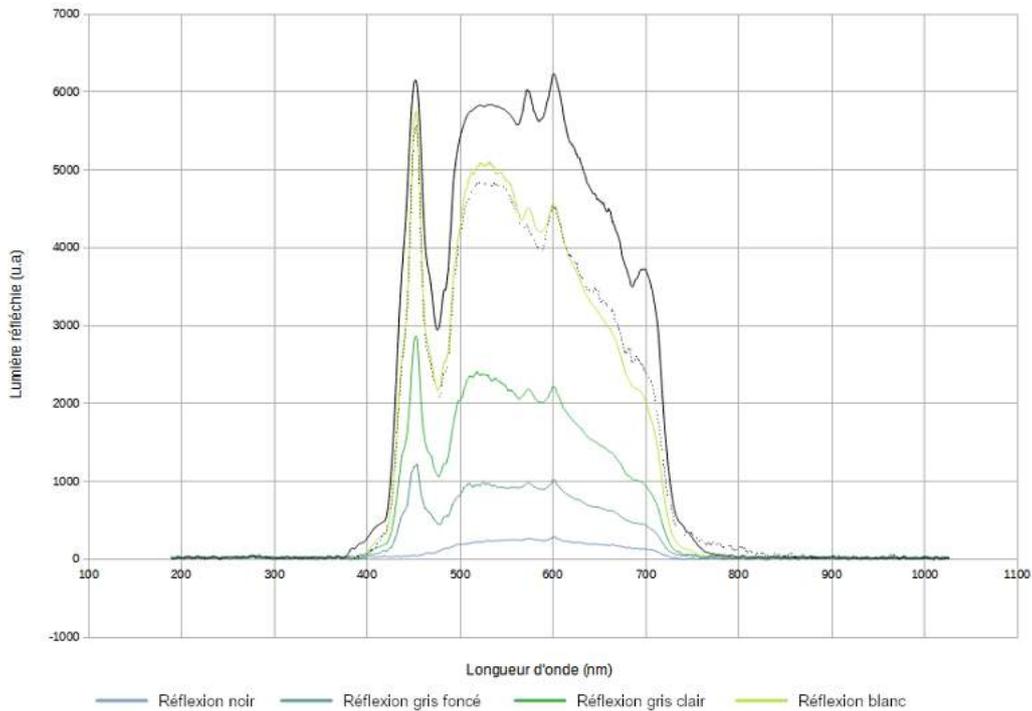


FIGURE 6.20 – Spectres de réflexion de l’AEP rigide.

Cet affichage rigide présente donc une réflectance légèrement inférieure à celle de l’affichage souple, mais offre une évolution plus linéaire entre les différents niveaux de gris. Néanmoins, les différences relevées ici entre les deux affichages sont légères, et doivent donc être considérées avec prudence <sup>15</sup>.

Dans la suite de cette recherche, la simulation énergétique intègre les coefficients de réflexion de l’AEP souple. Ce choix est motivé par le fait que les deux types d’affichage présentent un comportement similaire, mais que l’affichage souple offre potentiellement une intégration aux menuiseries plus aisée.

### 6.3.2 Résultats de la simulation énergétique

La première simulation est effectuée sur le bâtiment complètement dépourvu d’affichage électrophorétique, pour servir de référence aux prochaines simulations. Sur une période d’un an, le bâtiment consomme 14 524kWh au total, dont 14 138 en chauffage et 385 en climatisation. (Cf. Figure 6.21)

Lorsque des AEP sont ajoutés aux menuiseries, la consommation du bâtiment décroît de 0,5% environ. La baisse de consommation se retrouve entièrement dans le besoin en chauffage, et n’a donc aucun effet sur le besoin de climatisation en été <sup>16</sup>. Par contre, l’ajout

15. Il est en effet possible que ces différences soient dues à des approximations de mesure. Des observations plus détaillées devront être menées.

16. Les AEP dans leur état le plus clair présentent en effet un facteur de réflexion équivalent à celui de l’aluminium.

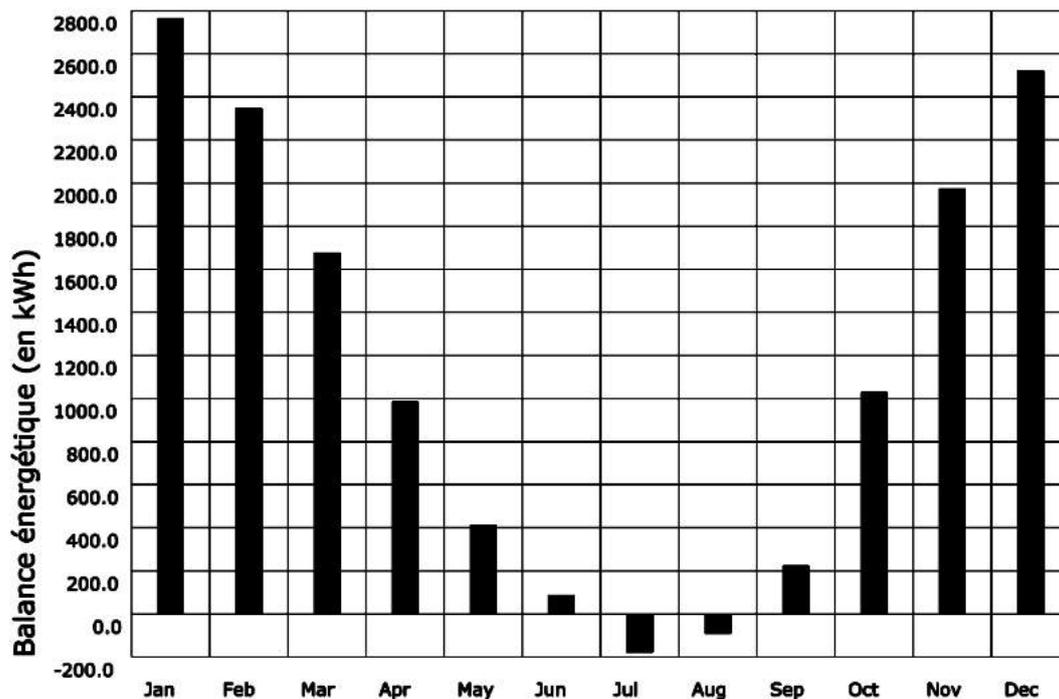


FIGURE 6.21 – Balance énergétique du bâtiment sans AEP.

d'AEP en façade<sup>17</sup> a des effets plus importants : la consommation énergétique totale baisse de 5,2%, et permet des économies à la fois sur les besoins en chauffage mais aussi en climatisation. Nous observons en effet une baisse de consommation de 4,6% pour le chauffage, et de 28,8% pour la climatisation. (Cf. Figure 6.22)

Les résultats obtenus ici semblent invalider l'hypothèse selon laquelle les affichages électrophorétiques pourraient constituer une véritable solution de réduction de la consommation énergétique du bâti. En effet, dans le cas d'AEP intégrés aux menuiseries, la quantité d'énergie économisée n'est pas significative<sup>18</sup>. Cependant, en mettant de côté le paramètre économique, le fait d'utiliser les AEP comme revêtement de façade offre de bien meilleurs résultats, avec un impact non nul sur les performances énergétiques du bâti. Hélas, sans évolution notable, cette technologie ne permet pas de supprimer intégralement le besoin en climatisation, et donc d'éviter l'installation et l'entretien d'un système adapté.

## 6.4 Conclusion et perspectives

### 6.4.1 Retours sur les résultats de l'étude

Considérant l'évolution climatique actuelle à laquelle doit faire face le parc urbain de France métropolitaine, le but de ce travail de recherche était de proposer une solution de gestion dynamique du comportement thermique des façades du bâti. Pour ce faire, l'hypothèse énoncée proposait d'exploiter le phénomène de réflectance, afin de maîtriser le comportement des façades vis-à-vis du rayonnement solaire. Cette hypothèse reposait sur le détournement de la technologie d'affichage électrophorétique, pour une utilisation en architecture. L'objectif consistait donc à évaluer si l'utilisation de cette technologie pouvait constituer une réponse pertinente au problème énergétique rencontré.

17. Dans le cas où l'évolution de la technologie rendrait cette solution économiquement viable.

18. Il est toutefois important de préciser que le pourcentage de réduction de la consommation énergétique des AEP sur menuiserie est dépendant de la nature des parois du bâti, ainsi que des châssis aluminium utilisés.

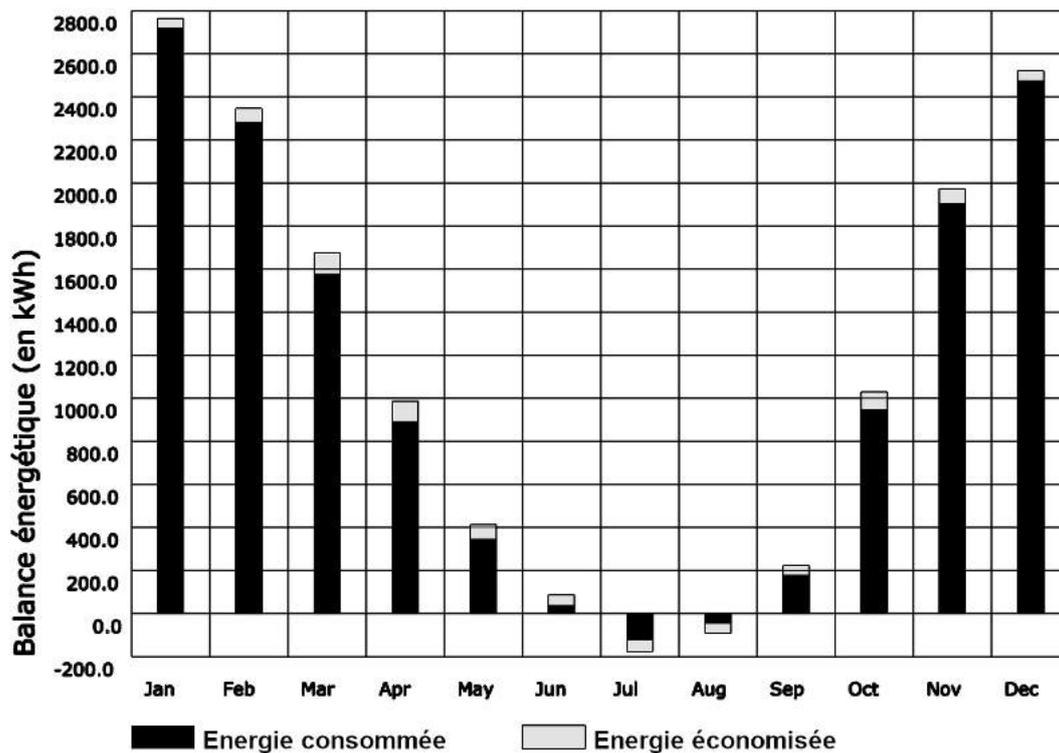


FIGURE 6.22 – Balance énergétique du bâtiment avec AEP en façade.

Ce travail s'appuyait sur une méthodologie en trois parties. Dans un premier temps, il était nécessaire d'explicitier le principe de fonctionnement des AEP, et de définir une stratégie d'implémentation de cette technologie en tenant compte de ses différents atouts et contraintes. Puis, des expérimentations en laboratoire sur des échantillons ont été réalisées par l'École de Chimie ParisTech, afin d'en détailler le comportement radiatif. Enfin, les résultats obtenus ont pu être intégrés à l'algorithme de simulation énergétique, permettant de quantifier les apports théoriques d'un tel système sur la consommation énergétique du bâti sur une année.

Au vu des résultats des expérimentations et des simulations énergétiques, il semble difficile de proposer une solution basée sur l'intégration directe d'AEP aux menuiseries aluminium. En effet, les économies énergétiques apportées par un tel système ne seraient certainement pas à la hauteur des dépenses liées à sa production et à sa mise en oeuvre. D'un point de vue environnemental, il semble déjà plus intéressant d'utiliser les AEP en tant que revêtement de façade, auquel cas le gain énergétique serait perceptible (à condition de relier les AEP à un système de gestion dynamique). Néanmoins à l'heure actuelle, d'un point de vue économique, cette solution n'est pas viable.

Quelques éléments restent cependant à préciser dans la lecture et l'interprétation des résultats. Les chiffres avancés ici sont le fruit d'une étude théorique générale, destinée à proposer une première évaluation des potentiels thermiques d'une technologie nouvelle et en constante évolution.

Les analyses en laboratoire ont été effectuées sur deux échantillons du même fabricant : ces expérimentations ne sont donc pas exhaustives, et il est possible que d'autres affichages électrophorétiques présentent des comportements radiatifs différents. De plus, le matériel de mesure utilisé ne permettait pas l'observation dans le domaine des infrarouges proches (qui représente une part non négligeable des transferts thermiques radiatifs) : nous ne connaissons donc pas le comportement radiatif des AEP dans ce domaine.

---

Concernant le protocole de simulation énergétique, ce dernier s'appuyait sur un certain nombre d'hypothèses afin d'assurer une "neutralité" des résultats. La morphologie du bâti était générique, et le calcul se basait sur le climat de la ville de Dijon. Les variations de la température du sol, la porosité du bâti, et les impacts énergétiques de l'activité humaine ont aussi été négligés. Enfin, l'étude se concentrait sur une unique composition de mur de façade et de châssis de fenêtre. Toutes ces hypothèses sont autant d'éléments ayant un impact sur les résultats obtenus.

#### **6.4.2 Propositions de pistes de recherches ultérieures**

Bien que les résultats de l'étude ne soient pas concluants quant à une application directe de la technologie d'affichage électrophorétique à l'architecture, ils n'invalident toutefois pas complètement cette hypothèse. En effet, cela peut ouvrir la voie à un travail d'adaptation de la technologie aux considérations thermiques : le but serait alors de modifier la technologie actuelle pour la faire correspondre à ce nouvel objectif énergétique.

Dans un premier temps, il serait intéressant de poursuivre la caractérisation du comportement des AEP, d'un point de vue radiatif et thermique. Des expérimentations plus complètes pourraient être réalisées, sur un panel d'échantillons plus large, soumis à des analyses de réflectance, mais aussi de conductivité thermique. Il serait important alors d'étendre la plage d'observation de la réflectance au domaine des infrarouges proches. Les échantillons pourraient ensuite faire l'objet d'analyses destructives, pour déterminer leur composition chimique (et corrélérer cette dernière aux résultats radiatifs et thermiques).

Une évolution majeure de la technologie pourrait alors provenir d'une modification de la composition chimique des affichages. En effet, leur comportement radiatif est directement lié à la nature des particules chargées, soumises au champ électrique variable. Il serait par exemple intéressant d'envisager l'intégration de particules réfléchissant les infrarouges proches, afin d'étendre le spectre de réflexion des affichages<sup>19</sup>. De plus, la nature du milieu apolaire liquide dans lequel sont dispersées les particules chargées devrait aussi être modifiée, afin d'adapter les affichages aux conditions extérieures et éviter ainsi le gel du système.

L'adaptation de la technologie d'AEP à l'usage architectural implique aussi de considérer le changement d'échelle du système. Les surfaces à couvrir seraient bien plus importantes, et cela aurait des répercussions dans le champ électrique généré, et donc dans le système électronique. Par contre, l'objectif étant thermique et non plus visuel, il ne serait plus nécessaire de développer une matrice d'électrodes destinée à l'affichage de pixels, ce qui facilite grandement la réalisation, le fonctionnement, et le contrôle du système (et entraîne aussi une diminution de son coût).

Un dernier aspect important d'une adaptation de la technologie d'AEP au bâtiment se trouve dans la gestion dynamique des affichages. En effet, pour exploiter le changement de réflectance à son plein potentiel, il serait nécessaire d'intégrer au système un outil de captation et de traitement de données environnementales, à la fois intérieures et extérieures au bâti. Cet outil intégrerait différents capteurs, et devrait être capable de transmettre aux AEP des règles comportementales, mises à jour en temps réel en fonction des conditions météorologiques et des besoins thermiques.

Pour conclure, la technologie d'AEP disponible actuellement sur le marché n'est certainement pas une solution viable d'économie d'énergie dans le bâtiment. Cependant, les nombreuses propositions de poursuites de recherche présentées ici pourraient permettre une

---

19. Dans le cas où les résultats d'analyses radiatives montreraient une absence de réflexion dans les infrarouges proches.

---

évolution importante de la technologie, la rendant véritablement efficace en tant que système de régulation dynamique du comportement thermique des façades.

### **6.4.3 Remerciements**

Avant de clôturer cet article, je tiens à remercier mes deux professeurs, Monsieur Maurizio Brocato et Madame Roberta Zarcone, pour leur bienveillance et leur suivi attentif dans toutes les étapes de ce travail. Je remercie aussi Madame Anne-Laure Joudrier, enseignante-chercheuse à l'Ecole de Chimie ParisTech, qui a réalisé les différentes analyses en laboratoire, et sans qui cet article n'aurait pas pu voir le jour.



# Bibliographie

- [1] Aurore BAUDE, Manuel ans Colin, Jérôme DUVERNOY et Alexis FOUSSARD : Chiffres clés du climat - france, europe et monde. *SDES*, 2021.
- [2] Vincenzo COSTANZO, Gianpiero EVOLA, Antonio GAGLIANO, Luigi MARLETTA et Francesco NOCERA : Study on the application of cool paintings for the passive cooling of existing buildings in mediterranean climates. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013.
- [3] Vianney COSTEMALLE : Toujours plus d’habitants dans les unités urbaines. *INSEE FOCUS*, 1(210), Octobre 2020.
- [4] Bureau d’étude KALEGOS : Quelles fenêtres pour mon projet rt 2012? <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/choisir-portes-fenetres-rt-2012/>, 2021.
- [5] Maxime DOYA : *Analyse de l’impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d’un environnement urbain dense*. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2010.
- [6] ENERGIE+ : Coefficients de transmission thermique des profilés d’encadrement (châssis). <https://energieplus-lesite.be/donnees/enveloppe44/enveloppe2/coefficients-de-transmission-thermique-des-profilés-d-encadrement-chassis/>, 2011-11-07.
- [7] Frédéric GENIET : Introduction au transfert radiatif. *HAL open science*, 2013.
- [8] Luke HOWARD : *The climate of London*. International Association for Urban Climate, 1 édition, 1833.
- [9] Theoni KARLESSI, Mat SANTAMOURIS, Afroditi SYNNEFA, Dimosthenis ASSIMAKOPOULOS, Pavlos DIDASKALOPOULOS et K. APOSTOLAKIS : Development and testing of pcm doped cool colored coatings to mitigate urban heat island and cool buildings. *Building and Environment*, 46:570–576, 2011.
- [10] Ouarda MANSOURI, Rafik BELARBI et Fatiha BOURBIA : Albedo effect of external surfaces on the energy loads and thermal comfort on buildings. *Energy Procedia*, 139:571–577, 2017.
- [11] Deborah MIRBEL : *Synthèse et formulation d’encre électrophorétiques pour le papier électronique*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2015.
- [12] Mat SANTAMOURIS, Afroditi SYNNEFA et Theoni KARLESSI : Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85:3085–3102, 2011.
- [13] Association Conseils THERMIQUES : Choisir des fenêtres performantes. [https://conseils-thermiques.org/contenu/choisir\\_fenetres.php](https://conseils-thermiques.org/contenu/choisir_fenetres.php), 2017.

- 
- [14] Lamia TIRAOUÏ : *Proposition pour une analyse radiative thermique des espaces urbains*. Thèse de doctorat, ENSA Nantes, 2010.
- [15] Engineering TOOLBOX : Absorbed solar radiation. [https://www.engineeringtoolbox.com/solar-radiation-absorbed-materials-d\\_1568.html](https://www.engineeringtoolbox.com/solar-radiation-absorbed-materials-d_1568.html), 2009.
- [16] Roplast WINDOWS : L'univers des fenêtres. <https://www.roplastwindows.fr/>, 2020.
- [17] Michele ZINZI, Emiliano CARNIELO et Stefano AGNOLI : Characterization and assessment of cool coloured solar protection devices for mediterranean residential buildings application. *Energy and Buildings*, 50:511–119, 2012.



Production DM  
M. BROCATO & R. ZARCONI  
Collaboratrice :  
J. JAUFFRET  
28 février 2023



**[DM]** Digital Matters est l'un des six départements de l'Ecole nationale supérieure d'architecture Paris-Malaquais. Son nom évoque la matérialité numérique et la centralité de l'information numérisée, qui, pouvant être traitée formellement, donne à la pensée le support extraordinaire des machines. Ces deux modes opératoires soutiennent la production et la recherche architecturale et permettent la transformation de l'édifice en un processus circulaire, continu et contrôlable, de sa conception au réemploi de ses parties, de son optimisation à son fonctionnement intelligent.

Ce volume recueille 6 articles de recherche finalisés début 2022 par des étudiantes et étudiants ayant achevé leur travail de recherche au terme des 3 semestres de séminaire DM. Les sujets traités touchent de multiples domaines allant de la matérialité numérique à l'économie circulaire en architecture en passant par la conception numérique dans le contexte des questions environnementales. Cet ouvrage s'adresse aux étudiants des écoles d'architecture souhaitant s'initier aux mêmes thématiques.

Ainsi à travers les articles présentés ici, nous avons essayé de croiser les regards entre ces différents domaines afin de montrer leur inévitable imbrication. Les transformations, engendrées par le numérique, des modes de production, matérielles ou immatérielles, pratiques ou intellectuelles entraînent, in fine, une réflexion sur le rôle de l'architecte et sur son positionnement dans un contexte en mouvement continu.



**MINISTÈRE  
DE LA CULTURE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

Partenaire de

**PSL**   
UNIVERSITÉ PARIS