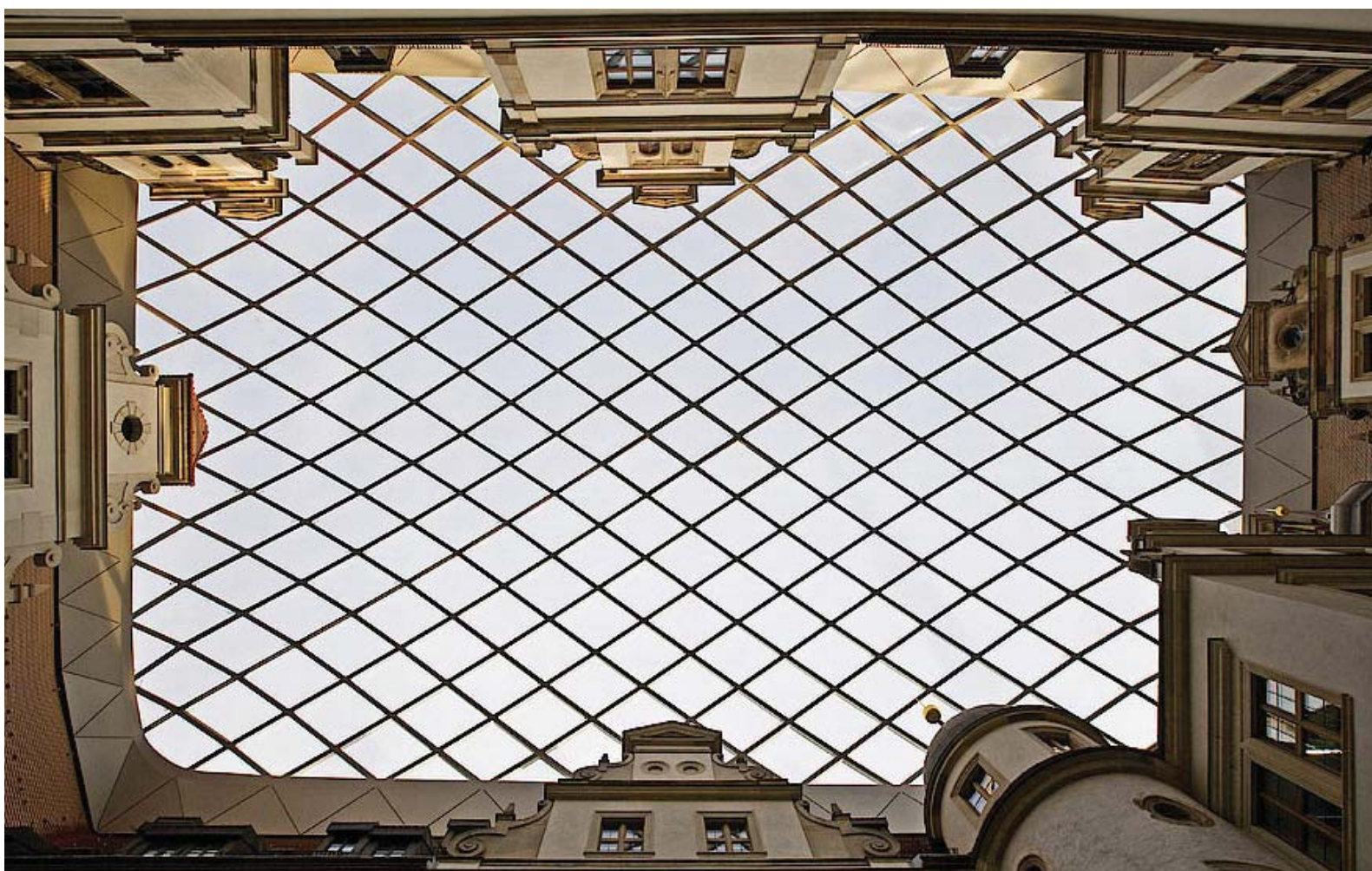




ETFE & REHABILITATIONS DURABLES.

Conditions constructives et confrontation aux usages.

S710 PCPA – Séminaire : Edification et Cultures Techniques

Pratiques constructives du projet architectural

Equipe enseignante:

Suzel BALEZ & Nazilla HANNACHI

Philippe ALLUIN & Dalil HAMANI



Estelle DUPRE

11576

Janvier 2015

REMERCIEMENTS

J'aimerais adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes ayant contribué à l'avancement du présent mémoire.

Mes premiers remerciements sont adressés à Suzel Balez, Nazilla Hannachi, Dalil Hamani et Philippe Alluin, constituant l'équipe enseignante encadrant le séminaire « Edification et cultures techniques », pour la disponibilité, l'aide précieuse et les conseils judicieux dont ils ont fait preuve durant toute la progression de mon travail.

Je souhaiterais également remercier Lars Schiemann et Benedikt Philipp, enseignants au sein de l'Université Technique de Munich pour m'avoir fait partager leurs savoirs et m'avoir guidée dans mes recherches documentaires.

J'aimerais exprimer toute ma gratitude à Moritz Hauschild, architecte et professeur au sein de l'Université Technique de Munich pour avoir pris le temps de répondre à mes interrogations et m'avoir conduite à d'intéressantes pistes de réflexions.

Je souhaiterais vivement remercier Philippe Villien, architecte et professeur au sein de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Belleville pour m'avoir fourni de précieux renseignements sur son travail et pour avoir contribué de manière décisive à l'évolution de ma réflexion.

J'aimerais également remercier les usagers du Pôle régional des Savoirs de Rouen qui, en me livrant leurs ressentis, m'ont ainsi permis une grande avancée dans mon travail.

Enfin, je désire exprimer ma reconnaissance à tous mes proches et amis avec lesquels j'ai pu dialoguer sur mon étude et qui m'ont ainsi soutenue et encouragée tout au long de ma démarche.

RESUME

L'éthylène tétrafluoroéthylène est un nouveau matériau, dont les propriétés intrinsèques alliant transparence, légèreté, ductilité et dont le mode de mise en œuvre permet la conception d'enveloppes performantes thermiquement, connaît une utilisation grandissante sur la scène architecturale.

Le présent mémoire se donne pour objectif de déterminer le contexte architectural dans lequel l'ETFE peut permettre d'aboutir à des opérations de réhabilitations durables.

Dans cette optique, il permettra de cerner les conditions constructives touchant ces enveloppes et permettant d'aboutir à une bonne maîtrise des ambiances internes de l'espace réhabilité. En outre, les usages correspondant aux qualités architecturales et à la mise en œuvre singulière du matériau seront établis.

SUMMARY

Ethylene tetrafluoroethylene is a new material whose properties combine transparency, lightness and ductility and whose implemented systems allow the design of efficient thermal building envelopes. These different aspects explain the increasing utilization of ETFE on the architectural scene.

The objective of this paper is to determine the architectural context in which ETFE allows to succeed sustainable rehabilitation.

In this point of view, it will enable to understand the constructive conditions of these building envelopes allowing a good control of the internal atmosphere of the rehabilitated space. Moreover, functions in correspondence with the architectural qualities and the unique implementation of this material will be established.

INTRODUCTION

A l'heure où les préoccupations énergétiques deviennent centrales et fort du constat que le secteur du bâtiment appelle à lui seul la moitié des consommations énergétiques mondiales, les opérations de réhabilitations sont amenées à être toujours plus exploitées. Cette pratique, en plus d'adapter le bâtiment aux exigences de confort actuelles, prend en considération l'incalculable quantité d'énergie contenue dans tout édifice déjà conçu.

Si l'Architecture du XIX^{ème} siècle préconisait que l'enveloppe du bâtiment amène à une compréhension immédiate de sa fonction et qu'au XX^{ème} siècle, ce sont les forces assurant la stabilité de l'ouvrage qui devaient être lues, de toutes nouvelles problématiques sont de nos jours accordées aux enveloppes, des problématiques synthétisées par Brian Cody¹ dans sa notion d'efficacité énergétique. Selon lui, cette dernière ne peut résulter que d'une étroite relation entre les qualités architecturales du bâtiment, les ambiances perçues au sein de ses espaces et les besoins en énergies qu'il requiert.

Dans cette optique, une attention toute particulière est à accorder à la peau de l'espace réhabilité afin d'optimiser toujours plus l'énergie mise en jeu durant toute la vie d'un bâtiment. Si les facteurs entrant dans la composition d'une enveloppe sont multiples, le choix d'un matériau adapté est, quant à lui, déterminant.

Or actuellement, de nombreux éloges sont accordés à l'éthylène tétrafluoroéthylène, plus connu sous le nom d'ETFE, un succès illustré par les propos de Ian Liddell² :

« Il est rare de voir un nouveau matériau introduit dans l'industrie du bâtiment qui ait un tel impact sur la conception et sur la performance des édifices autant que ce n'est le cas des feuilles d'ETFE. »³

1 - Brian Cody est un ingénieur spécialisé dans l'analyse et la conception de villes, de bâtiments et de systèmes efficaces énergétiquement. Il est également Directeur et Professeur de l'Institut pour les Bâtiments et l'Energie au sein de l'Université Technique de Graz.

2 - Ian Liddell est un Ingénieur en Bâtiment, cofondateur et consultant au sein du Buro Happold, un bureau d'études techniques britannique conçu en 1976 et fournissant des études d'ingénierie, de conception, planification, de management de projet et de conseils pour tout type de bâtiment. Ian Liddell est le concepteur du célèbre Dôme du millénaire à Londres.

3 - LeCuyer, Annette. ETFE= Technology and Design. Berlin: Birkhäuser. 2008, 160p. p.6

Né à la suite d'un programme de recherches destiné à concevoir un matériau aux propriétés isolantes pour la machinerie industrielle, rien ne prédestinait l'ETFE à une entrée dans le domaine de la construction.

Cependant sa transparence, sa légèreté et sa ductilité alliées à son mode de mise en œuvre sous forme pneumatique ont rapidement séduit l'ensemble des acteurs de la construction. Variables, adaptables et isolants, les coussins en ETFE sont loués pour le potentiel qu'ils renferment de concevoir des bâtiments appelant de faibles dépenses énergétiques, à plus forte raison que, le matériau recyclable et résultant d'un processus peu gourmand en énergie, fait la promesse d'une architecture propre et écologique.

Mais si Brian Cody préconise une minimisation énergétique, il prévient néanmoins les concepteurs de la différenciation à réaliser entre l'efficacité énergétique d'un bâtiment et son faible besoin en énergie afin de replacer les ambiances et ainsi l'utilisateur au centre des préoccupations architecturales.

Ainsi, le succès d'une opération de réhabilitation et sa durabilité, sont, selon moi, le résultat d'une harmonie entre trois critères distincts : l'utilisation de technologies adaptées dans le respect de l'ouvrage existant, l'amélioration des performances énergétiques de l'ensemble ainsi que la maîtrise des ambiances pour un confort optimal des usagers.

Ces différents facteurs pris en considération, l'ETFE peut-il permettre la réalisation d'opérations de réhabilitation durables ? Quel impact architectural aura cette nouvelle technologie sur le bâti existant ? Mais surtout, sous quelles conditions constructives l'ETFE présente-t-il toutes les qualités à l'origine de son succès actuel ? Et pour quels usages, une enveloppe en ETFE doit-elle être choisie ?

Les réponses à ces questionnements se dérouleront selon trois axes d'études.

Dans un premier temps, il sera présenté l'origine de l'éthylène tétrafluoroéthylène, les différentes qualités architecturales qu'il présente ainsi que les techniques de mise en œuvre sous forme pneumatique dans l'optique de saisir les différents aspects à l'origine de sa réputation actuelle et qui tendent les concepteurs à penser que ce nouveau matériau peut progressivement remplacer le verre.

Ensuite seront établies les caractéristiques qui permettent de considérer l'ETFE comme un matériau idéal pour s'insérer dans un contexte existant, contexte inhérent à toute opération de réhabilitation. A travers différentes études de cas , il sera jugé l'impact, autant structurel qu'architectural, que peut alors avoir cette nouvelle technologie sur le bâtiment existant.

Enfin, il sera progressivement déterminé le contexte architectural adapté aux caractéristiques des enveloppes en ETFE et permettant alors de conclure à une réelle durabilité des opérations de réhabilitation. Ainsi, seront mises en évidence les conditions d'échelles aboutissant à une réelle minimisation des ressources, les conditions structurelles permettant d'aboutir à une meilleure maîtrise des ambiances tandis qu'un dernier volet illustrera les usages en correspondance avec les différentes caractéristiques de ces nouvelles enveloppes.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
RESUME / SUMMARY	3
INTRODUCTION	4
SOMMAIRE	7
I. L'ETFE, UN MATERIAU EN ACCORD AVEC LES ATTENTES CONSTRUCTIVES ACTUELLES	10
1.1 Origine et développement	11
a- Définition de l'ETFE	11
b- Naissance et enjeux	13
c- Apparition sur la scène architecturale - Les réalisations déterminantes	13
1.2 Du granulé à son recyclage	20
a- Processus de fabrication	20
b- Vie au sein du bâtiment	24
c- Durabilité	27
1.3 Techniques de mises en oeuvre	29
a- Utilisation des feuilles d'ETFE en couches simples	29
b- Utilisation des feuilles d'ETFE en structure pneumatique	29
c- Innovations constructives	32

II. L'ETFE ET SA RELATION AVEC L'EXISTANT	35
2.1 Ductilité et géométrie	36
a- Adaptabilité à l'existant	36
b- Liberté formelle du matériau	37
2.2 Impact structurel	41
a- Légèreté du matériau	41
b- Conception de la structure primaire	42
2.3 Impact architectural	47
a- En façade: un élément en contraste	47
b- En couverture: un élément qui s'oublie visuellement	50
III. L'ETFE, CONDITIONS CONSTRUCTIVES ET CONFRONTATION AUX USAGES	52
3.1 Conception structurelle et condition d'échelle	53
a- Nature des charges à reprendre	53
b- Conséquences structurelles	54
c- Pertinence de la grande échelle	57
3.2 Conception des coussins et conséquences sur les ambiances	59
a- Ambiance lumineuse	59
b- Ambiance thermique	61
c- Ambiance acoustique	66
3.3 Confrontation de l'enveloppe aux usages	70
a- Une enveloppe en relation directe avec l'extérieur	70
b- Une enveloppe vivante: quelle possibilité pour le logement?	73

CONCLUSION	77
ANNEXES	79
I- ETUDES DE CAS	79
Annexe n°1: Réhabilitation du Pôle régional des Savoirs	80
Annexe n°2: Réhabilitation de la Résidence de Dresde	83
Annexe n°3: Réhabilitation d'un entrepôt : La Maison Duong 2	86
Annexe n°4: Réhabilitation du complexe de bureaux VIAG AG	88
Annexe n°5: Réhabilitation de la Tour Zehrfuss	91
Annexe n°6: Frosilos: Reconversion de silos à grains	93
II- COMPTE RENDUS DE VISITES ET D'ENTRETIENS	95
Annexe n°7: Rencontre avec Moritz Hauschild	96
Annexe n°8: Visite du Pôle régional des Savoirs	99
Annexe n°9: Rencontre avec Philippe Villien	105
III- LISTE DES FIGURES	109
BIBLIOGRAPHIE	115

L'ETFE,
UN MATERIAU EN ACCORD
AVEC LES
ATTENTES CONSTRUCTIVES
ACTUELLES

L'ETFE, un matériau dont l'apparition est récente sur la scène architecturale fait actuellement l'objet de nombreuses recherches visant à améliorer toujours plus ses performances. Sa légèreté et sa transparence le rendent précieux aux yeux des concepteurs et l'amène à rivaliser de manière croissante avec le verre. Mais, à ces deux qualités architecturales s'ajoute en outre la promesse d'une conception propre et écologique, répondant aux attentes actuelles.

1.1 Origine et développement

a. Définition de l'ETFE

L'Ethylène tétrafluoroéthylène, plus connu sous le diminutif ETFE se définit comme un fluoropolymère thermoplastique. Il est le résultat d'une copolymérisation entre l'éthylène et le tétrafluoroéthylène.

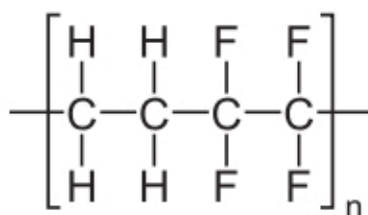


Figure 1: Motif de répétition de l'ETFE

Les polymères, macromolécules formées par la liaison de plusieurs monomères, constituent une classe de matériaux synthétiques dont l'utilisation dans le domaine de la construction est très récente. Pourtant, ils détiennent un grand avantage pour les architectes. Les différents monomères entrant dans la composition de ces macromolécules possèdent chacun leurs propres caractéristiques et leur combinaison assure l'obtention d'un matériau possédant des propriétés réglées et choisies. Le matériau se plie alors aux volontés des concepteurs qui peuvent, par conséquent, devenir totalement maîtres du design de leur bâtiment.

Par ailleurs, si les combinaisons des monomères entre eux sont infinies, tous les polymères ont pour propriétés communes leur légèreté, leur souplesse, leur stabilité à des températures modérées ainsi que leurs propriétés d'isolants électriques et thermiques.

Cependant, l'agencement des monomères entre eux permet de distinguer trois catégories de polymères qui voient alors leurs propriétés varier : les thermoplastiques, les élastomères¹ et les thermodurcissables². (Figure 2)

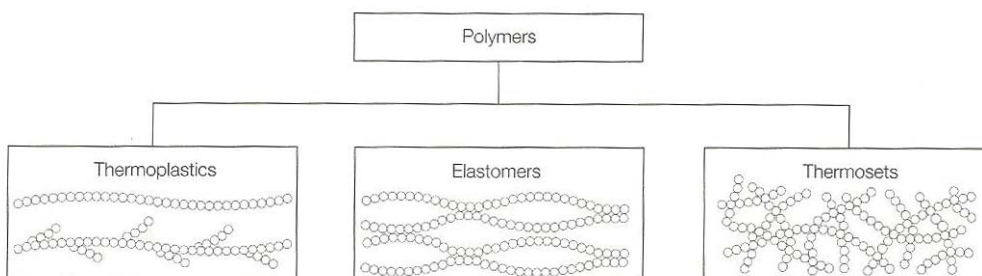


Figure 2: Agencements des monomères correspondant aux trois catégories de polymères

1- Elastomère : Polymère dont les monomères forment de longues chaînes moléculaires liées entre elles et présentant de grandes propriétés élastiques.

2- Thermodurcissable : Polymère dont les monomères sont liés entre eux par de fortes liaisons chimiques. Sous l'action de la chaleur, ces composés durcissent de manière irréversible.

La figure précédente illustre que les polymères thermoplastiques, classe à laquelle appartient l'ETFE, sont caractérisés par un agencement linéaire ou ramifié des monomères les composant. Les molécules ne sont pas liées mais maintenues entre elles par des forces physiques qualifiées de faibles, à savoir les forces de valences secondaires¹. Les chaînes de monomères peuvent alors facilement bouger sous l'effet de la chaleur, un phénomène expliquant la ductilité et la malléabilité de ces polymères, deux qualités devenant d'autant plus importantes que la température est élevée.

Outre ces précieuses propriétés, seuls les polymères thermoplastiques possèdent la qualité d'être totalement recyclable dans la mesure où ils peuvent être totalement refondus puis remoulés.

Si la classe des polymères thermodurcissables est très variée et regroupe de multiples matériaux utilisés au quotidien, à savoir le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène ou encore le polystyrène, c'est à celle des fluoropolymères que se rattache l'ETFE.

Les fluoropolymères sont des polymères dont le motif de répétition est un fluorocarbure. Les nombreuses liaisons Fluor-Carbone qu'il possède, au nombre de quatre pour l'ETFE, assurent la stabilité de la macromolécule. La grande qualité de cette catégorie concerne ses propriétés de surface. Extrêmement lisse, elle permet l'obtention de matériaux qualifiés d'autonettoyants sur lesquelles impuretés, moisissures et poussières ne peuvent adhérer. En outre, les fluoropolymères sont non-inflammables et connaissent une très bonne résistance aux dégradations causées par les rayons ultraviolets ou par les intempéries.

Mais les propriétés mécaniques des fluoropolymères, qualifiées de faibles, n'en font généralement pas de bons matériaux de construction. Seuls les coussins en ETFE et les tissus réalisés en PTFE², le polymère le plus voisin structurellement de l'ETFE, peuvent être utilisés dans ce domaine.

Ce constat explique qu'originellement, l'ETFE, ne fut pas conçu dans l'optique d'une utilisation dans le domaine de la construction.

1- Forces de valence secondaires : Forces reposant sur des interactions électrostatiques des éléments participants à la liaison. La force de liaison est générée par l'attraction entre deux atomes ayant des charges électriques dissemblables. Ces liaisons possèdent une force inférieure aux liaisons de valence principales, agissant entre les différents composants d'une molécule.

Engelsmann, Stephan; Spalding, Valérie; Peters, Stefan. *Plastiques: En architecture et construction*. Berlin: Birkhäuser. 2010. 176p.

2- PTFE : Polytétrafluoroéthylène, polymère de tétrafluoroéthylène obtenue par pyrolyse de chlorodifluorométhane CHClF₂ à une température comprise entre 700 et 800°C.

b. Naissance et enjeux

La naissance de l'éthylène tétrafluoroéthylène fut permise par DuPont de Nemours, une entreprise fondée en 1802 à Wilmington par Eleuthère du Pont de Nemours afin d'usiner la fabrication d'explosifs dont le premier sera la poudre à canon. Depuis, le groupe s'est diversifié dans les différents domaines que sont l'agriculture, la nutrition, l'électronique et les communications en offrant des innovations scientifiques et techniques de pointe.

Si le PTFE fut découvert inopinément par le groupe en 1938, suite à des recherches pour la conception d'un nouveau réfrigérant, l'ETFE fut, quant à lui, le résultat d'un long programme de recherches. L'objectif était de parvenir à la conception d'un matériau isolant pour des machines industrielles et qui devait, aussi bien sous hautes que basses températures, être résistant à la friction et à l'abrasion.

En 1940, l'entreprise DuPont dépose alors le brevet pour la création de l'ETFE, sous le nom de marque Tefzel® mais sa commercialisation ne débute cependant que trente années plus tard, en 1970 sous forme de câbles isolants aux Etats-Unis et dans la ville de Höchst, en Allemagne. Le nouveau matériau, dont la résistance mécanique est meilleure que celle du PTFE, est alors grandement utilisé dans les domaines pétrolier, automobile, nucléaire et aérospatial. Par ailleurs, la grande stabilité du composant en fait une ressource clef dans l'industrie chimique.

De nos jours, la production et la commercialisation de l'ETFE sont détenues par quatre grandes sociétés sous les divers noms de *Tefzel* pour DuPont, *Fluon* pour Asahi Glass Company, *Neoflon* pour Daikin et *Texlon* pour Vector Foiltec.

Et c'est justement cette dernière entreprise, actuellement leader dans la conception en ETFE, qui préconisa l'utilisation de ce nouveau matériau dans le domaine de l'Architecture.

c. Apparition sur la scène architecturale – Les réalisations déterminantes

Contrairement aux matériaux de construction pouvant être caractérisés de classiques tels que le bois, la brique, le béton ou encore le verre, l'ETFE est un matériau récent dont l'utilisation est en plein essor. Les premières applications de l'ETFE datent effectivement du début des années 1980 et la technologie ne cesse depuis de se développer.

La toute première utilisation de l'ETFE concerne l'opération de réhabilitation d'une serre au sein du Burger's Zoo dans la ville d'Arnhem, à l'est des Pays-Bas : la Mangrove Hall (Figure 3). En 1982, par suite de l'effondrement de son toit préalablement réalisé en FEP, l'entreprise Vector Foiltec fut appelée. Comme l'ETFE, le matériau originel appartient à la famille des fluoropolymères mais la résistance aux forces de déchirement qu'il présente est moindre d'une part et sa masse est plus importante d'autre part. Si la structure porteuse en poteaux et câbles métalliques fut réutilisée, l'enveloppe fut, quant à elle, totalement changée. Ainsi, l'espace de 45 mètres de long fut recouvert de coussins à trois feuilles d'ETFE, chacun d'une portée de 3 mètres et gonflés par de l'air à une pression légèrement inférieure à celle de la construction originale. La grande transparence de l'ETFE permit l'obtention d'un espace baigné de lumière où les palétuviers se développèrent parfaitement.



Figure 3: Vue du projet Mangrove Hall, Burgers'Zoo

Au vu du succès de cette opération, l'entreprise Vector Foiltec mit au point un système constructif de coussins d'ETFE pour la réalisation d'un nouveau type d'enveloppes.

Quelques années plus tard, en 1985, Jay Baldwin¹, un étudiant de Buckminster Fuller² conçut le « Pillow Dome » (Figure 4), qui peut être considéré comme l'ancêtre d'un des projets les plus significatifs réalisé en ETFE: l'Eden Project.



Figure 4: Vue du projet Pillow Dome

Le Pillow Dome, qui consiste en une structure primaire en aluminium sur laquelle furent fixés des coussins triangulaires en ETFE, s'appuie sur la théorie des dômes géodésiques de Buckminster Fuller. Ces dômes sont des constructions sphériques réalisées grâce à un treillis dont les barres doivent appuyer chaque cercle formant la sphère. Le Pavillon des Etats Unis, réalisé à l'occasion de l'Exposition de Montréal de 1967 est l'un des meilleurs exemples de cette typologie constructive réalisé par Buckminster Fuller. Pour lui, elle répondait parfaitement à la définition qu'il avait fournie de « *l'efficacité* » en 1938 dans son ouvrage *Nine Chains to the Moon*, à savoir « *faire le plus avec le moins* »³. La forme sphérique de ces dômes assure effectivement la couverture d'une surface maximale avec une quantité minimale de matériau, tout en répondant aux désirs de Fuller pour une architecture légère.

1-Jay Baldwin : Designer industriel et écrivain américain, né en 1933 qui diffusa largement les idées de Buckminster Fuller. Il fut l'un des premiers à appuyer l'utilisation des énergies renouvelables.

2- Buckminster Fuller : Né en 1895, il fut un architecte, théoricien et inventeur les plus influents de son siècle. Il est à l'origine de la théorie des dômes géodésiques.

3 - «Efficiency = doing more with less». Fuller, Buckminster. *Nine Chains to the Moon*, Philadelphie: Lippincott, 1938.

C'est donc selon ces théories que fut conçu le Pillow Dome qui, de surcroît, révéla les propriétés de grande transmission lumineuse, de faibles besoins de maintenance et de grande stabilité du polymère. A contrario, le projet mit en lumière la difficulté de conception de ces structures dont le développement fut alors quelque peu freiné.

Seize ans plus tard, les théories de Buckminster Fuller associées au développement de l'outil informatique et à l'accroissement du savoir-faire de Vector Foiltec aboutirent à l'une des opérations les plus significatives dans le développement de l'ETFE. C'est en effet en 2001, à St Austel, une ville des Cornouailles en Angleterre que Nicholas Grimshaw réalisa l'Eden Project.



Figure 5 a.: Vue de l'Eden Project

Ce projet constitue un parcours paysagers où l'Homme peut expérimenter différents biomes¹, chacun délimité par un dôme recouvert d'ETFE pour une surface totale de 30 000m². A l'inverse des précédents projets, l'Eden Project constitue la première opération considérant l'ETFE comme un matériau unique, mettant à profit ses propriétés et qui, par conséquent, n'aurait pu être réalisée en aucun autre matériau. Pour les dômes, dont les diamètres varient entre 18 et 65 mètres, une couverture en verre aurait engendré des charges trop importantes et une structure porteuse trop imposante aurait alors dû être élaborée, réduisant l'apport lumineux pour les plantes. La constitution d'ensemble du projet peut être observée sur les documents ci-après.

1 - Biome : « Vaste région biogéographique s'étendant sous un même climat, comme la toundra, la forêt tropicale humide, la savane ou encore le récif corallien. » - Biome. *Dictionnaire de français LAROUSSE*. [En ligne]. Disponible sur <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/biome/9441>

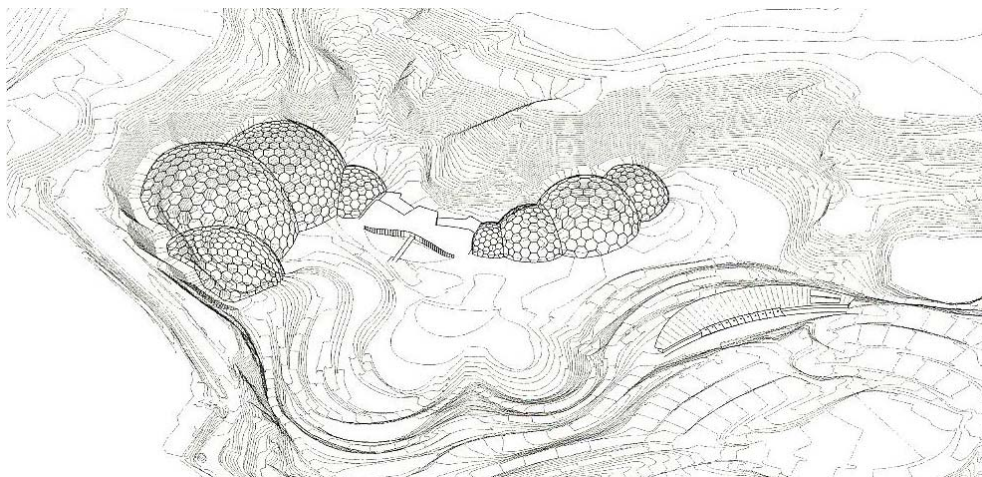


Figure 5 b.: Insertion du projet dans la topographie du site

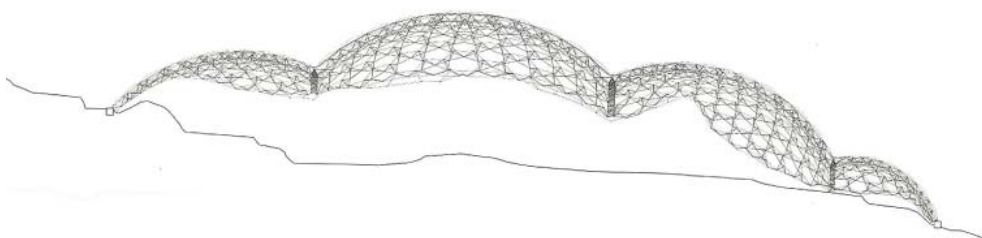


Figure 5 c.: Vue de l'Eden Project en coupe

La légèreté de l'ETFE fut un élément clef pour cette conception dont le poids total était inférieur à celui de l'air contenu dans les huit dômes¹. Cette donnée permet de qualifier l'Eden Project comme la possibilité et la promesse d'une architecture légère, transparente et durable, une promesse qui déclencha justement le développement du matériau.

Les coussins en ETFE, de forme hexagonale, ont des diamètres s'étendant de 5 à 11 mètres et sont portés par des profilés métalliques tubulaires d'un diamètre de 500 mm. L'échelle de la structure est illustrée sur la figure 5 d.

¹ - Le poids surfacique de l'ensemble était de 22kg/m².

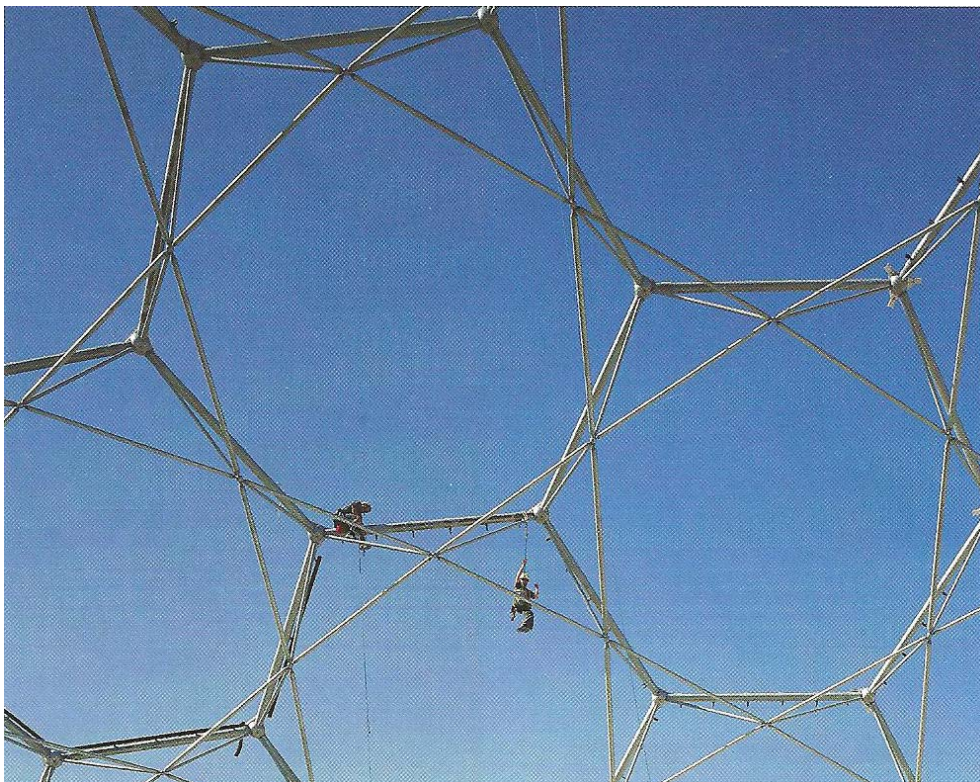


Figure 5 d.: Structure primaire de l'Eden Project

La principale inquiétude de l'entreprise Vector Foiltec concernait la manière de reprendre les forces de vent et les charges liées à la pluie et à la neige s'appliquant sur la mégastructure. Si l'idée initiale prévoyait un renforcement grâce à un réseau de câbles, les solutions mises en place furent celles d'augmenter l'épaisseur de la feuille externe du coussin d'une part et de permettre une variation de la pression de l'air en leur sein d'autre part (entre 250 et 400 Pa) afin d'augmenter la cambrure des coussins jusqu'à 15%. Les divers facteurs que sont la taille, la nature et la valeur des forces à reprendre, l'épaisseur des feuilles ainsi que la pression au sein des coussins les rendent tous uniques et expliquent la nécessité de l'outil informatique pour une telle conception.

Outre la précieuse qualité de légèreté de l'ETFE qui assure une liberté de design pour les concepteurs, sa grande transparence rend par ailleurs possible la création d'enveloppes communicatives. Le projet de l'Allianz Arena, réalisé par les architectes français Herzog & deMeuron en 2005 illustre particulièrement bien cet aspect. Effectivement, le stade implanté au nord de la ville de Munich devait être conçu pour les deux équipes de football que sont le FC Bayern et le TSV Munich. Afin de les distinguer, les architectes avaient dès le départ de leur conception, l'idée d'un jeu de lumières. Ainsi, l'Allianz Arena s'illumine en rouge, en bleu ou en blanc selon les équipes représentées.

Par ailleurs, la ductilité du matériau fut mise en exergue pour créer une forme introvertie permise par l'association de 2765 coussins d'ETFE de forme losangique, dont la plus grande des diagonales varie entre 4,5 et 16,5 mètres de long.



Figure 6 a. : Vue d'ensemble de l'Allianz Arena

Figure 6 b. : Dispositif lumineux de l'Allianz Arena

L'architecture utilisant l'ETFE semble donc être en plein essor et associée à des projets toujours plus impressionnants et technologiques. Mais l'utilisation d'un tel matériau correspond-il aux attentes de constructions actuelles et ce notamment en ce qui concerne les critères d'une architecture durable ?

1.2 Du granulé à son recyclage

a- Processus de fabrication

Dans le milieu de la construction, l'ETFE est principalement utilisé sous forme de feuilles dont l'épaisseur varie entre 50 et 250 micromètres. Afin d'arriver à ce produit final, plusieurs étapes sont nécessaires, à savoir la formation du polymère d'ETFE, sa transformation à des buts de stockage ainsi que la production de feuilles, autant d'étapes qui seront successivement décrites dans cette partie.

Comme cela a pu être observé précédemment, le motif de répétition d'un polymère d'éthylène tétrafluoroéthylène est constitué de deux monomères que sont l'éthylène et le tétrafluoroéthylène (TFE). Par conséquent, la première étape du processus de fabrication consiste en la synthèse de ce dernier.

Si le premier protocole fut proposé en 1933 et reposait sur une décomposition du tétrafluorométhane par un arc électrique, cette synthèse s'est simplifiée au cours des décennies.

Préparation du HF:
 $\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{HF} + \text{CaSO}_4$

Préparation du CHCl_3 :
 $\text{CH}_4 + 3\text{Cl}_2 \rightarrow \text{CHCl}_3 + 3\text{HCl}$

Préparation du CHClF_2 :
 $\text{CHCl}_3 + 2\text{HF} \rightarrow \text{CHClF}_2 + 2\text{HCl}$
 (SbF_3 catalyst)

Synthèse du TFE (Pyrolyse)
 $2\text{CHClF}_2 \rightarrow \text{CF}_2=\text{CF}_2 + 2\text{HCl}$

Figure 7: Synthèse du TFE

La technique de fabrication actuelle menant au monomère de TFE est constituée de quatre réactions chimiques dont les deux premières permettent la formation d'acide fluorhydrique (HF) et de chloroforme (CHCl_3). Ces deux produits réagissent ensuite ensemble pour aboutir à la formation de CHClF_2 et de HCl . Ces derniers sont ensuite refroidis puis placés dans un bain de solution basique afin d'éliminer les traces de HCl . Le gaz obtenu est alors compressé et dilué afin d'aboutir au TFE.

L'ETFE est ensuite formé grâce à une réaction de copolymérisation entre le TFE et un monomère d'éthylène (Figure 8). Cette dernière étant dangereuse et pouvant mener à des explosions, elle doit être effectuée dans un environnement à faible pression, dans un solvant inerte de chlorofluorocarbure. Elle sera par ailleurs amorcée par du peroxyde fluoré et le méthanol servira d'agent de transfert. Durant la réaction, la phase de mélange de tous les composants est cruciale dans la mesure où plus le temps de mixage est important et meilleure est la pureté du polymère. Ce constat devient particulièrement intéressant sachant que les thermoplastiques sont des composés complètement recyclables et qui peuvent alors améliorer leurs propriétés lorsqu'ils sont réemployés puisqu'ils sont de nouveaux mélangés.

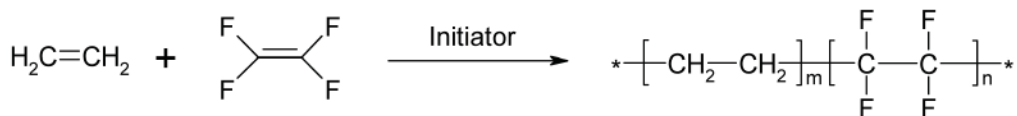


Figure 8: Synthèse de l'ETFE

Lors de cette réaction, et ce comme pour toute synthèse de polymères, il est possible d'ajouter des additifs qui permettent d'adapter le matériau obtenu aux choix de son concepteur. Ainsi, la couleur, la résistance au feu ou encore les propriétés mécaniques du polymère pourront être modifiées.

Si le produit semi-fini se présente sous forme de poudre, celle-ci est souvent transformée en granulés à des fins de faciliter le transport et le stockage.

Cette seconde étape du processus de fabrication repose sur l'utilisation d'une extrudeuse (Figure 9), constituée d'une vis sans fin enveloppée dans un fourreau cylindrique et comprenant trois zones : la zone d'alimentation, la zone de compression et la zone de pompage. La première, située au début de la vis, est surplombée d'un cône d'alimentation destiné à l'introduction du polymère, la seconde zone a pour objectif de plastifier la matière grâce à une augmentation progressive de la pression et de la température par propagation des forces de cisaillement, une propagation indispensable à la fusion de l'ETFE. Dans la zone de pompage, la matière est amenée jusqu'à la filière. A la sortie de celle-ci, une lame rotative permet de découper régulièrement le produit en granulés. Ces derniers sont ensuite immédiatement refroidis par un circuit d'eau.

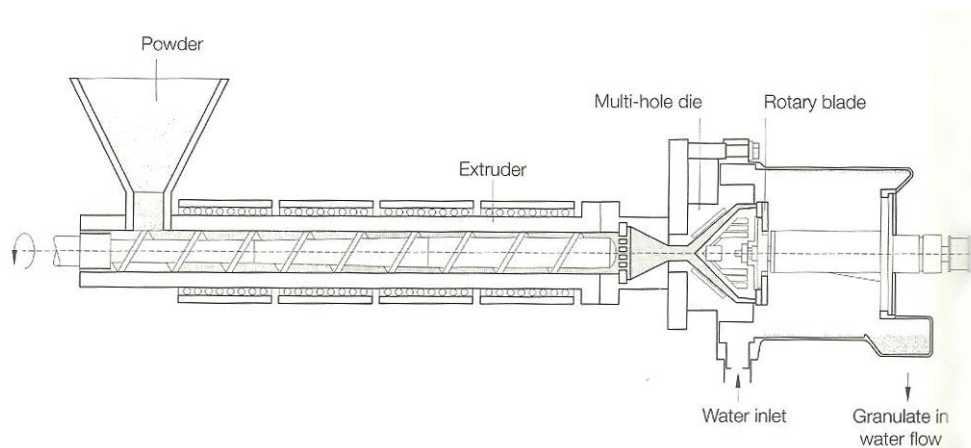


Figure 9: Schéma du fonctionnement d'une extrudeuse

L'étape de granulation est suivie par celle de fabrication des feuilles pouvant être réalisée suivant différentes méthodes : la méthode du moulage et celle des transformations thermoplastiques.

En ce qui concerne la première méthode, actuellement la plus simple, le polymère doit préalablement être mélangé avec un solvant basique. Mais cette action n'est pas sans conséquences sur les propriétés de l'ETFE qui ont alors tendance à être amoindries. Par voie de conséquence, pour une utilisation des feuilles dans le domaine de la construction, il sera préférable d'employer la méthode des transformations thermoplastiques.

Ces transformations peuvent se diviser selon trois grands procédés : le calandrage, l'extrusion par buse à fente large et l'extrusion par buse annulaire, qui ont tous la propriété commune de ne pas utiliser de solvants supplémentaires et donc de conserver la pureté de la matière première.

Le calandrage, dont la matière première est la poudre d'ETFE consiste tout d'abord à faire fondre cette dernière puis à passer le produit obtenu entre deux calandres, à savoir des cylindres généralement chauffés et entraînés mécaniquement. L'opération est renouvelée plusieurs fois avant de refroidir la feuille. Comme le conseille Jean-François Agassant et Robert Hinault dans leur étude *Plasturgie, fabrication de corps creux, de films et de fils*¹, la méthode de calandrage est à préférer dans le cas de production de grandes séries de matériau, où l'on recherche à la fois qualité et débit de production important, pouvant aller de 2 à 6 tonnes par heure. Mais l'impact financier de ces avantages accroît considérablement le coût de production dans la mesure où un facteur 20 est généralement constaté par rapport à la méthode de fabrication par extrusion.

L'extrusion, illustrée en figures 10 & 11, utilise quant à elle les granulés comme matière première. Ils sont fondus, mixés et homogénéisés avant d'être transportés dans un tonneau métallique chauffant contenant une visse rotative. La pression générée en pointe de cette dernière amène le matériau à passer à travers une buse, qui, selon sa forme, mènera à la distinction de deux types d'extrusion : à fente large ou annulaire. Bien que de même nature, la forme de l'outillage utilisé engendrera des conséquences significatives sur les propriétés finales du matériau.

L'extrusion par buse à fente large mènera à des feuilles possédant une très haute qualité optique et avec une excellente surface finie (Figure 10). Cependant, cette qualité est le résultat d'un procédé lent et gourmand en énergie.

¹ - Agassant, Jean-François; Hinault, Robert. *Plasturgie, fabrication de corps creux, de films et de fils. Techniques de l'Ingénieur*. [En ligne]. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/>.

Effectivement, afin d'éviter toute variation en épaisseur ou déformation optique, le débit d'écoulement et la température doivent être rigoureusement contrôlés afin d'être maintenus constants. Cette même contrainte engendre alors une largeur maximale des feuilles, fixée à actuellement 1m55.

Au contraire, l'extrusion par buse annulaire permettra de fabriquer des feuilles d'une largeur pouvant aller de trois à cinq mètres (Figure 11). Ceci est dû au mandrin placé au centre de la buse et qui, en soufflant de l'air lors du passage des feuilles, permet de détendre le tube de trois à quatre fois par rapport à sa taille originale. Les tubes obtenus peuvent ensuite être découpés et roulés. Si en plus de leur largeur intéressante, ces feuilles ont l'avantage de posséder des propriétés mécaniques identiques dans leurs deux directions, elles ne pourront être que difficilement utilisées pour une conception architecturale de par leurs mauvaises propriétés optiques.

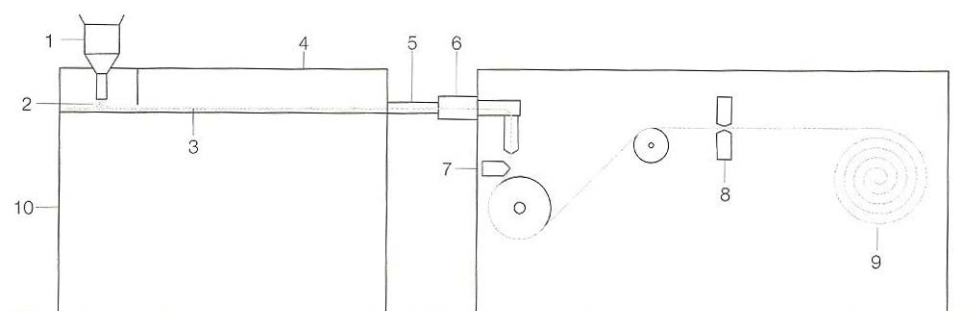


Figure 10 - Extrusion par buse à fente large

- | | |
|--------------------|----------------------------|
| 1. Entonnoir | 8. Contrôle de l'épaisseur |
| 2. Granulés | 9. Rouleau |
| 3. Produit fondu | 10. Extrudeur |
| 4. Filtre | 11. Air |
| 5. Lissage | 12. Buse |
| 6. Refroidissement | 13. Soufflerie |
| 7. Profilage | 14. Rouleaux pinceurs |
| | 15. Découpage |

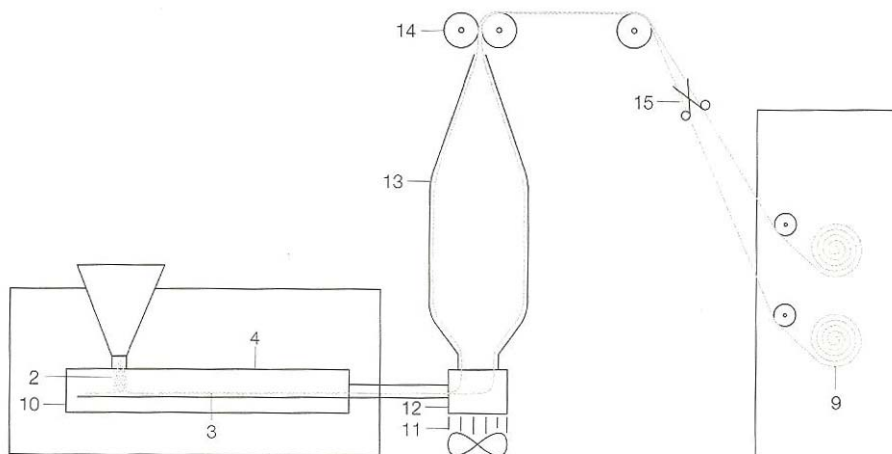


Figure 11- Extrusion par buse annulaire

Par conséquent, il a pu être constaté que la méthode de fabrication des feuilles d'ETFE est actuellement diversifiée mais que la qualité des feuilles désirée par le concepteur aiguillera la méthode de production.

En conclusion, pour la réalisation d'un projet de grande échelle, appelant une quantité importante de feuilles identiques, la méthode de calandrage est la plus adaptée tandis que pour des projets où les feuilles seront destinées à être teintes ou ne nécessitant pas une grande qualité optique, la méthode d'extrusion par buse annulaire permettra une production plus rapide des feuilles.

Par ailleurs, l'énergie consommée par le procédé de production a pu être évaluée. L'obtention d'un kilogramme de ce matériau nécessite une énergie totale de 210 MJ¹. Cette énergie peut se décomposer selon trois quantités correspondant aux trois phases de production :

- 173 MJ sont nécessaires afin de produire les matières premières, à savoir l'éthylène et le tétrafluoroéthylène,
- 28 MJ permettent la réaction de polymérisation ainsi que la granulation, et
- 9 MJ sont utilisés afin de réaliser les feuilles d'ETFE à partir des granulés.

En considérant une feuille de 250 microns, il faut alors une énergie de 89 MJ pour produire 1m² de produit. A titre de comparaison, l'énergie nécessaire pour produire 1 m² de panneau de verre d'épaisseur 6 mm s'élève à 300 MJ². Par conséquent, l'utilisation de l'ETFE permet une économie d'énergie de production de près de 70%.

b- Vie au sein du bâtiment

Depuis sa première utilisation dans les années 70, l'utilisation des feuilles d'ETFE dans le domaine de la construction se révèle grandissante vis-à-vis des autres matériaux tels que le verre ou les autres polymères. Cette tendance s'explique notamment par la grande stabilité du composant chimique et ce même dans des environnements hostiles, où le matériau est soumis à différents types d'intempéries ou d'agressions chimiques. Mais à cette grande stabilité, s'ajoutent de nombreuses autres propriétés avantageuses en Architecture.

La principale force des feuilles d'ETFE expliquant le vif intérêt des concepteurs à leurs égards réside dans son comportement vis-à-vis de la lumière.

1- Campioli, Andrea; Monticelli, Carol; Zanelli, Alessandra. *Environmental loads of ETFE cushions and future ways for their self sufficient performances*. Proceedings of the International Association for Shell & spatial Structures (IASS) Symposium 2009. 13p.

2- Karayan, Charles; Nafack, Michaël. *Emballage de la Rotonde*. Rapport de projet énergétique = Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011, 45p.

La figure ci-dessous prouve que ces feuilles assurent effectivement une transmission lumineuse supérieure à 90%, une valeur qui se place alors au-dessus de celle atteinte par le verre. Par ailleurs, à l'inverse de ce dernier, l'ETFE est capable de transmettre les rayons ultraviolets, une transmission qui assure alors aux feuilles une bonne tenue dans le temps, sans risque de jaunissement ou de fissures. Cette transparence présente par ailleurs un avantage certain pour la conception des serres : en plus d'apporter un maximum de lumière au sein de l'espace, les rayons ultraviolets transmis évitent la prolifération des bactéries.

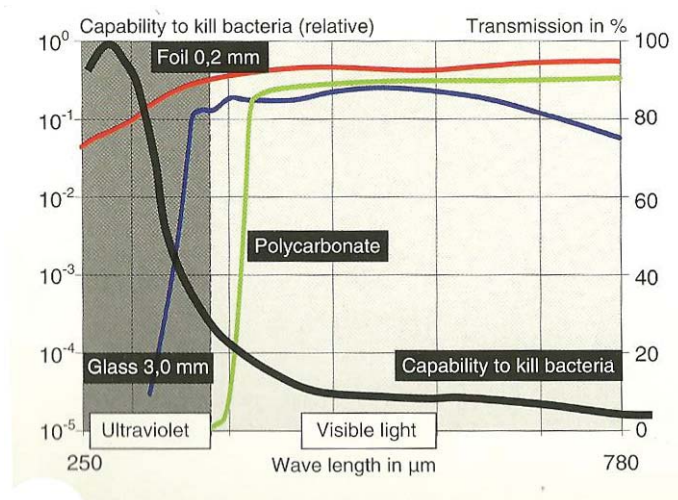


Figure 12: Transmission lumineuse de l'ETFE et comparaison avec le verre et le polycarbonate.

Outre ces transparences, l'ETFE possède également des propriétés mécaniques intéressantes pour le domaine de la construction et ce, à plus forte raison, que son comportement est isotrope¹.

Les principales caractéristiques mécaniques des feuilles d'ETFE concernent sa résistance à la traction, son allongement à la rupture, sa résistance à la propagation des forces de déchirement et son module élastique. Ces différentes valeurs révèlent alors un matériau doté d'une ductilité très importante mais dont les valeurs caractéristiques, qui seront données dans la suite, dépendent des conditions environnementales de température et de pression.

La résistance à la traction des feuilles d'ETFE qui, dans le cas d'une utilisation pour une enveloppe de bâtiment, ont une épaisseur variant de 50 à 250 micromètres, s'élève à 40N/mm². La courbe présentée en figure 13, présentant les déformations des feuilles en fonction de la contrainte appliquée, permet de faire apparaître deux zones traduisant le comportement de l'ETFE. Ainsi, il peut être observé que le comportement élastique du matériau, pour lequel il possède une résistance maximale, est relativement faible puisqu'il s'étend jusqu'à une déformation de 10%.

1 - Isotrope : Se dit d'un milieu dont les propriétés en un point ne dépendent pas de la direction.

Cette propriété qui peut à première vue s'apparenter à un défaut est compensée par un large domaine plastique : la rupture de l'ETFE n'a lieu qu'après une élongation supérieure à 300%.

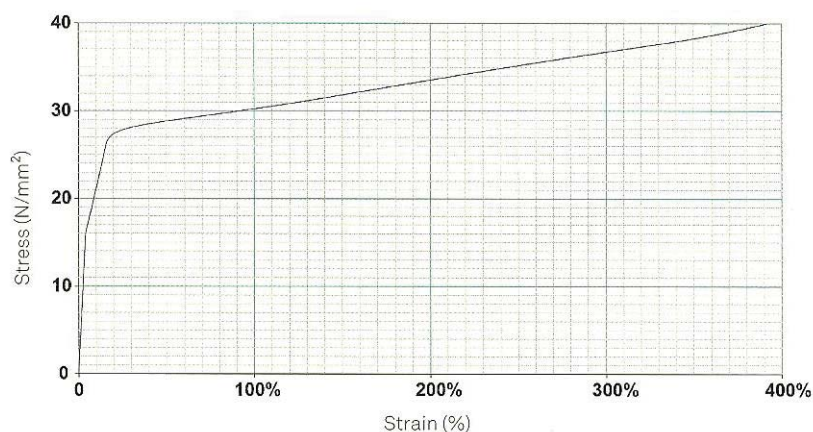


Figure 13: Elongation de l'ETFE en fonction de la contrainte appliquée.

Si l'ETFE peut être utilisé pour une plage de température variant entre -200°C et 150°C , son comportement mécanique varie néanmoins avec la température. Ainsi, l'ETFE commence à perdre sa résistance à partir de 70°C , un facteur dont il faut alors tenir compte lors de la conception et qui permet de conclure à une meilleure adaptation des structure de larges portées aux régions froides.

De plus, des tests ont montré que l'ETFE possède une très grande résistance à la propagation des forces de déchirement (figure 14), dans la mesure où, indépendamment de la valeur de celles-ci, les feuilles d'ETFE ne commencent à connaître une déformation significative qu'au-delà d'une période de 1000h. Cette propriété peut être d'une grande importance, notamment en ce qui concerne les coûts de maintenance.

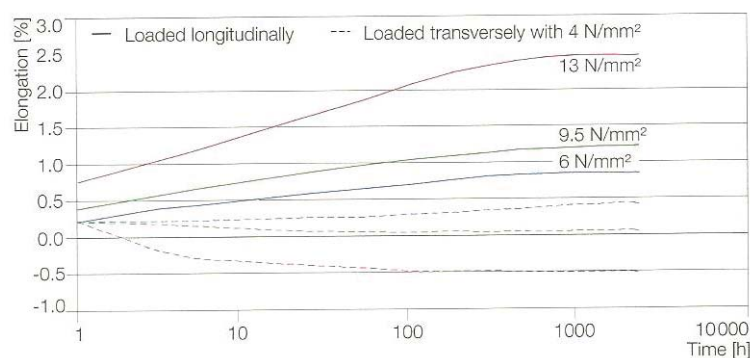


Figure 14: Propagation des forces de déchirement

Ces derniers sont à priori fortement diminués de par les propriétés de surface de l'ETFE. Effectivement, la méthode de fabrication par extrusion conduit à un matériau extrêmement lisse sur lequel ne peuvent adhérer ni moisissures ni saletés, une propriété ayant fait de l'ETFE l'un des seuls matériaux autonettoyants.

Cependant, ces couvertures font également l'objet de coûts de maintenance plus particuliers, à savoir les attaques d'oiseaux. Effectivement, quelques temps après la pose de la couverture de la Cité des Métiers au sein du Pôle régional des Savoirs de Rouen, celle-ci fut victime d'un groupe de goélands s'attaquant aux motifs imprimés des feuilles. Leurs propriétés mécaniques ont permis de localiser la dégradation et une simple soudure de pastille d'ETFE a alors assuré une remise en état. Par ailleurs, suite à ces attaques répétées, un dispositif émettant des ultrasons a été installé sur le toit qui, depuis lors, n'a plus été l'objet de nouvelles attaques.

Les enveloppes en ETFE permettent également une protection efficace face au feu. Selon la classification européenne EUROCLASSE relative à la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement, celui de l'ETFE est Bs1d0 ; c'est-à-dire qu'il est combustible mais dont la combustion engendre une faible opacité de fumées et aucun débris ou gouttelettes enflammés. Par ailleurs, comme il le fut déjà évoqué, l'ETFE observe un changement de son comportement mécanique avec la température, une modification qui dans le cas d'un incendie devient particulièrement avantageuse. Soumise à une température supérieure à 150°C, la feuille d'ETFE se ramollit et a alors tendance à se rétracter sur elle-même, ce qui provoque sa rupture. En plus d'éviter tout risque de chute de l'enveloppe, ce comportement assure une évacuation des fumées toxiques vers l'extérieur.

Grâce à ces différents éléments, il peut être constaté que l'ETFE possède des propriétés intéressantes en termes de transmission lumineuse ou de comportement structurel, des propriétés qui seront par la suite mises en confrontation avec différentes situations d'usage.

c- Durabilité

Si l'ETFE appartient à la famille des polymères, il est cependant à différencier des dérivés pétrochimiques. Le chlorodifluorométhane est utilisé comme matière première pour la production du monomère de TFE, un hydrochlorofluorocarbure admis par le Protocole de Montréal¹.

1- Protocole de Montréal : Entré en vigueur depuis le 1er janvier 1989, il permet de réduire la production et la consommation des substances nocives à la couche d'ozone en réduisant leur quantité dans l'atmosphère.

Ainsi, l'impact de l'ETFE sur l'environnement et plus particulièrement sur la couche d'ozone est considéré comme faible. Par ailleurs, le procédé de fabrication du polymère n'utilisant pas de solvant et sa nature même de thermoplastique, lui assurent de pouvoir être refondu sans difficulté. Par conséquent, les enveloppes en ETFE sont définies comme totalement recyclables.

Concernant sa longévité, l'ETFE n'étant apparu que depuis les années 1940, il peut être qualifié de matériau jeune et il est par conséquent encore difficile d'estimer avec précision sa durée de vie.

Cependant, dès son entrée sur la scène architecturale, le matériau, fit l'objet d'un grand intérêt et fut alors soumis à des tests climatiques variés notamment en Allemagne ou en Floride, dont le climat est connu pour être très humide et ensoleillé. Les résultats furent très positifs dans la mesure où, après une période de dix ans, aucune détérioration concernant les propriétés mécaniques des feuilles d'ETFE, leur couleur ou leur aspect ne fut constatée. Cette durabilité est d'autant plus intéressante qu'elle est intrinsèque et qu'elle n'est pas le résultat d'une protection supplémentaire.

Dans l'Avis Technique 02/09 – 1364 « Texlon Verrière gonflable en film ETFE » réalisé par le CSTB, la durabilité des structures gonflables en ETFE est décrite comme suit :

« Les essais réalisés après 5000 heures de weatherometer à un éclairage énergétique de 550W/m^2 et l'expérience en œuvre ont montré que le film en ETFE ne subissait ni le jaunissement, ni la baisse de transmission lumineuse et ni l'affaiblissement des propriétés mécaniques pendant au moins dix ans. »

Et le matériau est actuellement considéré comme ayant une longue durée de vie, supérieure à 25 ans. Si cette durée est inférieure à celle prévue pour le verre, ce matériau n'est néanmoins pas doté de la même ductilité que l'ETFE. De cette propriété intrinsèque, il en résulte une fragilité des structures en verre au niveau des joints, une contrainte estompée pour les coussins qui, par leur ductilité, accepte les mouvements de l'enveloppe au niveau des liaisons.

Les différentes caractéristiques préalablement décrites semblent alors définir l'ETFE comme un matériau ayant un faible impact écologique grâce à sa méthode de conception et sa possibilité de recyclage. La prochaine étape consiste donc à définir s'il en est de même lors de la phase de sa mise en œuvre.

1.3 Techniques de mise en œuvre

a- Utilisation des feuilles d'ETFE en couche simple

La technique de mise en œuvre en couche simple, utilisée seulement depuis les années 90 est la méthode la moins appliquée afin de réaliser des enveloppes en ETFE. Le CSTB¹ a effectivement évalué pour la première fois en 2012, dans le cadre d'une ATex², une membrane constituée d'une simple peau d'ETFE. Cette tendance s'explique par les propriétés mécaniques du matériau et plus particulièrement par sa grande capacité d'élongation. Ainsi, les enveloppes conçues grâce à une seule couche ne pourront reprendre que de faibles charges. Elles seront associées à une structure primaire, souvent réalisée en aluminium.

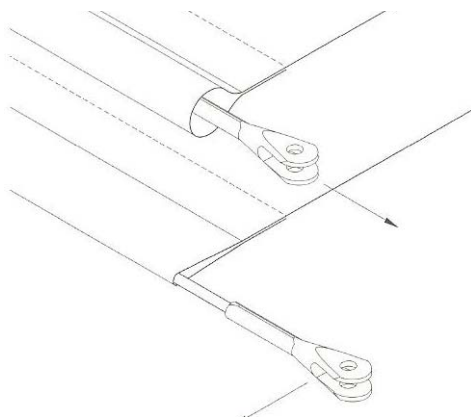


Figure 15: Détail de liaison entre matériaux textiles et structure primaire

Cette première technique emploie des méthodes de mise en œuvre similaires à celles utilisées en architecture textile. Ainsi, la fixation entre structure primaire et secondaire sera permise grâce à des câbles métalliques qui permettront, de manière ponctuelle, de régler la tension au sein des feuilles (Figure 15). Plusieurs méthodes existent afin de lier les deux éléments, la plus courante étant de créer une poche soudée où pourra venir se glisser le câble.

L'attrait principal de cette technique réside dans la possibilité qu'elle confère à créer des formes ayant une double courbure. Cette possibilité s'explique par la capacité de l'ETFE à pouvoir être étiré dans toutes les directions.

b- Utilisation des feuilles d'ETFE en structure pneumatique

La technique de mise en œuvre en structure pneumatique est, en réalité, la première à avoir été utilisée pour l'ETFE et met en relation deux éléments constructifs : un coussin et un système d'air permettant de maintenir la pression en son sein.

1 - CSTB : Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment est une organisation ayant des missions de recherche, d'expertise, d'évaluation et de diffusion de connaissance dans le secteur du bâtiment.

2 - ATex : Procédure rapide d'évaluation technique créée à l'initiative du CSTB et formulée par un groupe d'expert sur tout produit, procédé ou équipement ne faisant pas encore l'objet d'un Avis technique afin de faciliter l'innovation dans la construction.

- Le coussin d'ETFE -

En Europe Centrale, les forces de neige et de vent considérées dans le calcul des structures permettent généralement de concevoir des coussins ayant une portée de 4,50 mètres et d'une longueur théoriquement infinie, dans le cas de coussins classiques rectangulaires. A titre d'exemple, dans le Pôle régional des Savoirs à Rouen (Annexe 1) et dans le complexe de bureaux VIAG AG à Munich (Annexe 4), la longueur des bandes utilisée s'élève respectivement à 20 mètres et à 30 mètres. Par conséquent, cette technique de mise en œuvre assure la possibilité de recouvrir des espaces de grandes superficies.

Les coussins d'ETFE sont généralement composés de deux à cinq feuilles, selon le degré d'isolation thermique souhaité au sein de l'espace. Chaque feuille d'ETFE est le résultat d'un procédé de conception original. Effectivement, comme pour les matériaux textiles, ce procédé s'effectue à l'inverse de la méthode analytique de la résistance des matériaux classiques. Si pour ces derniers, l'étude porte sur une structure donnée, soumise à des charges et dont les contraintes au sein du matériau pourront être calculées, pour les structures textiles, les contraintes sont appliquées afin de trouver la forme désirée qui se place alors dans un état d'équilibre. C'est le procédé de *form-finding*. Ainsi, la principale difficulté de la conception impliquant des matériaux textiles consiste au passage entre des découpes du matériau à effectuer en deux dimensions pour atteindre la forme désirée en trois dimensions. Alors que cette étape fut longtemps l'objet de longues expérimentations, elle est actuellement assistée numériquement. Ainsi, ces outils permettent de définir les dimensions des différents lés de matériaux à découper et qui seront ensuite soudés entre eux afin d'aboutir à la forme finale.

La méthode de soudure des lés d'ETFE est une méthode simple dans la mesure où elle n'appelle aucun autre composant. Elle s'effectue par une élévation de la température à 280°C au niveau d'une bande de superposition de deux feuilles. Pour atteindre une sécurité optimale, la largeur de ce recouvrement varie actuellement entre 10 et 15 mm. La même méthode sera utilisée afin de souder entre elles les différentes feuilles formant le coussin au niveau de ses appuis. Si des profilés métalliques peuvent être utilisés pour réaliser cette liaison, la méthode de soudage a pour grand avantage de limiter les ponts thermiques.

Dans une grande majorité des cas, les coussins en ETFE seront préfabriqués en usine et leur ductilité permettra de les rouler pour la phase de transport. Une nouvelle fois, la production et la mise en œuvre de l'ETFE contribue à une diminution de l'énergie nécessaire au transport vis-à-vis des matériaux classiques.

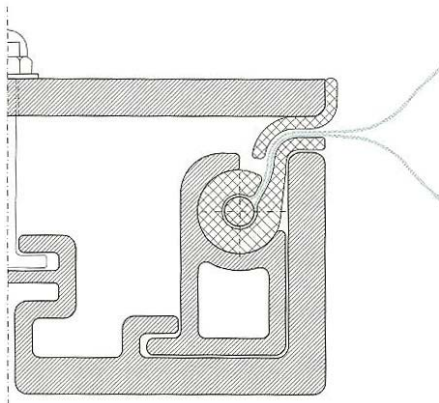


Figure 16: Détail de fixation d'un coussin

La dernière étape de fabrication du coussin consiste en sa fixation à la structure primaire (Figure 16). Cette fixation est généralement réalisée à l'aide d'un cadre formé de profilés d'aluminium extrudés et contenant un keder qui permettra alors la connection entre la membrane et le profilé. Il peut être fait de polypropylène, de filaments de PVC ou de polyuréthane. Enfin, pour éviter tout risque d'échauffement de l'ETFE par friction avec les profilés et qui provoquerait sa détérioration, elle est protégée par un ruban d'EPDM (éthylène-propylène-diène monomère), matériau couramment utilisé la confection d'étanchéité.

La liaison ainsi réalisée doit faire l'objet d'une attention particulière dans la mesure où elle doit assurer diverses fonctions techniques, mécaniques et constructives, à savoir : transférer les charges à la structure porteuse, reprendre les forces de tension s'appliquant au sein du coussin, reprendre l'expansion thermique, éviter les ponts thermiques et fonctionner comme une gouttière pour les chutes d'eau et la condensation.

- Maintien de la pression -

La stabilité des coussins en ETFE est permise grâce à une différence de pression entre les milieux intérieur et extérieur, qui, de plus, définit la forme de ces structures. Or, même parfaitement réalisées, ces structures subiront toujours de faibles pertes de quantités d'air que ce soit par ses bords ou en conséquence d'une perméabilité partielle des feuilles d'ETFE. Ainsi, il est nécessaire de mettre en place un système assurant une pression constante au sein des coussins.

Ce système sera toujours associé à un déshumidificateur d'air afin d'éliminer tout risque de condensation au sein de la cavité mais également l'entrée de toutes les impuretés présentes dans l'air.

En fonction de l'échelle du projet, une unité gonflera l'ensemble de la structure ou sera rattachée à un groupe de coussin. La distribution de l'air dans les différents coussins peut s'effectuer de diverses manières, en parallèle ou en série comme l'indique le schéma ci-après.

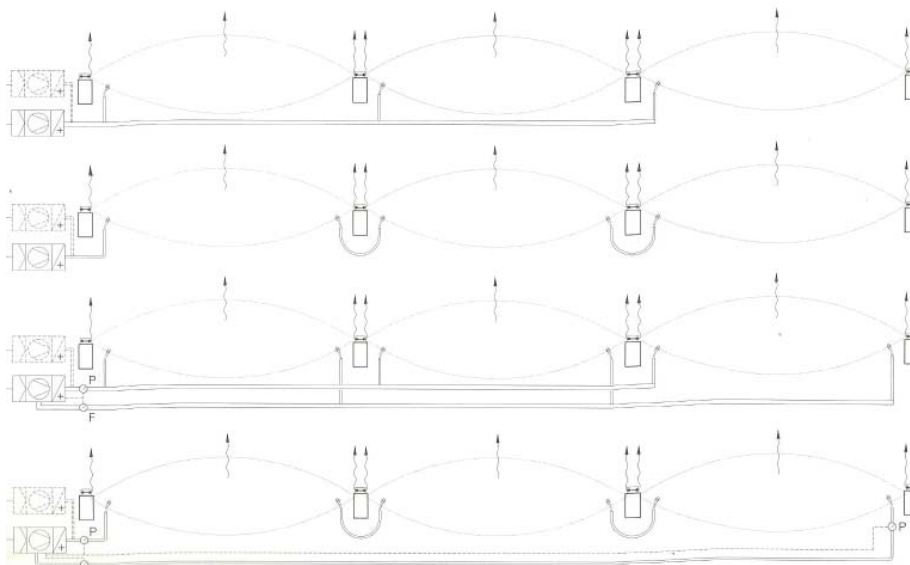


Figure 17: Différents branchements d'air: en parallèle ou en série.

Un branchement en parallèle aura pour avantages d'assurer d'une part un meilleur contrôle de la pression dans chaque coussin et d'autre part une facilité de maintenance dans le cas où un coussin est détérioré. De plus, à l'inverse d'un branchement en série, les coussins n'auront besoin que d'une seule valve d'entrée d'air. Par ailleurs, dans les branchements en série, la pression n'est souvent pas la même dans tous les coussins mais diminue graduellement à mesure que l'on s'éloigne du système mécanique.

Ces installations peuvent être agrémentées d'un système de récupérateur d'air dont l'intérêt majeur est de permettre une économie d'énergie pouvant s'élever à 60%.

c- Innovations constructives

L'ETFE étant un matériau jeune, il fait actuellement l'objet de nombreuses recherches notamment afin d'améliorer toujours plus ses performances énergétiques et architecturales. Les différents producteurs de feuilles proposent ainsi un large panel de produits dérivés destiné à augmenter le choix offert aux concepteurs.

A l'heure où l'utilisation des énergies renouvelables est grandissante et partant du constat que les structures en ETFE peuvent couvrir de grandes surfaces, il fut développé des cellules photovoltaïques (figure 18 a.) pouvant s'intégrer sur la feuille centrale des coussins, un dispositif qui a l'avantage de ne nécessiter aucun élément structurel supplémentaire.

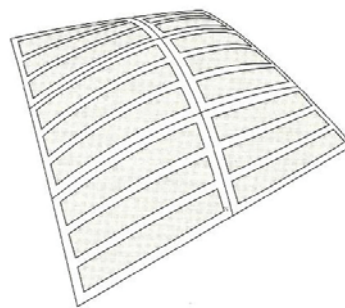


Figure 18 a.: Prototype GROW de cellules photovoltaïques

Figure 18 b.: Prise en compte des cellules photovoltaïques pour la conception du coussin

Cependant, la mise en œuvre de cellules photovoltaïques doit être pensée dès la conception des coussins d'une part, dans la mesure où elles s'intègrent à l'intérieur de ceux-ci et, d'autre part, car elles seront alors confrontées au même procédé de *form-finding* préalablement explicité. (Figure 18 b.)

Grâce à cette technologie, les enveloppes en ETFE pourraient permettre une production d'énergie servant directement au système de gonflage qu'elles nécessitent. Cependant, certaines problématiques sont encore perceptibles. Tout d'abord, les cellules photovoltaïques venant se placer au sein des coussins, elles viennent alors à l'encontre de l'une des grandes qualités de l'ETFE à savoir sa transparence. D'autre part, bien que ce matériau permette une transmission lumineuse à 95%, ce même emplacement des cellules signifie un moins bon rendement.

Afin de contrôler l'énergie lumineuse entrant dans l'espace interne, une innovation a également été mise en place, à savoir la possibilité d'intégrer une protection solaire. Effectivement, l'ETFE étant un matériau transparent et permettant une importante transmission lumineuse, il est soumis au phénomène de l'effet de serre. Ainsi, les radiations électromagnétiques qu'il absorbe sont converties en chaleur qui augmente dans un même temps la température du matériau. Par un phénomène de radiation, la température de l'espace recouvert augmentera pareillement.

Pour répondre à ce problème, les feuilles d'ETFE peuvent alors être teintées grâce à des pigments, généralement blancs, et différents degrés d'opacité peuvent alors être obtenus en fonction de la quantité de dioxyde de titane ajoutée lors de la production du polymère. Les feuilles peuvent également recevoir une impression selon des motifs variés, les plus communs étant des pastilles de couleur blanche ou argentée afin de réfléchir efficacement les rayons lumineux (Figure 19).

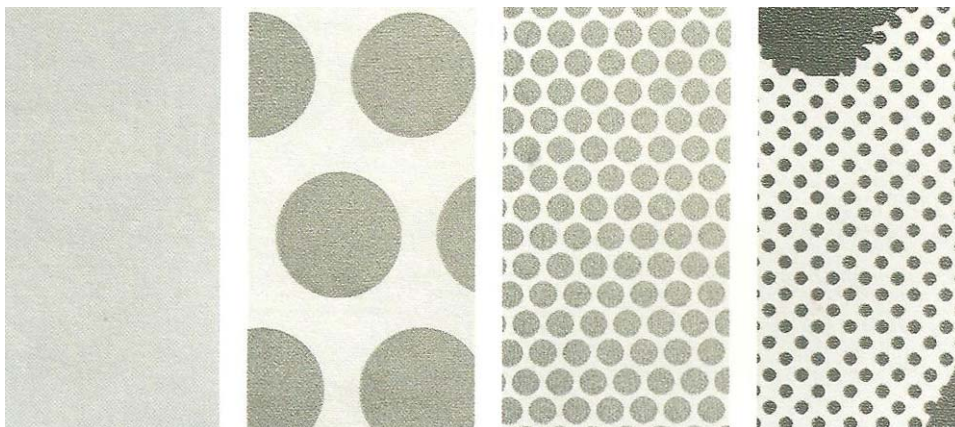


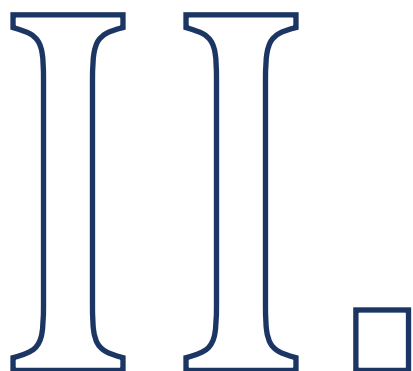
Figure 19: Feuille teintée ou imprimée selon différents motifs

Avant toute impression, il est nécessaire de réaliser un traitement sur la surface extrêmement lisse des feuilles d'ETFE afin de permettre l'adhésion entre l'encre et le matériau.

Cependant, ce procédé d'impression entraîne un frein à la possibilité de recycler les feuilles d'ETFE dans la mesure où aucune méthode de séparation entre les feuilles et l'encre n'a, à ce jour, encore été développée.

Bien que l'ETFE soit un matériau jeune et ayant tardivement fait son apparition sur la scène architecturale, les différents aspects qu'il présente et qui ont pu être précédemment étudiés, explique l'engouement des concepteurs dont il est actuellement l'objet. Avec un procédé de fabrication moins gourmand en énergie, ce matériau à longue durée de vie est de surcroît facilement recyclable. En outre, il assure non seulement une mise en œuvre et une maintenance simplifiées mais également des propriétés intrinsèques alliant transparence, légèreté et ductilité.

Mais ces trois propriétés, si représentatives du matériau, ne seraient-elles pas particulièrement pertinentes dans le cadre d'opérations de réhabilitation, un secteur de la construction a mené à être toujours plus exploité ?



L'ETFE, ET SA RELATION AVEC L'EXISTANT

Dans la logique actuelle d'économie d'énergie et comme l'affirme Muck Petzet dans son article intitulé « Reduce, Reuse, Recycle » présentant la biennale de Venise 2012, les opérations de réhabilitations sont susceptibles d'être toujours plus explorées.

« Nous devons commencer à reconnaître les bâtiments existants, y compris les immeubles et maisons peu appréciés du mouvement modernistes d'après guerre, comme une ressource énergétique, culturelle, sociale et architecturale considérable pour façonner notre futur et adopter une attitude fondamentalement positive envers l'architecture qui existe déjà. »¹

Il met ainsi en évidence l'importance de la reconsidération du bâti existant, notamment pour les quantités d'énergies qu'il présente, et la nécessité d'exploiter ces ressources dans la logique de la conception durable actuelle.

Mais les interventions sur des bâtiments existants induisent de nombreux enjeux. L'opération doit tout d'abord permettre une amélioration technique de l'ouvrage ainsi qu'une meilleure maîtrise des ambiances mais également une revalorisation du même bâti. Ce dernier point implique la compréhension du contexte architectural du bâtiment existant, de son histoire et des volontés que l'architecte a désiré transmettre et ce afin d'assurer une transition architecturale cohérente.

Partant de ces considérations, dans quelles mesures les structures membranaires en ETFE peuvent-elles parvenir à accomplir de tels enjeux ?

¹ "We need to start recognizing existing stock, including the little-appreciated buildings and housing estates of postwar modernism, as an important energy, cultural, social and architectural resource in shaping our future, and adopt a fundamentally positive attitude towards the architecture that already exists" (Traduction personnelle)

Petz, Muck. *Reduce, Reuse, Recycle*. [En ligne]. Disponible sur http://reduce-reuse-recycle.de/index_en.html.

2.1 Ductilité et géométrie

a- Adaptabilité à l'existant

La transparence de l'ETFE et la transmission lumineuse qu'il permet en font un candidat idéal pour les opérations de réhabilitation touchant les enveloppes des bâtiments, aussi bien en façade que comme élément de toiture. Mais l'inscription dans un bâtiment existant implique inévitablement des contraintes formelles auxquelles ce nouvel élément devra s'adapter.

La résistance mécanique de l'ETFE et sa grande ductilité, deux propriétés qui ont pu être mises en évidence dans la partie précédente, assurent une liberté géométrique qui semble alors pouvoir répondre à de tels enjeux.

Tout d'abord, les propriétés mécaniques des structures pneumatiques réalisées en ETFE assurent la possibilité de réaliser de grandes portées et, par conséquent la couverture de larges espaces.

Ainsi, l'utilisation de l'ETFE au sein du Pôle régional des Savoirs de Rouen, lors de sa réhabilitation en 2011 [Annexe 1], permet la couverture d'une cour intérieure de 21 sur 27 mètres de large grâce à 9 bandes de coussins ayant chacun une portée de 3 mètres. Cependant, cet espace était préalablement recouvert par une verrière et la rigidité du matériau d'origine explique alors la géométrie rectangulaire de l'espace. Dans cette opération, le langage formel de l'espace à recouvrir n'était donc pas une contrainte.

Ce n'est toutefois pas toujours le cas, comme l'illustre l'opération de réhabilitation de la Résidence de Dresde. [Annexe 2] Si la petite cour de ce château, servant actuellement d'atrium et de foyer central aux quatre musées le bordant, est également dotée d'une grande superficie (615 m²), sa forme n'est cependant pas aussi régulière que celle de l'exemple précédent. Au premier abord rectangulaire, il fut constaté après diagnostic que sa forme était en réalité trapézoïdale.

Considérant cette donnée, l'enjeu des concepteurs était alors de parvenir à créer une coupole pouvant recouvrir cette géométrie. La solution trouvée fut celle de réaliser une structure métallique portant 265 coussins d'ETFE de forme losangique mais qui étaient chacun unique de par leur forme et leurs dimensions comme cela peut être observé sur la figure 20. Le puzzle ainsi créé permit alors de s'adapter parfaitement à la morphologie de la petite cour de la Résidence de Dresde.

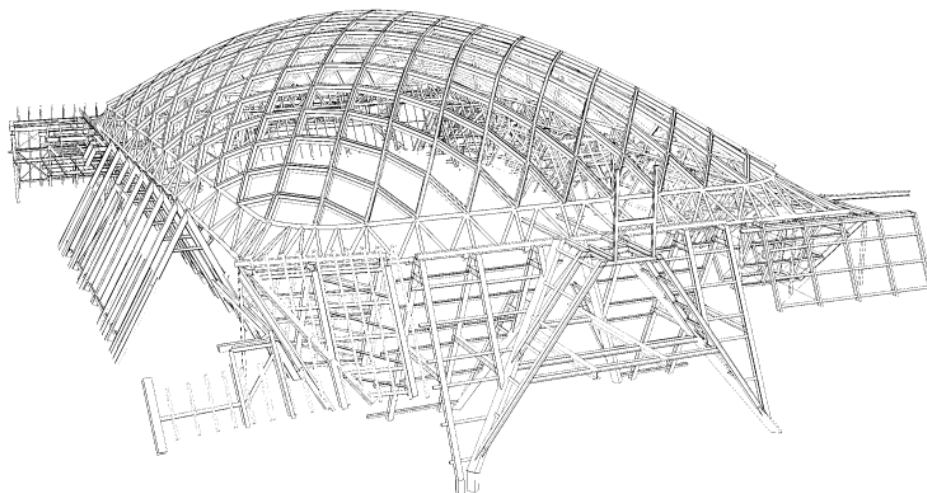


Figure 20: Trame losangique de la couverture de la cour de la Résidence de Dresde

Cependant, la couverture fut également le résultat d'une longue phase de conception appelant l'obligation d'utiliser des systèmes de représentation et de calculs en trois dimensions.

Par conséquent, bien que nécessitant une phase de conception plus complexe, l'ETFE paraît être un matériau efficient quant à l'adaptabilité aux géométries originelles des bâtiments existants. En plus de ce grand avantage dans des opérations de réhabilitation, sa ductilité lui permet une liberté formelle nécessaire à l'enjeu de revalorisation du bâti.

b- Liberté formelle du matériau

La souplesse du matériau assure à l'architecte d'allier le respect des caractéristiques du bâtiment existant et l'expression de ses volontés à travers le nouvel élément architectural.

Cette grande qualité du matériau peut être soulignée dans l'opération de couverture de la petite cour de la Résidence de Dresde, réalisée par les architectes Peter Kulka et Philipp Stamborski. A l'encontre du service de protection des monuments qui, par peur de dénaturation, désirait l'invisibilité de la couverture depuis l'extérieur, les architectes avaient pour souhait d'utiliser ce nouvel élément afin d'apporter une relecture de l'architecture du moment historique. Au vu de l'architecture des bâtiments forgeant l'identité de la ville de Dresde, comme la Frauenkirche ou l'Académie des Arts, ils voulaient apporter à la Résidence une réinterprétation de la coupole traditionnelle de la ville de Dresde.

De plus, comme le confie Philipp Stamborski dans l'article *Membrandach für das Schloss* (Un toit membranaire pour le château) de Friederike Meyer, paru dans la revue *Bauwelt* 22/2009 :

« Le motif du losange est pour nous très important. Il surgit fréquemment dans la Renaissance et ainsi également dans la Résidence de Dresde, par exemple dans la toiture voûtée de la Riesensaal. »

1

Le choix d'une couverture membranaire en ETFE permet alors la concrétisation de ces deux volontés. La forme losangique fut créée d'une part grâce à une structure primaire métallique offrant un cadre pour les coussins et d'autre part grâce à une découpe adaptée des lès d'ETFE pour parvenir à cette forme.

En outre, la structure ainsi conçue alliée à la transparence de l'ETFE a permis de marquer l'espace de cette forme par l'ombre portée de la couverture sur les murs. Comme cela peut être constaté sur les figures suivantes, la référence à l'architecture ancienne de la Riesensaal est alors soulignée.



Figure 21a: Ombres portées de la structure primaire
Figure 21 b: Perspective de la Riesensaal

Il est, par ailleurs, important de noter que cette géométrie n'aurait pu être combinée à celle d'une coupole dans le cas d'une structure en verre. Effectivement, à l'image de la toiture du British Museum, réalisée à Londres par Norman Foster en 2000, la rigidité de ce matériau appelle une trame triangulaire afin de créer des courbures.

1 - « Das Motiv der Rautenstruktur ist uns sehr wichtig. Es taucht in der Renaissance häufig auf, auch im Dresdner Schloss, zum Beispiel bei der Gewölbedecke im Riesensaal. » (Traduction personnelle)

Cependant, si l'ETFE peut adopter n'importe quelle forme, les cadres structuraux nécessaires à leur maintien constituent actuellement un important facteur limitant. Cette limite a pu notamment être observée par l'architecte Philippe Villien dans le cadre de son opération de réhabilitation de la Maison Duong 2, située à Lyon. [Annexe 3]

L'ancien entrepôt à réhabiliter en logement étant situé sur une parcelle longue et étroite, la mitoyenneté était accrue et limitait fortement les possibilités d'ouverture. Philippe Villien souhaitait alors éliminer toute sensation d'enfermement en valorisant les vues profondes et diagonales et en maximisant les vues en contre-plongées. Ces différentes volontés furent permises grâce à la conception d'une couverture en ETFE constituée de trois coussins dont la forme, les dimensions et l'orientation furent longuement étudiées comme le révèlent les suivantes photographies de maquettes.

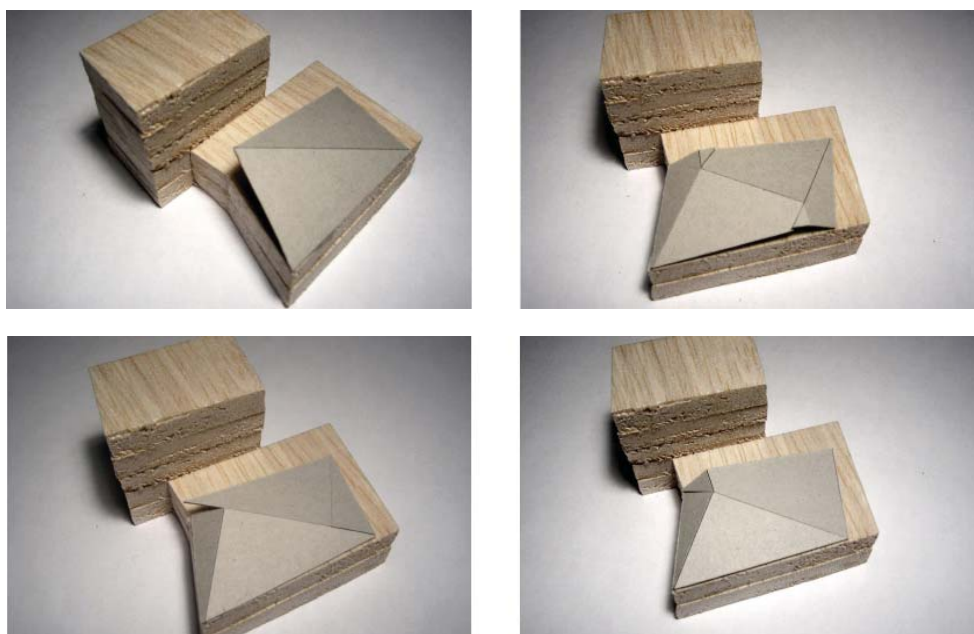


Figure 22: Maquettes d'étude du projet de la Maison Duong 2 - Philippe Villien

De nouveau, l'étape de conception fut complexifiée dans la mesure où elle a également nécessité le recours à la modélisation en trois dimensions afin de calculer ces structures.

Si l'ETFE pouvait s'adapter aux géométries requises, les cadres délimitant les trois partitions de la toiture connaissaient des angles de 60°, trop aigus pour une mise en œuvre parfaite et qui ont alors eu pour conséquence la formation de plis dans les coins. (Figure 23)



Figure 23: Angles et répercussions sur la membrane

Par conséquent, il est important, lors de la conception, de prendre en compte cette limite constructive et de concevoir des cadres structurels dont les angles sont compris entre 180° et 60° au risque de constater l'apparition de plis. Car s'ils n'ont en réalité aucune incidence sur la stabilité et l'efficacité mécanique de la structure, ils engendrent néanmoins une répercussion sur l'esthétique et la transparence de la membrane qui se trouvent, alors, quelque peu brisées.

Ainsi, si les propriétés de l'ETFE ont pu mettre en évidence non seulement une bonne adaptabilité de la nouvelle enveloppe au sein du bâti existant mais aussi une liberté formelle assurant la transmission des nouvelles volontés de l'architecte, quels sont les impacts structurels de ces nouvelles couvertures sur l'ouvrage en place ?

2.2 Impact structurel

a- Légèreté du matériau

Outre la ductilité de l'ETFE, ce matériau possède un second avantage significatif pour les opérations de réhabilitation, à savoir sa grande légèreté.

Si le verre, un matériau aux propriétés comparables à celles de l'ETFE en ce qui concerne son utilisation dans la conception d'enveloppes du bâtiment et en termes de transmission lumineuse, est doté d'une densité de 2,5, celle de l'ETFE ne s'élève qu'à une valeur de 1,7. Sachant, de plus, que les feuilles utilisées dans le domaine de la construction ont des épaisseurs variant entre 50 et 250 micromètres, la masse surfacique d'une feuille d'ETFE possédant l'épaisseur maximale atteint alors la valeur minimale de 0,425 kg/m².

Par ailleurs, il est également important de noter qu'à l'inverse des matériaux classiques où les structures ont tendance à être surdimensionnées dans une optique de sécurité, cette même méthode engendrerait, pour l'ETFE, un danger. Effectivement, une feuille trop épaisse devient alors cassante, une réaction qui peut alors provoquer la détérioration complète de la structure.

Le faible poids de l'ETFE permet ainsi une minimisation des charges à reprendre par la structure primaire. Ce constat aura alors deux principales conséquences constructives. D'une part, le dimensionnement de la structure porteuse à mettre en place se verra minimisé et d'autre part, il ne sera pas nécessaire de renforcer la structure primaire de l'existant et ce particulièrement au niveau de ses fondations. Cette propriété intrinsèque, en plus de permettre une facilité de réhabilitation, assure une conception architecturale en accord avec les besoins d'économies d'énergie actuelles que ce soit par une économie de matériaux ou par une économie de l'énergie de transport mise en jeu.

La légèreté accrue des structures ainsi conçues peut être illustrée par le cas du Pôle régional des Savoirs. Si l'ancienne verrière qui surplombait autrefois la cour avait une masse de 70 tonnes, la nouvelle couverture en ETFE connaît, quant à elle, une masse de seulement 7 tonnes, une différence qui permet alors une économie de matériaux de 90%.

A ce titre, plus qu'un avantage, la légèreté de l'ETFE deviendra, pour certaines réhabilitations, une nécessité.

Ce constat peut justement être éclairé par la couverture de la petite Cour de la Résidence de Dresde. Effectivement, Peter Kulka et Philippe Stamborski n'étaient, à l'origine, pas les gagnants du concours de cette opération. Le projet lauréat, conçu par l'agence allemande Schulitz + Partner, prévoyait une couverture en verre. Cependant, la structure existante, ayant été modifiée de manière répétée lors des diverses réhabilitations connues par le château, fut alors fortement affaiblie et perdit son homogénéité originelle. En parallèle aux enjeux formels précédemment établis, l'enjeu structurel était alors de parvenir à une couverture possédant un impact structurel minimal sur l'existant. L'utilisation de l'ETFE permit alors non seulement de concevoir une couverture ayant peu perturbé le bâtiment existant mais également dotée d'une structure porteuse fine.

Ce même avantage fut décisif dans le choix de l'ETFE concernant le projet de la Maison Duong 2 à Lyon. Effectivement, les murs de l'entrepôt originel étant formés de béton de mâchefer¹, la légèreté de la structure membranaire permit leur conservation. Or cette dernière était justement fondamentale dans ce projet dans la mesure où, situé sur une parcelle profonde et dont la mitoyenneté est importante, la destruction des murs aurait engendré de réelles difficultés pour reconstruire.

Ainsi, le faible impact structurel qu'assurent les structures en ETFE favorise non seulement une économie d'énergie mais surtout la possibilité de réhabiliter des bâtiments ayant subi des fragilisations au cours de leur histoire.

b- Conception de la structure primaire

S'il a pu être constaté qu'une couverture en ETFE aura un faible impact structurel sur le bâti existant, un lien entre deux structures d'époques différentes, variant par leurs matériaux et leur nature, sera toutefois à établir.

Dans la plus grande majorité des conceptions mettant en œuvre ce type d'enveloppe, la structure primaire est réalisée grâce à une structure métallique et à des cadres réalisés en profilés extrudés en aluminium. L'utilisation de ces matériaux peut s'expliquer par diverses raisons. Tout d'abord, l'échelle du projet qu'appellent ces enveloppes est destinée à être grande et à permettre alors le franchissement de larges portées. Or l'acier permet justement de franchir ces grandes dimensions avec des éléments de faibles sections, une donnée centrale pour les concepteurs qui cherchent bien souvent à associer une structure légère à l'aspect aérien de l'ETFE. Par ailleurs, la grande échelle ainsi conçue appelle une répétitivité structurelle, une donnée qui s'allie à la facilité d'usinage des éléments métalliques.

1 - Béton de mâchefer: Béton allégé ou léger à base de mâchefer, c'est-à-dire de résidus résultant de la combustion du charbon. Blin-Lacroix, Jean-Luc; Roy, Jean-Paul. Le dictionnaire professionnel du BTP. Paris: Eyrolles.2011.

Cependant, une structure porteuse en bois pourra également être réalisée pour les conceptions de plus petite échelle comme cela peut être observé sur la figure 24 illustrant la structure primaire de la Maison Duong 2 par Philippe Villien. Dans ce cas, chaque élément porteur est unique afin de s'adapter non seulement à la géométrie existante mais également à la géométrie des coussins désirée, destinée à augmenter la hauteur sous plafond. Dans ce cas, la liaison avec les murs en béton en mâchefer originels est réalisée grâce à un chaînage horizontal venant se poser sur ces derniers.



Figure 24: Structure primaire bois réalisée au sein de la Maison Duong 2
Philippe Villien

L'attitude consistant à composer avec l'ancien afin de concevoir un nouvel élément architectural est la plus courante. L'enjeu consiste à créer un lien structurel entre des méthodes de construction classiques et des nouvelles technologies afin d'assurer d'une transition architecturale réussie.

Dans le cas d'un système porteur poteaux-poutres, le nouvel élément de toiture sera de préférence réalisé avec des coussins en bande afin de pouvoir faire correspondre les trames structurelles (Figure 25, a & b). Ainsi, comme l'a réalisé Stéphane Plantrou au sein du Pôle régional des Savoirs, la largeur des bandes des coussins peut être adaptée à la trame structurelle existante afin d'assurer une continuité visuelle de la structure. Les poutres treillis de formes biconvexes permettant le maintien des coussins reposent sur les poteaux existants afin d'assurer une descente de charges optimale.

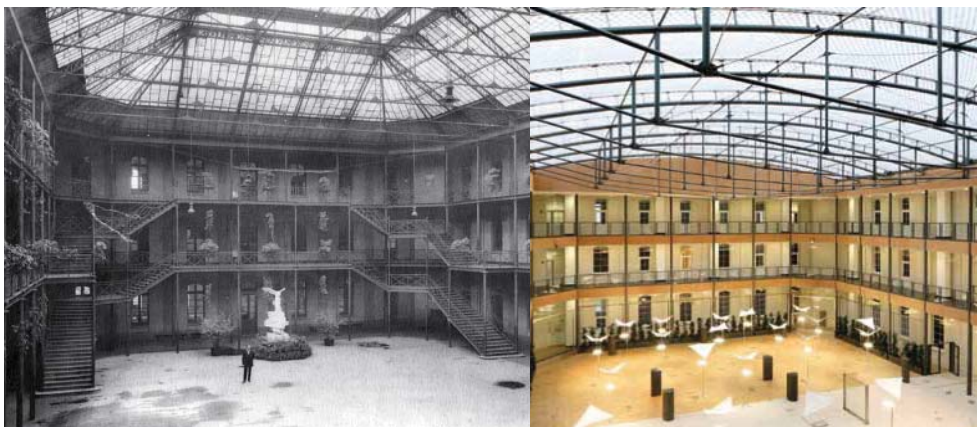


Figure 25 a. : Verrière originelle au sein de l'Ecole Normale des garçons

Figure 25 b. : Nouvelle enveloppe au sein du Pôle régional des Savoirs

L'utilisation de la structure primaire existante peut également être réalisée en façade. Tel est le cas dans le projet de réhabilitation de la Tour Zehrfuss, située à Saint-Denis et conçu par l'agence parisienne Loci Anima. [Annexe 5] L'enveloppe en coussins d'ETFE créée consiste en une double peau rétractable qui vient s'accrocher directement sur les poutres métalliques originelles émergentes en façade, une volonté de l'architecte Bernard Zehrfuss qui, lors de sa conception en 1970, désirait mettre en valeur l'utilisation du métal.

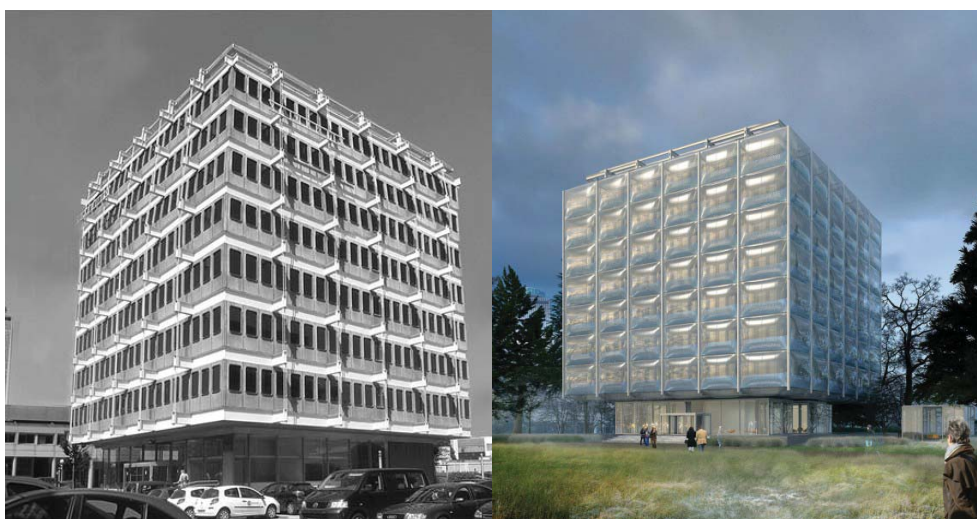


Figure 26 a. : Tour conçue par Bernard Zehrfuss en 1970

Figure 26 b. : Projet de réhabilitation de la Tour Zehrfuss en 2009

Cependant, l'une des caractéristiques principales des opérations de réhabilitation concerne la singularité des cas d'étude. Ainsi chaque bâtiment a été soumis à des contextes différents ayant eu un impact sur sa structure. Mais la ductilité de l'ETFE permettra de s'adapter à ces différentes situations constructives.

Ainsi, les différentes étapes constructives de la résidence de Dresde ont effectivement abouti à une cour dont les bâtiments qui la bordent possèdent des hauteurs de chéneaux différentes, une donnée qui a complexifié le lien entre la nouvelle coupole et la structure originelle. Afin de parvenir à celui-ci, une poutre treillis métallique a été conçue afin, d'une part, d'entourer la coupole et, d'autre part, de venir poser cette dernière sur le faitage des toits des bâtiments entourant la cour. (Figure 27)

L'impression ainsi formée est celle d'une couverture englobant le monument historique. (Figure 28)



Figure 27 (à gauche): Structure primaire portant l'enveloppe en ETFE

Figure 28 (à droite): Vue intérieure

Cependant, l'attitude de lier les constructions appartenant à des époques différentes n'est pas généralisée. Ce propos peut être illustré par la couverture réalisée par l'agence Hauschild+Boesel à Munich au sein du bâtiment VIAG AG. Ce projet consiste en une réhabilitation d'un complexe de bureaux appelant la création d'un nouveau bâtiment. Ce dernier fut installé au sein de la cour préalablement existante et l'un des espaces extérieurs ainsi créé fut recouvert d'une structure pneumatique en ETFE. Si la couverture s'appuie sur le nouveau bâtiment au nord, le côté longeant le bâti préexistant est, quant à lui, soutenu par des poteaux.

La nouvelle couverture se place alors en rupture par rapport à l'ouvrage existant comme cela peut être observé sur la coupe ci-dessous. Le lien entre les deux structures est alors réalisé par une verrière.

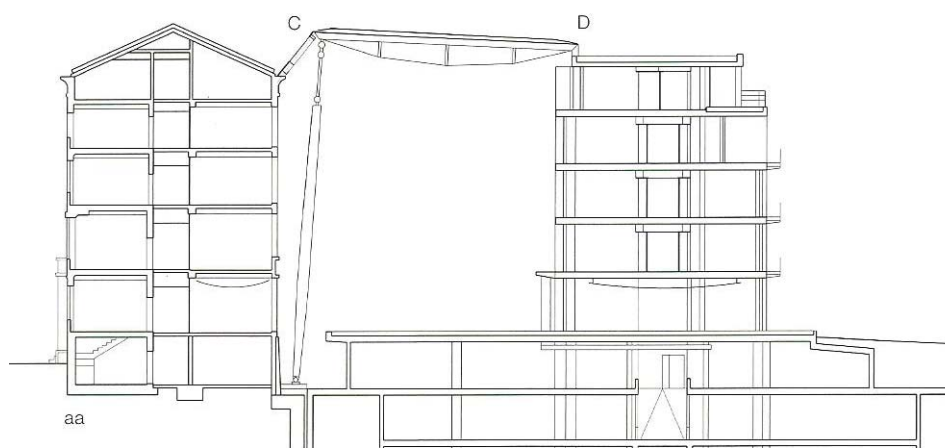


Figure 29: Coupe transversale du complexe de bureaux VIAG AG (1:500)

De la même façon qu'au sein du Pôle régional des Savoirs, la structure poteaux-poutres de la structure primaire a alors favorisé la création de coussins en bandes franchissant la portée de la cour. Les poutres permettant de reprendre le poids des coussins ont été réalisées de forme triangulaire afin de minimiser leur dimension perçue depuis le sol et ainsi d'apporter toujours plus de légèreté à l'ensemble.

Par conséquent, l'impact structurel des conceptions en ETFE semble être réduit ce qui permet alors d'assurer une bonne relation avec le bâti existant. La méthode employée afin de réaliser cette liaison ne sera pas systématique mais il est déjà perceptible que certaines méthodes constructives existantes appellent à une typologie d'enveloppe comme cela a pu être observé avec les projets de grande échelle et les projets employant une structure poteaux-poutres.

Outre la réalisation de continuité structurelle, l'enjeu des réhabilitations est également de parvenir à une transition architecturale réussie. Dans quelles mesures l'ETFE peut-il alors mener à la réussite de cette dernière ?

2.3 Impact architectural

a- En façade : un élément qui contraste

L'utilisation de l'ETFE comme matériau de construction engendre dans la plupart des cas, voire de manière systématique, une mise en œuvre en coussin. Or ces structures appartiennent au domaine de l'architecture pneumatique, une architecture qui loin d'être neutre, véhicule de nombreuses images.

L'apparence des coussins d'ETFE peut directement être liée à celle des bulles, un terme qui fut d'ailleurs utilisé par les usagers du Pôle régional des Savoirs lors des entretiens pour désigner la nouvelle enveloppe. Or celles-ci sont le symbole même de la légèreté, une notion appelant à la nature, au paradis et au rêve.

L'étroite relation entretenue entre structure pneumatique et nature fut mise en évidence par Frei Otto, un architecte et ingénieur allemand né en 1925. Au sein de l'Institut pour l'étude des structures légères, qu'il avait fondé en 1964 à Stuttgart, Frei Otto travailla grandement sur les structures pneumatiques et ce notamment par une méthode d'expérimentation accrue. Ainsi, les maquettes formées de pellicules de savon auxquelles il aboutit (figure 30) lui ont permis de conclure, d'une part, à l'efficacité des structures pneumatiques au sens où Buckminster Fuller l'entendait, à savoir faire le plus avec le moins et d'autre part, de les rapprocher directement aux éléments naturels.

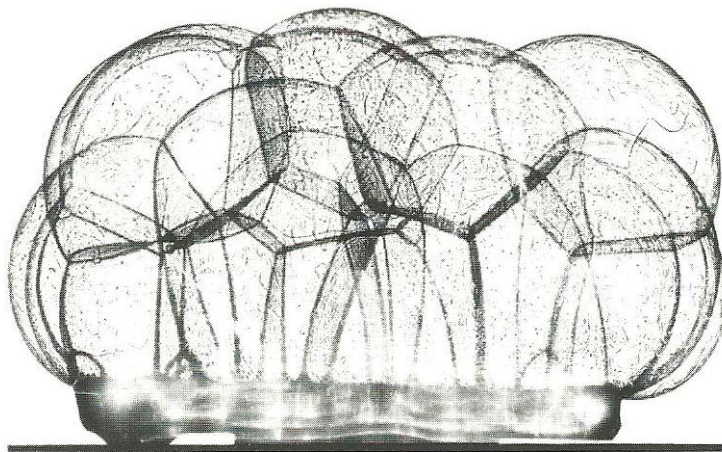


Figure 30: Maquette formée de pellicules de savon - Frei Otto.

Ainsi, dans son écrit, *Tensile Structures*, Frei Otto affirme :

“La structure du corps des animaux ou des êtres humains est un ensemble composite de membres rigides et résistants à la compression, qui sont entourés par de nombreux éléments en tension comme les tendons et les membranes. Puisque les tissus, dont les cellules sont soumis à la pression artérielle, exercent une charge sur l’enveloppe similaire à celle provoquée par un gaz ou un liquide, il n’est pas surprenant que tous les tissus enveloppés par des membranes constituent des formes pneumatiques.»¹



Figure 31: Cellule de vie pneumatique conçue par le groupe Haus Rucker Co.

Mais l’image que véhicule la bulle fut par ailleurs mise en contraste avec celle de l’architecture traditionnelle. Le groupe Haus-Rucker-Co² expérimenta, en 1967, l’utilisation de la bulle en Architecture dans le but de concevoir des cellules de vie qui pourraient être agrégées jusqu’à constituer des villes. Ils placèrent ces bulles sur des bâtiments traditionnels (figure ci-contre) dans une optique de critique de la notion de progrès.

Suivant la même volonté de contradiction avec l’architecture traditionnelle, un groupe d’étudiants français, Utopie, a développé l’idée de l’utilisation des structures pneumatiques pour la création d’une architecture légère et mobile, loin des idées de monumentalité et de permanence des monuments historiques.

1 - « The body structure of animals and human beings is a composite of rigid and compression-resistant members, surrounded by numerous tension elements such as sinew and membranes. Since the tissues, whose individual cells are under blood pressure, exert a load on the envelopping membranes similar to that introduced by a gas or liquid, it is not surprising that all tissue elements enclosed by membrane constitute pneumatically formable shapes. » (Traduction personnelle)

Otto, Frei. *Tensile Structures* (v.1&2). Cambridge: The MIT Press, 1973. 476p. et p.148.

2- Haus-Rucker-Co : Groupe fondé à Vienne en 1967 par de jeunes architectes et artistes Laurids Ortner, Günter Zamp Kelp et Klaus Pinter dont l’objectif était l’expérience du corps à travers des espaces sensibles mis en scène dans l’espace urbain.

Par conséquent, depuis l'étude et l'utilisation de ces structures sur la scène architecturale, il est indéniable qu'elles contrastent avec les techniques de construction classiques. De ce fait, il peut être déduit que, dans l'optique d'une transition architecturale douce au sein d'opérations de réhabilitation, une utilisation en façade s'avère quelque peu réduite.

Ce constat pourrait par ailleurs expliquer la non-réalisation du projet de la Tour Zehrfuss qui était toutefois lauréat du concours Bas Carbone organisé par EDF en 2009. La figure 26a. illustre le projet réalisé par l'architecte Bernhard Zehrfuss en 1970, une tour de bureaux constituée d'un noyau central en béton et de planchers suspendus, dont la façade met en valeur l'utilisation d'une structure métallique. Or le projet de Loci Anima proposait, notamment afin d'améliorer le diagnostic de performance énergétique du bâtiment, une façade mobile composée de coussins d'ETFE qui aurait eu pour conséquence de masquer les poutres métalliques en façade. Mais le projet qui fut finalement choisi par UBS Real Estate et réalisé en 2013 par l'agence Bléas & Leroy propose un maintien de cette architecture métallique emblématique de la tour. (Figure 32)



Figure 32: Projet de réhabilitation conçu par l'agence Bléas & Leroy

Mais ce constat perdure-t-il dans le cas d'opérations de réhabilitation touchant les toitures des bâtiments ?

b- En couverture : un élément qui s'oublie visuellement

Si l'aspect des coussins en façade est directement visible et contraste alors, de manière générale, avec l'architecture dans laquelle elle vient s'insérer, le même constat ne peut être effectué pour les éléments de toiture.

Effectivement, les couvertures en ETFE étant généralement destinées à couvrir de grands volumes, leur hauteur est alors trop importante pour être visibles depuis la rue. A titre d'exemple, la couverture du Pôle régional des Savoirs s'élève à 14 mètres, celle du projet VIAG AG à Munich à 18 mètres tandis que la coupole de la Résidence de Dresde culmine à 34 mètres. Ainsi, les structures pneumatiques se voient alors masquées et l'architecture du bâtiment existant ne s'en voit pas perturbée.



Figure 33a: Vue du Pôle Régional des Savoirs depuis la rue

Figure 33b: Vue du complexe de bureaux VIAG AG depuis la rue

Par ailleurs, la transparence du matériau permet un lien visuel entre l'environnement et l'espace couvert tandis que la grande transmission lumineuse de l'ETFE assure une intériorité baignée de lumière naturelle. Ces deux éléments ont pour conséquence une continuité entre l'espace intérieur et l'espace extérieur.

Ainsi, en contradiction avec une structure en façade qui s'impose et détonne, l'application de l'ETFE en couverture aura pour avantage non seulement une discrétion architecturale vis-à-vis du bâti existant mais également l'estompe-ment des limites spatiales. En outre, comme cela déjà été remarqué dans le projet de Peter Kulka et Philipp Stamborski à Dresde, cette même couverture peut être utilisée afin de mettre en valeur l'architecture existante.

Par ailleurs, à cette problématique du contraste auquel peut amener l'emploi de nouvelles technologies au sein de monuments historiques, dans une interview réalisée à l'occasion de la publication de l'ouvrage *Das Schloss zu Dresden: Von der Residenz zum Museum*, Peter Kulka répondit:

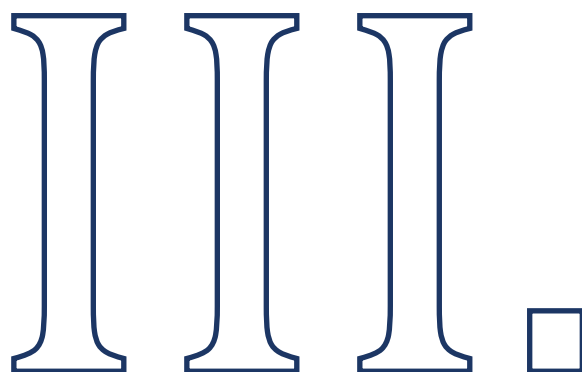
« Si nous vivons aujourd'hui et avons, comme chaque époque, notre propre architecture, nous devrions systématiquement saisir la chance de pouvoir faire naître de passionnantes combinaisons alliant l'ancien et le nouveau. »¹

Une possibilité que peuvent, selon lui et dans le respect des différents courants, accomplir les couvertures en ETFE.

Ainsi, l'ETFE, par sa ductilité, s'adapte aisément à différents contextes architecturaux, une réalité inhérente à toute opération de réhabilitation ; tandis que sa légèreté engendre de faibles impacts structurels sur l'existant. Ces différentes caractéristiques assurent, dans certaines limites, une composition respectueuse avec l'Histoire antérieure du bâti et, par conséquent, une transition architecturale réussie.

Mais si ce nouveau matériau connaît actuellement une utilisation grandissante en architecture, peut-il réellement s'adapter à toutes les utilisations ? Quelles sont alors les conditions constructives et d'usage à respecter pour atteindre la durabilité des opérations de réhabilitation ?

¹- «Doch wir leben heute und haben, wie jede Epoche, unsere zeitgenössische Architektur. Aber wir sollten häufiger die Chancen nutzen, aus der Kombination von Alt und Neu spannungsvolle Ensembles entstehen zu lassen», p.112 (Traduction personnelle)
Syndram, Dirk, *Das Schloss zu Dresden: Von der Residenz zum Museum*, Seemann, 2012, 144p. et p.112



L'ETFE, CONDITIONS CONSTRUCTIVES ET CONFRONTATION AUX USAGES

Les différents aspects précédemment évoqués ont actuellement pour résultat l'intérêt toujours plus accru des acteurs de la construction pour l'ETFE. Mais comme tout matériau, il doit être utilisé dans un contexte architectural précis et dans des buts précis. Si ces différents éléments ne sont pas connus, la conception d'une enveloppe employant un matériau non adapté peut appeler à une mauvaise maîtrise des ambiances aboutissant alors à un échec de l'opération de réhabilitation.

Ainsi, quel est donc ce contexte architectural en correspondance avec l'ETFE ?

3.1 Conception structurelle et condition d'échelle

a- Nature des charges à reprendre

La méthode de calcul conduisant au dimensionnement des coussins est similaire à celle utilisée par les autres types d'habillage d'enveloppe et comprend ainsi : le calcul des hypothèses des charges climatiques, le calcul de la résistance des coussins par rapport à ces hypothèses et la fourniture d'une descente de charges. Si les étapes sont identiques, les forces à prendre en compte et leur pondération dans les calculs structurels varient néanmoins.

Tout d'abord, dans le cas de coussins d'ETFE, le poids propre pourra souvent être négligé de par la légèreté du matériau. Comme cela a déjà pu être constaté, une feuille de 200µm n'a qu'un poids de 0,425kg/m². La légèreté des membranes assure ainsi la conception de structures porteuses fines et légères.

Par ailleurs, les conditions climatiques extérieures représentent une donnée particulièrement importante durant la phase de dimensionnement. Effectivement, une éventuelle panne du système de gonflage ou un hypothétique percement d'un coussin sont à prendre en compte. Dans cette configuration, une accumulation de neige ou de pluie pourrait se produire, engendrant un surcroît important de charges au niveau de la structure primaire. Cependant, face à ces forces, les coussins en ETFE ont le grand avantage de voir leur résistance mécanique varier en fonction de la pression qui est appliquée dans leur cavité. En effet, il existe une formule reliant le rayon de courbure du coussin, la pression interne et la contrainte :

$$P=0,5 \cdot P_i \cdot r \quad 1$$

Où P représente la contrainte en kN, P_i la pression interne en bar et r le rayon de courbure.

Cette relation permet alors de constater qu'un rayon de courbure plus grand demande une pression interne plus faible afin de générer la même contrainte. Mais, il faut savoir que, de manière générale, la courbure d'un coussin devra rester comprise entre 6 et 20% de la portée et la pression entre 200 et 600 Pa.

1- Cremers, Jan; Gabler, Markus; Knippers, Jan; Lienhard, Julian. *Construction Manual for Polymers + Membranes*. Berlin: Birkhäuser. 295p. Konstruktionsatlanten.

Enfin, il est important de noter qu'un coussin en ETFE, de par sa typologie, est un élément dont le fonctionnement diffère des matériaux classiques tels que le verre. Effectivement, les membranes constituant le coussin sont le siège d'importantes forces de traction. Si ces dernières s'équilibrent d'un coussin à l'autre, elles seront cependant très importantes aux rives de l'enveloppe. Par conséquent, aux forces verticales précédemment évoquées, des forces horizontales s'ajoutent. Ce fonctionnement mécanique peut être observé sur le schéma suivant, la force H représentant la résultante horizontale des forces de traction.

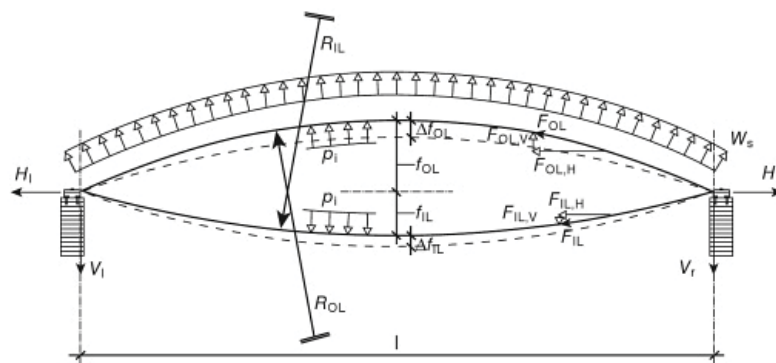


Figure 34: Comportement mécanique des structures pneumatiques en ETFE

Ainsi, l'importance des forces impliquées dans l'équilibre des systèmes pneumatiques diffère de celles des structures plus classiques.

Quelles sont les conséquences de ces différences sur la conception de la structure ?

b- Conséquences structurelles

Les enveloppes en ETFE appellent principalement la reprise de deux types de charges : les forces de traction présentes au sein du système pneumatique et les charges liées à une éventuelle accumulation d'eau. Ces deux types de force seront alors à reprendre avec des éléments constructifs adaptés.

La reprise des forces horizontales nécessitera un important renforcement en périphérie de la couverture. Ce constat a pu être réalisé par l'architecte Philippe Villien au sein de son projet de maison à Lyon [Annexe 3]. Effectivement, l'entrepôt d'origine était stabilisé par un système classique de murs porteurs et de dalle.

Cependant, il dû ôter la dalle qui permettait de stabiliser la construction, son projet consistant en la création d'une verrière gonflable en ETFE dans le but d'apporter un maximum de lumière naturelle. Par ailleurs, les coussins d'ETFE fonctionnant en traction, l'équilibre de l'ouvrage était rompu. Il fut par conséquent nécessaire de créer un chainage horizontal en partie supérieure de la construction. Cet élément en béton armé assure la solidarisation des murs porteurs sous la charge de la toiture.

En outre, Philippe Villien choisit de concevoir une structure porteuse en bois, un choix rare dans les conceptions mettant en œuvre des coussins en ETFE. Le dimensionnement des poutres fut alors délicat dans la mesure où les importantes forces de traction amenèrent finalement à un renversement de la structure vis-à-vis des éléments de construction plus classiques. Ainsi, c'est en position couchée que les poutres furent installées.

Afin de reprendre les charges liées à une hypothétique accumulation d'eau sur les membranes, un renforcement devra être mis en place aux deux appuis de chaque coussin. Comme l'a confié Moritz Hauschild, cette étape fut quelque peu problématique lors de la réhabilitation du bâtiment VIAG AG à Munich [Annexe 4] dans la mesure où ce fut l'une des premières fois qu'une telle hypothèse était à prendre en compte. Elle aboutit à la conception de poutres triangulaires entre chaque coussin, une forme permettant à la fois de porter une charge conséquente et de paraître légère depuis l'atrium. (Figures 35 & 36)



Figure 35: Vue des poutres triangulaires du complexe de bureaux VIAG AG

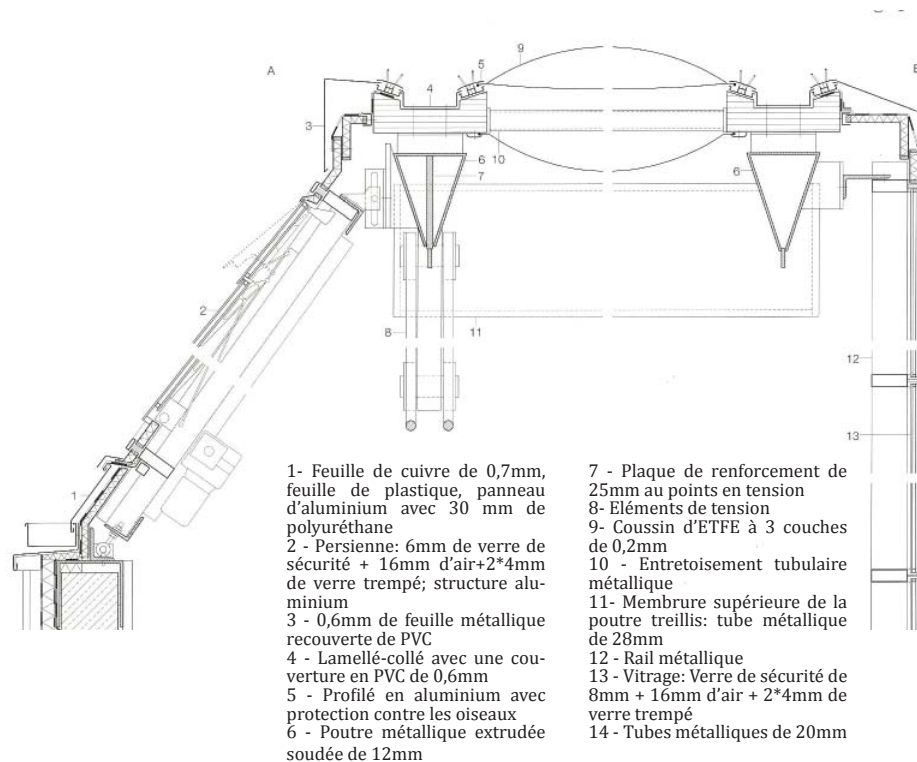


Figure 36: Détail des coussins conçus pour le complexe de bureaux VIAG AG. (1:50)

Ainsi, l'étape de conception de couverture en ETFE, par leurs différences vis-à-vis des structures plus classiques, peut être un frein quant à leur utilisation. Effectivement, les deux architectes précédemment cités avouèrent la difficulté de conception avec ce matériau et des risques qu'ils ont entrepris afin de mener à bien leur projet. Une difficulté les amenant tous deux à la conclusion que, s'ils avaient été conscients des problématiques engagées dans la conception, ils n'auraient probablement pas utilisé ce matériau.

c- Pertinence de la grande échelle

- Conditions constructives pour une minimisation des ressources -

Outre sa transparence, l'un des grands arguments favorisant l'utilisation de l'ETFE, concerne sa faible masse et, par conséquent, la minimisation des ressources liée non seulement au matériau en lui-même mais aussi à celle des éléments porteurs nécessaires. Si cette légèreté est effective et particulièrement intéressante dans les projets de réhabilitation, différentes conditions constructives amènent néanmoins à une réelle minimisation.

L'économie de matériau assurée peut être illustrée par le chiffre marquant du Pôle régional des Savoirs qui permet une économie de 63 tonnes de verre et d'acier. Mais la minimisation des ressources mise en jeu est toutefois limitée par les deux principaux facteurs que sont la taille des coussins d'une part et l'échelle du projet d'autre part.

Tout d'abord, le premier facteur limitant peut être illustré par la coupole de la Résidence de Dresde, recouvrant une surface similaire à celle du Pôle Régional des Savoirs. Si son poids total atteint 84 tonnes, il est important de noter que la typologie structurelle met en jeu de plus petits coussins. Or plus les dimensions de ces deniers seront réduites et plus ils nécessiteront d'éléments afin de former leur cadre structurel.

Par ailleurs, l'échelle du projet intervient dans cette problématique. Selon Philippe Villien, il n'est pas systématique que l'utilisation d'une structure en ETFE aboutisse à une économie de ressources. Dans la mesure où l'étape de conception prend en compte les conditions climatiques, une structure minimale est nécessaire afin de vérifier ces hypothèses. Cependant, l'ajout de portée et donc de coussins supplémentaires ne provoquera pas ou peu de renforcement structurel. Par conséquent, il existe une échelle à partir de laquelle la minimisation de matériau de construction est effective. Ce constat est, de plus, à mettre en relation avec le comportement mécanique des enveloppes en ETFE. Comme expliqué précédemment, un chainage horizontal fut ajouté pour palier aux forces de traction. Il est important de noter que ce chainage n'aurait pas été nécessaire dans le cas d'une verrière classique dans la mesure où le verre, un matériau fonctionnant en compression, aurait permis par lui seul une stabilisation de l'ensemble.

Ainsi, la seule légèreté du matériau ne peut être avancée comme argument pour conclure à une minimisation des ressources par l'emploi des enveloppes en ETFE. Celles-ci représentent en effet une économie significative pour la couverture de grands espaces et mettant en œuvre des coussins aux dimensions importantes.

- *Estimation économique* -

La rentabilité économique d'une structure en ETFE est actuellement encore difficile à estimer. S'il peut couramment être lu que l'ETFE est un matériau pouvant coûter de 24 à 70% moins cher que le verre, cette rentabilité est en lien avec la minimisation des ressources précédemment évoquée et est donc à nuancer.

Selon Yvon Lescouarc'h, professeur au sein de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Val de Seine et de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le film d'ETFE connaît un prix moyen de 20€/m². Ainsi, le coussin le plus couramment utilisé, à savoir le coussin à trois feuilles, a un prix de vente de 60€/m². En parallèle, un double vitrage classique d'épaisseur 4/6/4 possède un coût moyen de 75€/m². Ainsi, en considérant ces deux valeurs de référence, la différence financière des deux produits s'élève à 20%.

Cependant, l'avantage économique généralement mis en avant concerne la faible structure porteuse nécessitée par les enveloppes en ETFE de par leur légèreté. Ainsi, selon le paragraphe précédent, différents facteurs seront à prendre en compte pour pouvoir conclure à une réelle économie du matériau. Effectivement, dans le cas d'un projet de grande échelle et mettant en œuvre des coussins de grandes dimensions tel que le Pôle régional des Savoirs, il peut être conclu que le choix de ce matériau est rentable économiquement. Mais dans le cas d'un projet de plus petite échelle, cet avantage reste à nuancer. Effectivement, pour la réalisation des trois coussins constituant la toiture de la maison Duong et dont la surface s'élève à 30 m², le coût de l'enveloppe fut de 60 000€ soit un prix s'élevant à 2000€/m², un total amenant l'architecte Philippe Villien à douter d'une réelle économie vis-à-vis du verre.

De la même façon, la nouvelle coupole recouvrant la petite cour de la Résidence de Dresde a connu un prix relativement élevé dans la mesure où il atteignit 7,5 millions d'euros. Cette somme peut être mise en relation avec la forme globale choisie et les 1250m² de la coupole d'une part et avec les dimensions des coussins et la proportion des cadres structurels nécessaires, d'autre part amenant le coût final à s'élever à 6000€/m².

S'il est encore difficile d'évaluer précisément le coût d'une enveloppe en ETFE, il peut néanmoins être constaté que la rentabilité économique de ces enveloppes suivra les mêmes facteurs que ceux conditionnant une réelle minimisation des ressources, à savoir l'échelle du projet et les dimensions des coussins.

Si une opération de réhabilitation durable permet non seulement des économies d'énergie et une amélioration technique de l'ouvrage, elle doit également aboutir à une meilleure maîtrise des ambiances. Ainsi, quelles sont les répercussions des coussins en ETFE sur les ambiances internes et quelles sont alors les conditions constructives à respecter afin de s'assurer du confort des usagers?

3.2 Conception des coussins et conséquences sur les ambiances

La grande transparence de l'ETFE ainsi que sa finesse sont, comme il a déjà pu être constaté, deux propriétés particulièrement intéressantes en Architecture. Cependant, elles engendrent des relations singulières avec l'environnement extérieur, des relations qui auront des répercussions sur l'espace interne. Différents éléments constructifs sont alors à prendre en compte lors de la conception de l'enveloppe afin d'assurer une bonne maîtrise des ambiances lumineuse, thermique et acoustique.

a- Ambiance lumineuse

La transparence intrinsèque du matériau cède un rôle significatif à la structure primaire en ce qui concerne l'ambiance lumineuse de l'espace. Comme Peter Kulka et Philipp Stamborski, le motif structurel choisi peut être répétitif et ainsi créer des ombres portées participant activement à l'ambiance lumineuse de l'espace. Cependant, cet élément, souvent fin de par la légèreté du matériau, peut être voulu discret afin de ne pas briser l'importance de la transmission lumineuse permise par ce dernier. Ainsi, tel au sein du Pôle régional des Savoirs, les bandes de coussins de grandes dimensions associées à une structure porteuse fine assurent une discrétion de l'ensemble et un espace baigné de lumière naturelle.

Mais c'est également la possibilité d'imprimer les feuilles d'ETFE qui attire de plus en plus les concepteurs, une variante qui permettrait, d'une part un apport solaire contrôlé et d'autre part la conception d'une ambiance lumineuse singulière au sein de l'espace. Si les motifs d'impression peuvent se limiter à de simples pastilles blanches ou argentées afin de réfléchir la lumière, ils peuvent se révéler bien plus complexes. Tel a effectivement été le parti pris de Philippe Villien pour la maison Duong 2 à Lyon. L'architecte désirait reproduire la sensation de vivre dans un sous-bois, un sentiment qu'il a pu recréer grâce à une impression différenciée des feuilles d'ETFE. Pour ce faire, il créa tout d'abord deux motifs : l'un représentant le feuillage des arbres et l'autre figurant leurs branchages. La superposition des deux, résultant du positionnement du premier motif sur la feuille externe et du second sur la feuille interne a effectivement permis de recréer cette ambiance singulière. (Figure 37)



Figure 37: Ambiance lumineuse créée par une impression différenciée des feuilles d'ETFE

P. Villien

L'impression des différentes feuilles constituant le coussin peut ainsi être différenciée afin de former un motif global contribuant à l'ambiance interne générale de l'espace. Cependant, le motif peut également être variable et adaptable à la transmission lumineuse souhaitée.

Cette expérience fut tentée au sein du Pôle régional des Savoirs. En effet, les bandes de coussins mises en place pour couvrir la cour centrale sont composées de trois couches. Les membranes supérieures et centrales sont toutes deux imprimées par des pastilles opaques. Grâce à l'application d'une pression différente au sein des deux chambres à air constituant le coussin, la couche centrale peut se déplacer en altitude permettant alors une transmission lumineuse plus ou moins importante. (Figure 38)

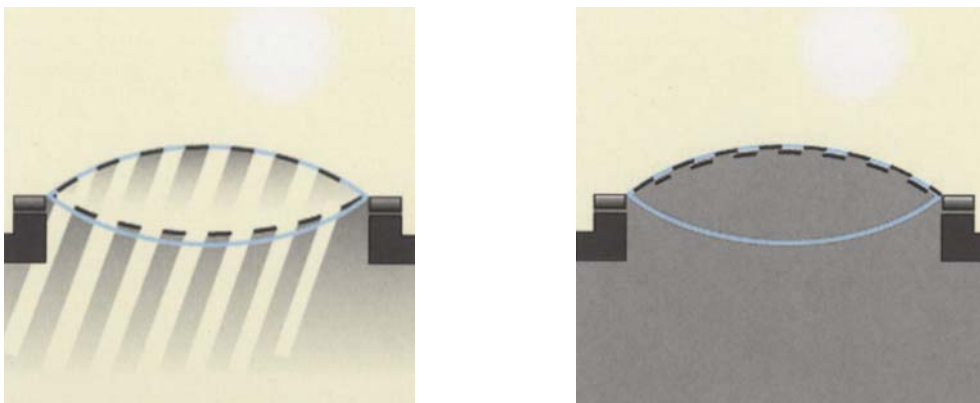


Figure 38: Transmission lumineuse contrôlée par mobilité de la couche centrale

Cette technique d'occultation aura un impact sur le système de gonflage à mettre en place. Effectivement, les pressions de chaque chambre à air devant être différentes, deux entrées d'air distinctes seront à prévoir.

Cependant, cette innovation technologique particulièrement intéressante semble encore limitée par la durée nécessaire à provoquer le déplacement des couches. Ainsi, un usager du Pôle confie :

« Je sais qu'il y a un système de pastilles censé régler la luminosité mais très honnêtement, je suis sceptique sur leur bon fonctionnement ! C'est l'administration qui déclenche le processus mais le changement de position ne se fait ressentir qu'au bout de 24 heures. »¹

Par conséquent, ce seul système ne peut permettre d'aboutir à une protection solaire optimale et ainsi à une ambiance thermique agréable. Comme il sera vu par la suite, des systèmes de ventilation supplémentaires sont nécessaires.

b- Ambiance thermique

L'ambiance thermique ressentie dans les espaces enveloppés d'ETFE est en étroite relation avec la transmission lumineuse précédemment évoquée et est, par conséquent, rythmée par les cycles quotidien et saisonnier. Différents comportements du matériau sont alors à distinguer.

En hiver, les systèmes pneumatiques constitués d'ETFE peuvent être qualifiés de performants. Si la finesse et donc la faible inertie des feuilles d'ETFE ne leur assurent aucune propriété isolante, le mode de mise en œuvre sous forme de coussins est, quant à lui, particulièrement intéressant thermiquement. À l'inverse des matériaux classiques où les échanges thermiques sont dominés par le phénomène de conduction², les coussins sont, quant à eux, le siège de deux phénomènes majeurs : la convection et le rayonnement³.

Le phénomène de convection, le plus significatif dans ce cas, correspond à un transfert énergétique dû au déplacement de molécules de températures différentes au sein d'un fluide. Le comportement thermique des coussins en ETFE est illustré sur la figure 39.

¹ - Employé travaillant quotidiennement au sein du Pôle Régional des Savoirs, interrogé le 18/10/2014.

² - **Conduction** : Transfert d'énergie se produisant dans un corps solide ou dans un fluide sans transfert de matière mais lié à un gradient de température.

³ - **Rayonnement** : Transfert de chaleur par rayonnement électromagnétique. Ce phénomène est lié à la propriété selon laquelle tout corps dont la température est supérieure à 0K émet de la chaleur qui va alors pouvoir être absorbée par d'autres corps.

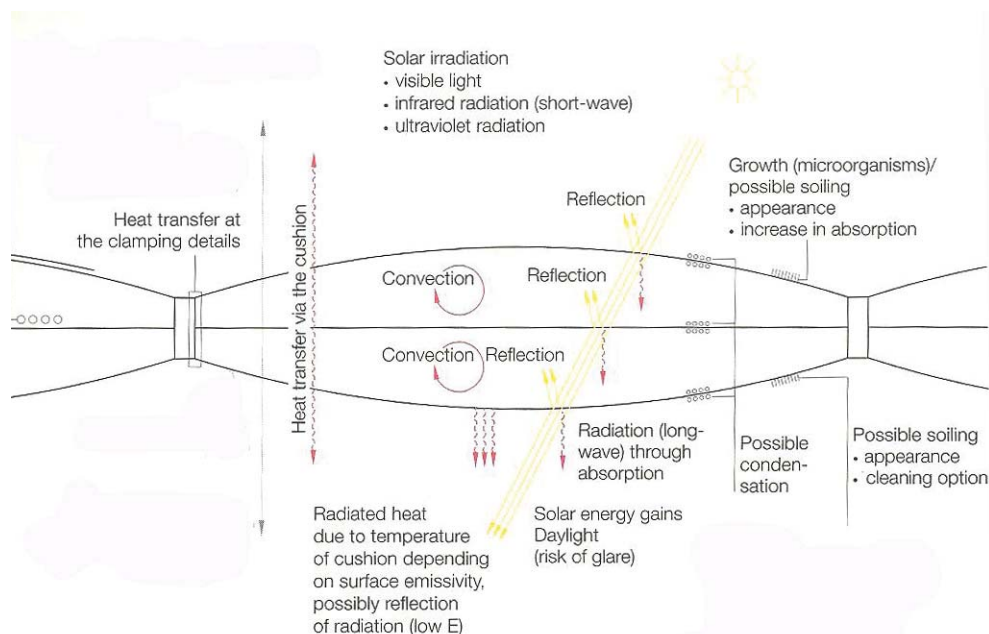


Figure 39: Comportement thermique d'un coussin en ETFE

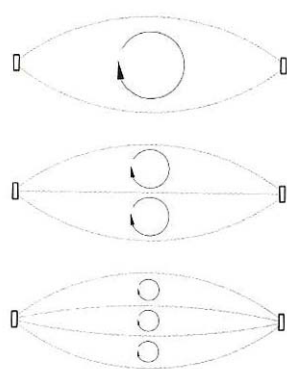


Figure 40: Importance de la convection en fonction du nombre de chambres à air

Dans le cas des coussins d'ETFE, le volume d'air emprisonné entre deux feuilles de matériau est suffisant pour créer ce phénomène, provoquant alors une remontée de l'air chaud au sein de la chambre à air, qui peut ainsi agir comme une résistance. Or le nombre de feuilles des coussins pouvant varier de deux à cinq, le système permet une performance d'isolation thermique adaptable aux besoins. Effectivement, chaque feuille d'ETFE supplémentaire assure la création d'une chambre à air et donc d'une résistance en plus.

Ainsi, le coefficient de transfert thermique¹ évolue de manière significative en fonction du nombre de feuilles et présente alors des valeurs plus performantes que le double vitrage comme le témoigne le tableau² ci-après.

1 - Le coefficient de transfert thermique (U) est un coefficient permettant de quantifier un flux d'énergie traversant un milieu par unité de surface, de volume ou de longueur.

2 - Hogg, Charlie; Kragh, Mikkel; Poirazis, Harris; *Energy modelling of ETFE Membranes in building applications*, juillet 2009, 8p.

Matériau	Valeur de U (W/m ² K)
Plaque de verre de 6mm	5,9
Double vitrage 6-12-6	2,8
Coussin à 2 feuilles	2,9
Coussin à 3 feuilles	1,9
Coussin à 4 feuilles	1,4
Coussin à 5 feuilles	1,2

Figure 41: Valeurs du coefficient de transfert thermique en fonction du nombre de feuilles

De plus, si une meilleure isolation thermique du système est désirée, il est possible, lors de la production des feuilles, d'ajouter des aérogels.

Les aérogels sont des composés solides, le plus souvent sous forme de granulés de silice de 0,5 à 4 mm de diamètre, de très faible densité et qui permettent de bloquer complètement les trois méthodes de propagation de la chaleur. Mais leur intérêt fondamental, concernant les enveloppes en ETFE, réside dans leur transparence. Ils permettent effectivement une transmission lumineuse de 80% par cm d'aérogel appliqué. Comme l'illustre la figure 42¹, une couche de 3 cm de matériau assurera un coefficient de transfert thermique de 0,57 W/m²K. De plus, les aérogels ont pour grands avantages d'être incombustibles, recyclables, résistants à la chaleur jusqu'à une température de 600°C, résistants aux rayons ultraviolets, hydrophobes et ont une longue durée de vie. Ces composés pourront être appliqués au niveau de la couche supérieure ou inférieure du coussin. Cependant, la couche choisie devra alors être doublée afin de pouvoir appliquer l'aérogel entre les deux.

Couche d'aérogel (cm)	U (W/m ² K)	Transmission lumineuse (%)
1,3	1,4	73
2,5	0,7	53
3,1	0,57	45
3,8	0,47	39
5	0,35	28
6,4	0,28	21

Figure 42: Valeurs du coefficient de transfert thermique et de la transmission lumineuse en fonction de la couche d'aérogel

Mais les valeurs précédentes indiquent que la recherche d'une meilleure isolation thermique aura un impact important sur les propriétés de transparence du matériau. Ce même constat, illustré par le tableau suivant², peut être établi pour l'augmentation du nombre de feuilles constituant le coussin.

¹ - Cremers, Jan ; Lausch, Félix. "Translucent High-Performance Silica-Aerogel Insulation for Membrane Structures". *Plastics. DETAIL*. 2008, n°5, p. 524-530.

² - Cremers, Jan; Gabler, Markus; Knippers, Jan; Lienhard, Julian. *Construction Manual for Polymers + Membranes*. Berlin: Birkhäuser. 295p. Konstruktionsatlasanten.

ETFE	Transmission lumineuse (%)
Feuille de 200µm	92%
2 feuilles de 200µm	84%
3 feuilles de 200µm	77%

Figure 43: Valeurs de la transmission lumineuse en fonction du nombre de feuilles constituant le coussin

Par conséquent, il est à noter que la conception des coussins doit être le résultat de la recherche d'un équilibre entre le degré de transmission lumineuse et le degré d'isolation thermique souhaités au sein de l'espace.

Si en hiver les coussins d'ETFE semblent alors performants afin d'isoler l'espace, son comportement est beaucoup moins favorable à une ambiance thermique maîtrisée en été. Comme cela a déjà été évoqué, le matériau est soumis au phénomène de l'effet de serre qui engendrera alors d'importantes surchauffes au sein de ces espaces, comme le témoigne un usager du Pôle régional des Savoirs :

« En été, les températures sous la bulle sont vraiment élevées ! J'ai installé un petit thermomètre sur mon bureau et j'ai déjà pu constater que les températures peuvent atteindre 40°C ! C'est difficilement soutenable. »¹

Par conséquent, un système de ventilation spécifique devra être mis en place afin de palier à ce phénomène.

Le système de ventilation à mettre en œuvre variera en fonction de la typologie des coussins : à savoir de petites dimensions ou en bande.

En effet, dans le cas où la structure fait intervenir de petites unités, il est possible d'en rendre certaines ouvrantes. De manière préférentielle et dans le cas des couvertures, les ouvrants seront disposés aux points les plus hauts de celles-ci afin d'assurer une évacuation optimale de l'air chaud. Ce type de ventilation fut employé par les architectes Peter Kulka et Philipp Stamborski au sein de la Cour de la Résidence de Dresde. Grâce à des capteurs, la température interne est évaluée et lorsque cette dernière atteint une valeur considérée maximale, les quatre coussins situés au sommet de la coupole s'ouvrent automatiquement. Ce type de ventilation assure un rafraîchissement de l'espace en quelques minutes.² En plus d'être efficace, il a l'avantage d'être très peu visible que ce soit depuis l'intérieur de la Cour ou de l'extérieur. (Figure 44)

¹ - Employé travaillant quotidiennement au sein du Pôle Régional des Savoirs, interrogé le 18/10/2014.

² - Constat que j'ai pu effectuer moi-même lors de ma visite du bâtiment le 15 août 2014.



Figure 44a. : Vue des ouvrants depuis le toit de la Frauenkirche

Figure 44 b.: Vue des ouvrants depuis l'intérieur de la cour

Dans le cas des coussins en bande ou lorsqu'ils atteignent des dimensions trop importantes pour pouvoir être conçus ouvrants, une alternative consiste à créer des ouvertures en façade, comme dans le cas de la maison Duong 2. Effectivement, Philippe Villien conçoit des ouvrants en verre directement en dessous de la toiture afin d'évacuer l'air chaud accumulé sous la structure pneumatique, comme cela peut être observé sur la photographie ci-dessous. La même remarque peut par ailleurs être effectuée pour le complexe de bureaux VIAG AG (figure 36).



Figure 45: Ventilation naturelle de la Maison Duong 2 - Philippe Villien

L'ambivalence des propriétés thermiques des enveloppes en ETFE fut interprétée par les architectes de l'agence Loci Anima ayant travaillé sur le projet de réhabilitation de la Tour Zehrfuss pour aboutir à la conception d'un système de ventilation original. Si le projet ne fut pas réalisé, il proposait la conception d'un « manteau pour l'hiver ». Ainsi, durant la saison froide, la tour devait se voir enveloppée, par une translation le long de câbles, d'une structure formée de coussins d'ETFE. En été, il était prévu que ce manteau soit ôté et que la ventilation s'effectue de manière naturelle grâce aux ponts thermiques en façade et permettant d'évacuer la chaleur vers l'extérieur.

Ainsi, si au vu des propriétés de l'ETFE, une ventilation efficace devra être mise en place afin de générer une ambiance thermique agréable, le choix du système devra se baser sur la typologie de la structure créée.

c- Ambiance acoustique

L'ETFE est défini comme un matériau acoustiquement transparent. A l'origine de cette transparence, tout comme pour le comportement thermique du matériau, se trouve la densité de l'ETFE et son utilisation en fine membrane. Effectivement, l'épaisseur mise en jeu dans la conception des coussins est insuffisante pour aboutir à une atténuation significative des ondes sonores.

Ce comportement a deux principales conséquences en ce qui concerne l'ambiance interne des espaces. D'une part, les bruits extérieurs, particulièrement ceux liés aux intempéries, seront directement transmis vers l'intérieur. En outre, en remarquant que les coussins d'ETFE sont le plus souvent utilisés pour couvrir de grands espaces, il peut alors être constaté que les conséquences de la transparence acoustique du matériau se voient amplifiées par le volume enveloppé. D'autre part, ce même comportement assure une non réverbération des bruits générés dans l'espace interne et, par conséquent, permet une atténuation des bruits de fond.

L'ambivalence du comportement acoustique de l'ETFE permet déjà de convenir d'usages. Il est effectivement difficile de combiner enveloppe en ETFE et espace de travail, comme le prouve l'opération de réhabilitation des bureaux VIAG AG à Munich. Les nombreuses plaintes des usagers concernant la résonance acoustique en temps de pluie, ont finalement eu raison de cette technologie et la membrane fut alors remplacée par une verrière. Mais la transparence acoustique du matériau peut être traitée de manière avantageuse pour tous les lieux de passage où les bruits de fonds sont favorisés et importants.

On peut cependant se demander si ce comportement acoustique diffère réellement des couvertures ayant les mêmes propriétés de transparence.

La réponse à cette interrogation est fournie par l'étude « *Rain Noise from glazed and lightweight roofing* »¹. Grâce à la recreation d'une pluie artificielle, qualifiée de forte², il fut établi que l'amortissement acoustique d'un double vitrage 6/12/6,4³ ou d'un panneau de polycarbonate de 25mm est effectivement meilleur que celui d'un coussin formé de trois couches d'épaisseurs 150/50/150 (µm). [Figure 46]

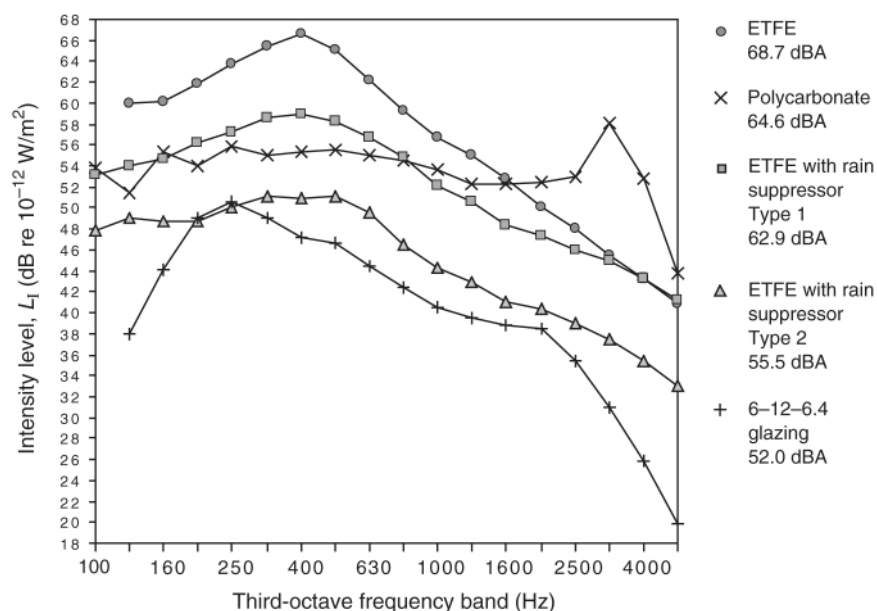


Figure 46: Comparaison de l'amortissement acoustique de l'impact d'une pluie forte permis par un coussin d'ETFE, par du verre et par du polycarbonate.

Sur le précédent graphique, il peut être noté que l'ETFE est le matériau le moins performant en termes d'isolation acoustique et que pour une fréquence de 400Hz, la différence de l'intensité engendrée vis-à-vis d'une couverture en verre s'élève à 20dB.

Si les qualités acoustiques de l'ETFE resteront moindres vis-à-vis du double vitrage, il est néanmoins actuellement possible de les améliorer grâce à des options constructives à prendre en compte dès la phase de conception des coussins.

1 - Hopkins, C. ; Information paper : Rain noise from glazed and lightweight roofing, 2006, 4p.

2 - Selon la même étude, une pluie considérée comme forte a pour caractéristiques:

- Taux de précipitation: 40mm/h
- Volume moyen des gouttes: 5mm
- Vitesse de chute: 7m/s

3 - Double vitrage constitué d'un panneau de 6mm de verre trempé, d'une lame d'air de 12mm et d'un panneau de verre laminé de 6,4mm.

Ainsi, selon une étude réalisée par Buitink Technology, il a pu être mis en évidence que l'épaisseur des feuilles utilisées pour la conception du coussin a une influence sur leur capacité à atténuer les ondes sonores. [Figure 47] Ainsi, plus la feuille sera épaisse et meilleur sera l'amortissement.

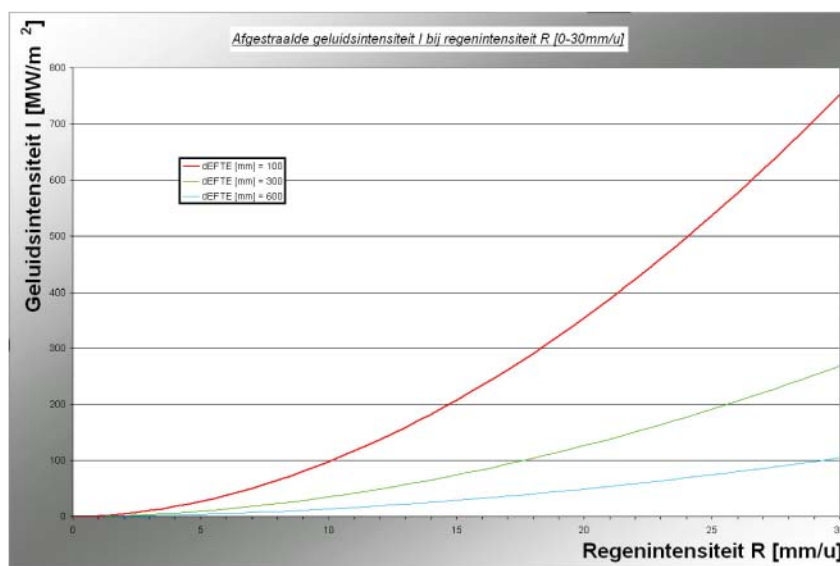


Figure 47: Transmission sonore en fonction de l'intensité de la pluie et de l'épaisseur de la feuille d'ETFE.

Cependant, il est important de noter que l'épaisseur des feuilles reste limitée par les propriétés mécaniques du matériau dans la mesure où une épaisseur trop importante d'ETFE engendre une feuille cassante.

Par ailleurs, une innovation constructive, développée par l'entreprise Vector Foiltec, permet d'atténuer considérablement le bruit de l'impact des gouttes de pluie sur la surface des coussins : le Texlon® rain suppressors®. [Figure 48]

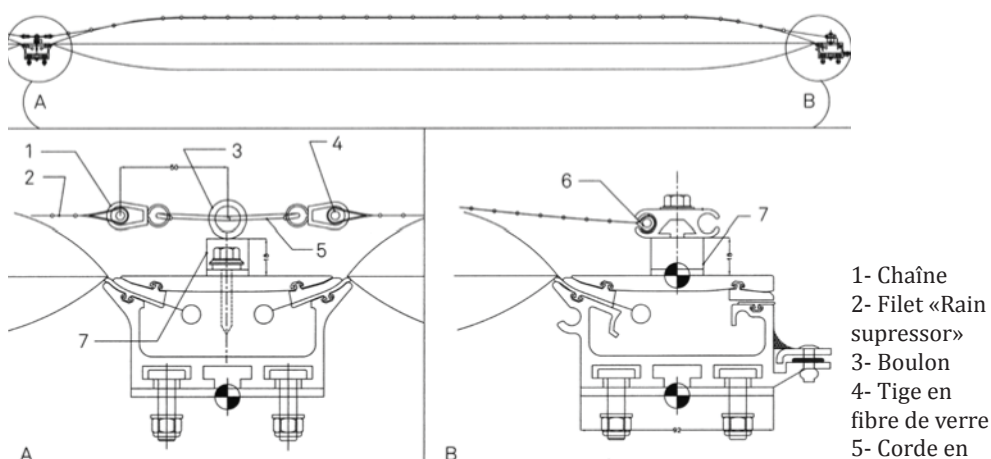


Figure 48: Détail de l'innovation Texlon® rain suppressors® de Vector Foiltec

Ce système consiste en un filet disposé sur la face externe du coussin et permet la rétention d'une fine couche d'eau en surface, ce qui permettra une atténuation de l'impact de la goutte d'eau sur la membrane.

Mais, tout comme dans le cas d'une recherche d'amélioration des propriétés isolantes du matériau, cette technologie a un impact sur la propriété fondamentale du matériau, à savoir sa transparence.

Ainsi, il a pu être constaté que les propriétés intrinsèques de l'ETFE ont de lourdes conséquences sur les ambiances internes et que des conceptions structurelle et formelle adaptées des coussins pourront contribuer à les modifier pour un confort optimal de l'utilisateur, une donnée fondamentale afin d'assurer la réussite d'une opération de réhabilitation.

Par ailleurs, il a pu être remarqué que ce nouveau matériau fait actuellement l'objet d'un large secteur de recherches visant à améliorer ses performances thermiques et acoustiques. Cependant, les innovations ainsi mises en place aboutissent actuellement à une diminution de la transparence du matériau. Ainsi, de par ses différentes caractéristiques et conséquences sur les ambiances perçues au sein des espaces, il convient de réserver les enveloppes en ETFE à certains usages.

3.3 Confrontation de l'enveloppe aux usages

Les différentes caractéristiques qualifiant les enveloppes en ETFE, que ce soit leurs propriétés intrinsèques ou leur mode de fonctionnement leur assurent une nette distinction et singularité envers tous les autres matériaux de construction pouvant être qualifiés de classiques. Ainsi, elles diffèrent particulièrement sur la relation qu'elles entretiennent avec l'extérieur ainsi que sur leur caractère dynamique.

a- Une enveloppe en relation directe avec l'extérieur

Selon la partie précédente, les coussins d'ETFE peuvent recevoir une impression afin d'assurer un contrôle du flux lumineux au sein de l'espace. Il est indéniable que, dans le cadre de certains usages, cette maîtrise soit nécessaire afin d'éviter tout risque d'éblouissement ou encore tout inconfort lié à une surchauffe de l'espace interne.

Si la transparence de l'ETFE rivalise avec celle du verre, il est cependant important de noter que les systèmes d'occultation mis en jeu pour ces deux matériaux divergent. Si, dans le cas des coussins, le degré d'opacité peut être géré par pression différentielle, une fois imprimé, il est toutefois impossible de revenir à son état de transparence naturelle. Cette irréversibilité des qualités du matériau est de plus soulignée par la durée nécessaire afin d'atteindre une réelle modification du flux lumineux, qui, comme dans le cas du Pôle régional des Savoirs, peut s'étendre jusqu'à 24 heures.

Par conséquent, l'utilisation de l'ETFE au sein d'un projet de réhabilitation doit, selon moi, être réalisée en adéquation avec les propriétés intrinsèques du matériau. Cette adéquation est justement illustrée par le projet de réhabilitation de la petite Cour de la Résidence de Dresde. Si Peter Kulka et Philipp Stamborski étaient conscients du degré de transparence et des possibles risques induits par celle-ci, ils n'ont pas souhaité imprimer les feuilles des coussins. Leur première intention consistait effectivement en la conception d'un abri pour les 800 000 visiteurs annuel de la Résidence. Cependant, ils ne désiraient pas dénaturer les usages originels de cour et de foyer de cet espace d'où leur choix de conserver la transparence maximale du matériau et ainsi une relation visuelle avec l'environnement.

De la même façon, Moritz Hauschild, lorsqu'il recouvrit la cour façonnée par l'implantation de son nouveau bâtiment de bureaux souhaitait apporter un espace tampon à son projet, espace de rencontre entre tous les membres de la société et qui devait être en relation directe avec le ciel.

De cette façon, l'ETFE qui, par ses propriétés, permet la conception de structures transparentes et légères, semble être en correspondance avec la définition que Werner Sobek¹ apporte de l'enveloppe d'un bâtiment. Selon lui, elle ne serait que la troisième peau de l'Homme après sa propre peau et ses vêtements. A ce titre, elle doit assurer sa protection envers toutes les attaques extérieures tout en le rapprochant au maximum de l'environnement dans lequel il évolue.

«Nous avons besoin de transparence ou de perméabilité pour nous permettre de percevoir nos sens.»²

W.Sobek

Dans cette optique, il préconise la conception d'enveloppes transparentes et légères assurant non seulement une relation sensorielle directe avec l'extérieur mais également une utilisation en parcimonie de l'énergie, notamment grâce à une pénétration maximale de la lumière naturelle au sein de l'espace.

Ainsi définie, l'ETFE pourrait permettre de concevoir des enveloppes, de la manière dont Werner Sobek le conçoit, comme un élément couvrant des milieux entre intérieur et extérieur. Ce constat amène alors à supposer que l'appréhension des feuilles d'ETFE comme un matériau pouvant être imprimé soit en contradiction avec sa nature même et que l'utilisation d'une telle opacification peut amener à des projets où techniques et usages ne sont plus en adéquation.

Ce constat peut, de mon point de vue, être réalisé au sein du Pôle régional des Savoirs de Rouen où la cour centrale, à l'origine cour de récréation pour les élèves de l'Ecole Normale des Garçons et surmontée d'une verrière. Cette dernière fut remplacée par une membrane en ETFE imprimée et accueille aujourd'hui la Cité des Métiers, espace de rencontre entre jeunes et conseillers. Malgré les pastilles imprimées destinées à réfléchir la lumière, les employés accusent les rayons incidents provoquant des reflets gênant sur leur écran d'ordinateur. Ce fait était connu et redouté dans la mesure où des ombrelles furent disposées afin de protéger les postes de travail. [Figure 49]

1- Werner Sobek est un architecte et ingénieur allemand né en 1953 à Aalen et dirige depuis l'an 2000, l'Institution des Structures Légères à Stuttgart.

2 - « We need transparency or permeability to enable us to perceive our senses. » Traduction personnelle Blaser, Werner. *Werner Sobek - Art of Engineering – Ingenieur Kunst*. Berlin : Birkhäuser. 2000, 192p.



Figure 49: Ombrelles installées au-dessus des postes de travail

Les ombrelles ainsi ajoutées ont pour effet non seulement de diminuer la transmission lumineuse permise par le matériau mais de surcroît de couper le contact visuel que l'utilisateur entretient avec l'espace extérieur.

Force est donc de constater que la transparence de l'ETFE constitue l'identité du matériau et induit en conséquence un panel d'usages.

Effectivement, les différentes transparences évoquées précédemment tendent à écarter les usages appelant une notion d'intimité incluant les espaces de travail ou d'études comme les bibliothèques. Au contraire, la transmission des bruits générés au sein de l'espace vers l'extérieur permettent de conclure à une bonne adéquation pour la couverture d'espaces de passage ou de rencontre avec autrui comme les rues intérieures, les passages commerciaux, les enveloppes de gare ou d'aéroports, les équipements sportifs. Notons par ailleurs que la couverture d'espaces extérieurs assure, en plus des économies d'énergie liées à la transmission de lumière naturelle comme le préconise Werner Sobek, la diminution des déperditions thermiques. En effet, par cette opération, les bâtiments bordant la cour diminuent la surface de leurs murs en contact direct avec l'espace extérieur. En hiver, le nouvel espace créé, plus chaud que l'environnement extérieur grâce aux propriétés isolantes des coussins, agit comme un espace tampon permettant de limiter les pertes de chaleur.

Mais, cette définition des enveloppes par Sobek amène également à réfléchir sur la relation que l'Homme entretient avec son environnement, une relation qui est bien souvent personnelle et singulière et qui ne permet pas d'exclure totalement tous les usages, notamment celui du logement.

b- Une enveloppe vivante : Quelle possibilité pour le logement ?

La maison Duong 2, à Lyon, est l'une des rares opérations de réhabilitation alliant logement et structure pneumatique en ETFE.

Ce constat peut s'expliquer, comme Philippe Villien l'affirme, par la nature singulière de cette technologie, rapprochant les enveloppes membranaires en ETFE à de véritables systèmes vivants.

Dans une étude réalisée par Antoine Picon¹ et Carlo Ratti², intitulée « *Architecture vivante : des bâtiments aux usagers* »³, il est affirmé que l'architecture a toujours cherché à imiter le vivant. Ainsi, grâce à des technologies de plus en plus pointues, la peau des bâtiments peut désormais réagir aux intempéries et à d'autres données externes. Elles semblent ainsi être animées de ce qui commence à ressembler à la vie.

Cette conclusion quant à l'évolution des enveloppes des bâtiments peut particulièrement bien illustrer et caractériser les membranes en ETFE.

En tout premier lieu, la conception de ces membranes est liée à celle de l'architecture textile qui fut longuement développée par l'architecte et ingénieur allemand Frei Otto. La méthodologie de ce dernier s'appuyait non seulement par un recours accru à l'expérience mais surtout à une observation perpétuelle de la nature. Par conséquent, dans son origine même, l'architecture membranaire en ETFE est en lien avec le monde du vivant.

Ensuite, cette dernière constitue des enveloppes réactives dont le comportement mécanique varie en fonction des conditions extérieures, et ce dans l'optique de s'adapter à leur environnement. Effectivement, la résistance de ces membranes augmente lorsque la température diminue, une qualité qui devient particulièrement intéressante par temps neigeux. Ainsi, c'est justement lorsque les coussins sont amenés à être davantage sollicités qu'ils deviennent naturellement plus résistants.

¹ - Antoine Picon est professeur à la Harvard Graduate School of Design (GSD) et président de la Fondation Le Corbusier.

² - Carlo Ratti est architecte, ingénieur et professeur au Massachusetts Institute of Technology (MIT).

³ - Picon, Antoine; Ratti, Carlo. *Architecture vivante: du bâtiment aux usagers*. L'Architecture d'Aujourd'hui. 2013, n°397, p.72-75.

En outre, il a déjà été vu que l'air présent au sein du système est un élément fondateur du comportement adaptable du système à son environnement. Une variation de sa pression aura pour conséquence une reprise des charges plus ou moins importante. Cette possibilité, associée à celle d'imprimer les feuilles d'ETFE, a abouti à une volonté de contrôle de la transmission lumineuse à travers le système. Même si cette technologie est en cours de développement et, selon la partie précédente, peut amener à une contradiction concernant l'utilisation du matériau, elle permet néanmoins d'exprimer la possibilité d'adapter la luminosité de l'espace en fonction des besoins des usagers.

Le système de gonflage, par les adaptations qu'il permet mais également par son fonctionnement même, représente ainsi une cause fondamentale de l'assimilation des enveloppes en ETFE à des systèmes vivants. Selon Philippe Villien, les plaintes concernant la nouvelle enveloppe de l'entrepôt ne touchaient en rien le bruit des impacts de pluie sur les coussins mais portaient sur la fréquence de déclenchement du système de gonflage, une fréquence rappelant fortement la respiration humaine. Associées aux craquellements inhérents à la structure porteuse en bois, ces diverses sonorités font des membranes en ETFE des enveloppes dynamiques qui se distinguent alors catégoriquement des systèmes statiques habituels. Ce comportement avait déjà été constaté par Reyner Banham¹ qui, en réaction à son séjour au sein d'un dôme pneumatique, affirmait :

« La beauté de ce ballon de baudruche résidait dans la franchise et la continuité de sa réponse. Le moindre changement perceptible dans les conditions intérieures ou extérieures, comme une simple conversation, entraînait un mouvement compensatoire de la peau ; et ceci sans l'intervention d'un ordinateur mais par la variation directe de la courbure de la membrane et l'équilibre des pressions. Pour l'occupant humain, c'était comme une sorte de partenariat implicite avec la membrane, chacun agissant indépendamment de l'autre mais avec une certaine bienveillance. »²

1 - Reyner Banham (1922 – 1988) fut l'un des auteurs et critiques d'architecture, de design et de culture populaire de la moitié des années 1950 à la fin des années 1980. Il était convaincu que la technologie rendait la société non seulement plus excitante mais aussi plus démocratique. L'association de sa rigueur académique et de la culture pop l'ont placé en opposition avec les mouvements traditionaliste et modernistes.

2 - Arts in society, Reyner Banham, 18/04/1968.

Mais plus encore que des enveloppes dynamiques, les membranes en ETFE sont de véritables systèmes évolutifs. Effectivement, cela a déjà été prouvé que ces dernières n'acquièrent leur forme définitive que des années après leur mise en place, lorsqu'elles ont été soumises à des conditions climatiques variées mettant en jeu différentes températures, différentes intensités de pluie, différentes charges de neige ou encore différentes forces de vent.

Il convient toutefois de se demander si le vivant est réellement la vocation ultime de l'Architecture et si cette dernière ne doit justement pas se distinguer de son hôte. Là semble alors se trouver l'une des limites de l'utilisation de l'ETFE dans des opérations de réhabilitation mobilisant le logement. A une époque où l'isolation phonique est conçue pour être de plus en plus performante, l'adaptation de l'habitant à une évolution permanente et au dynamisme inhérents aux enveloppes en ETFE semble fortement freinée par les usages actuels. Mais comme l'a souligné Philippe Villien, prenant l'exemple d'un enfant ayant toujours connu cet environnement, toute modification des usages est envisageable.

Malgré cette possibilité, les enjeux mêmes liés aux opérations de réhabilitation font référence à des habitudes passées qu'il est difficile d'effacer via l'utilisation de nouvelles technologies.

Si une utilisation de cette typologie d'enveloppes au sein même du logement s'avère actuellement freinée par les mœurs, une mise en œuvre en tant qu'espace à la frontière de l'intérieur et de l'extérieur dans des opérations de réhabilitations d'immeubles de logements semble cependant pertinente.



Figure 50: Vue du projet Frosilos - MVRDV

Cette introduction d'enveloppe en ETFE au sein de tels immeubles peut être illustrée par le projet Frosilos, réalisé par l'agence MVRDV [Annexe 6]. L'originalité de la réalisation repose sur l'identité du bâtiment à réhabiliter, à savoir deux silos à grains dans le quartier d'Islands Brygge. Soucieux de ne pas altérer l'identité architecturale des édifices et conscients de la difficulté consistant à percer les épais murs des silos, les architectes décidèrent de suspendre les 84 logements à leurs parois extérieures et, par voie de conséquence, de laisser vide l'espace central. [Figures 50]

Chaque cœur de silo fut alors transformé en hall d'entrée toute hauteur. Afin d'apporter un maximum de lumière naturelle au sein de ces espaces, ils reçurent une toiture constituée de coussins d'ETFE et formant une sphère.

[Figure 51 & 52]

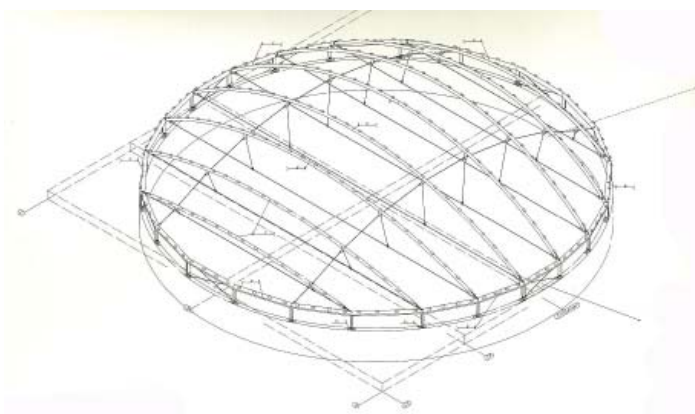


Figure 51: Structure de la toiture en ETFE

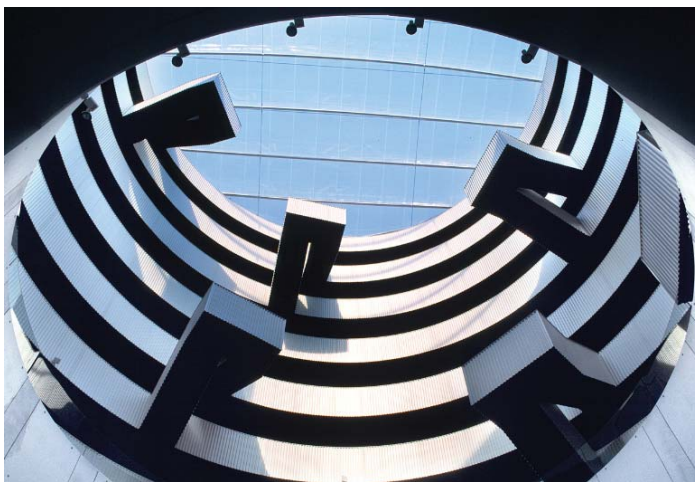


Figure 52: Vue intérieure du foyer central

Ce lien direct avec le ciel assure un espace entre intérieur et extérieur où les habitants peuvent se rencontrer.

Par conséquent et de cette manière, couvertures en ETFE et logements ne sont en rien incompatibles.

Elles peuvent alors soit être extériorisées de l'espace intime des pièces de vie, soit répondre à une certaine philosophie de vie.

Ainsi, les différentes propriétés intrinsèques, le mode de fonctionnement ainsi que les sensations que les enveloppes en ETFE créent au sein des espaces conditionnent les usages pour lesquels sa mise en place sera adaptée dans le cadre d'une opération de réhabilitation. Si son utilisation dans des projets de logements peut être envisagée, c'est en couverture des espaces favorisant la rencontre et demandant un lien sensoriel avec l'extérieur qu'elles seront le plus adaptées.

CONCLUSION

Lars Schiemann¹ décrit le cycle de vie d'un matériau comme la succession de quatre étapes. Après la naissance de la nouvelle ressource, correspondant à sa découverte et à la mise en évidence des intérêts qu'elle peut apporter dans le domaine de la construction, intervient sa croissance durant laquelle ces derniers sont développés et où elle acquiert progressivement une renommée. Ensuite, se succèdent la phase de maturité au cours de laquelle est déterminé la réelle place du matériau ainsi que son identité architecturale et enfin la saturation correspondant, à terme, à sa désuétude.

Si le verre a connu un fort développement entre les années 70 et 90 et que ce dernier tend actuellement à stagner, le développement de l'ETFE, un matériau comparable de par ses propriétés de transparence, est, quant à lui, tout autre. Effectivement, son utilisation en Architecture n'a débuté qu'au cours des années 70 mais les différentes propriétés qu'il présente ont favorisé une croissance accélérée. La transparence et la transmission lumineuse optimale qu'il permet, la légèreté et la minimisation des ressources qu'il promet ou encore sa ductilité assurant une liberté formelle totale ont tour à tour séduit l'ensemble des acteurs de la construction. Ainsi, ce succès se traduit par le large secteur de recherches dont il est actuellement l'objet et ce depuis quinze ans et qui contribue alors à une phase de maturité prospère.

Cependant, l'engouement grandissant que l'éthylène tétrafluoroéthylène suscite chez les constructeurs reste à nuancer. Car si les qualités de ce nouveau matériau sont indéniables et qu'en outre, elles permettent de répondre aux problématiques induites dans les opérations de réhabilitations pour une transition architecturale réussie, elles ne peuvent toutefois être pleinement et justement exprimées que sous des conditions constructives précises et au service d'usages déterminés afin d'aboutir à la durabilité de ces transformations.

Ainsi, dès la phase de conception de la nouvelle enveloppe, l'architecte devra avoir pleinement conscience des conséquences que pourront engendrer la forme des coussins, leurs dimensions, l'impression ou non de leurs feuilles ainsi que le choix de la structure primaire afin d'assurer une bonne maîtrise des ambiances internes.

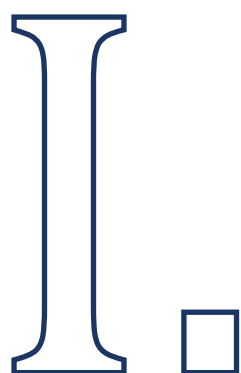
1 - Lars Schiemann est un Ingénieur en Bâtiment allemand et Professeur à l'Université Technique de Berlin et à l'Université Technique de Munich. Au sein de cette dernière, il dirige l'enseignement «Structure membranaire - Conception et Construction» pour la Chair «Conception des structures porteuses».

Par ailleurs, la pondération et l'ajustement de ces différents facteurs devront être mis au service d'espaces réhabilités répondant à une volonté de liaison sensorielle entre l'utilisateur et son environnement extérieur.

Mais cette condition du lien que l'Homme souhaite entretenir avec son environnement complexifie grandement la conclusion quant à une adaptation du matériau pour les opérations de réhabilitation touchant au logement, ce lien étant effectivement particulièrement subjectif. D'autre part la difficulté de répondre à ce questionnement se trouve également accru par le caractère dynamique des enveloppes en ETFE, redéfinissant alors les relations entre l'utilisateur et la structure habitée.

Par conséquent, l'Histoire de l'ETFE est présentement en pleine écriture et, s'il est certain qu'il possède toutes les qualités attendues afin d'assurer une transition architecturale et une durabilité des réhabilitations, le cadre architectural dans lequel il doit venir s'inscrire pour assurer la mise en exergue de ses qualités propres reste cependant à affiner. Cette précision, qui ne pourra s'établir qu'avec le temps, se fera en étroite relation non seulement avec les attentes constructives mais aussi avec l'évolution des usages et des mœurs.

ANNEXES



ETUDES
DE
CAS

ANNEXE 1

LOCALISATION

115 boulevard de l'Europe
76100 Rouen, France

ARCHITECTES

Agence ARTEFACT

ANNEE DE REALISATION

2011

DIMENSIONS

Cour de 21*27m

DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

9 bandes de coussins franchissant la largeur de la cour et soutenue par des poutres treillis biconvexes reposant sur les poteaux originaux

HISTOIRE DU LIEU

L'édifice accueillant le nouveau Pôle Régional des Savoirs connaît une Histoire riche et différentes étapes d'évolution.

En 1604, Eustache de Saint-Yon, maître de la Chambre des Comptes de Normandie achète le manoir, à l'origine dénommé Manoir de Hauteville et lui donne son nom. Un siècle plus tard, en 1705, Jean-Baptiste de la Salle loue l'édifice afin d'y instaurer une école de charité pour les garçons. C'est ainsi que naquit L'Ecole Normale des garçons qui ouvre alors ses portes pour la première fois en 1880, après d'importants travaux d'aménagement.

En 1963, l'institution déménage alors à Mont-Saint-Aignan et Saint-Yon devient une annexe du lycée Corneille puis le site accueille la suite le collège Alexis Carrel, qui deviendra le collège Jean Lecanuet jusqu'en 2002.

Le site se dégradant au fil des années, la Région Haute-Normandie désire ressusciter le monument délaissé pour y fonder le nouveau Pôle Régional des Savoirs.

NOUVEAU PROGRAMME

Sur le site de 11 000 m², le Pôle Régional des Savoirs est destiné à accueillir une quinzaine d'associations régionales en son sein, organisées selon quatre grands pôles: Culture, Sciences et Environnement, Santé, Emploi et Formation avec la Cité des Métiers par exemple.

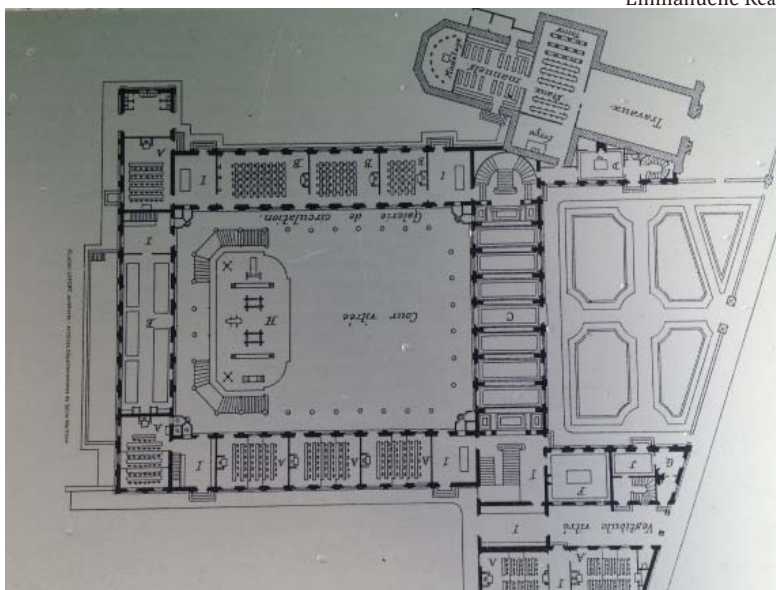
REHABILITATION DU PÔLE REGIONAL DES SAVOIRS



- Vue de la structure pneumatique -
« De l'Ecole Normale au Pôle régional des Savoirs », Claire Etienne, Jérôme Decoux, Emmanuelle Real



- Plan masse -
« De l'Ecole Normale au Pôle régional des Savoirs », Claire Etienne, Jérôme Decoux, Emmanuelle Real



- Plan du projet originel -
Photographie personnelle

DESCRIPTION DE LA REALISATION

« Ce projet démontre qu'il est possible de faire évoluer de magnifiques bâtiments, histoire de notre passé, vers de nouveaux usages respectueux des préoccupations de durabilité et d'économies d'exploitation propre à notre temps. »

[S.Plantrou, architecte d'Artefact]

Le projet de réhabilitation de l'ancienne école normale des garçons s'inscrit dans une volonté d'architecture durable avec de nouvelles technologies replaçant l'édifice dans son époque.

Les travaux concernent pour l'essentiel :

- la restauration et la restructuration des bâtiments existants une fois purgés des appendices récents
- la réalisation d'un vaste hall d'accueil du public à ce nouvel équipement côté boulevard de l'Europe
- la réalisation d'une couverture transparente sur la cour centrale (en lieu et place de l'ancienne verrière d'origine)
- le réaménagement des espaces extérieurs
- la réalisation d'une clôture contemporaine sur le boulevard de l'Europe en remplacement de l'actuel mur en béton habillé de plaquettes

En plus d'offrir une nouvelle structure pour la ville de Rouen, la Région Haute-Normandie souhaitait s'inscrire dans une démarche d'éco-construction où une réelle économie d'énergie est recherchée. Un pari réussi avec, notamment, l'obtention du label «Bâtiment Basse Consommation» pour son nouveau Pôle Régional des Savoirs.

Dans ce but, plusieurs dispositifs ont été mis en place.

D'une part, un principe mixte de géothermie-gaz a été installé pour chauffer les 33000 m² du Pôle. Ainsi, 70% du chauffage est assuré par géothermie et 30% par le gaz qui prend alors le relais quand les températures chutent sous les 7°C.

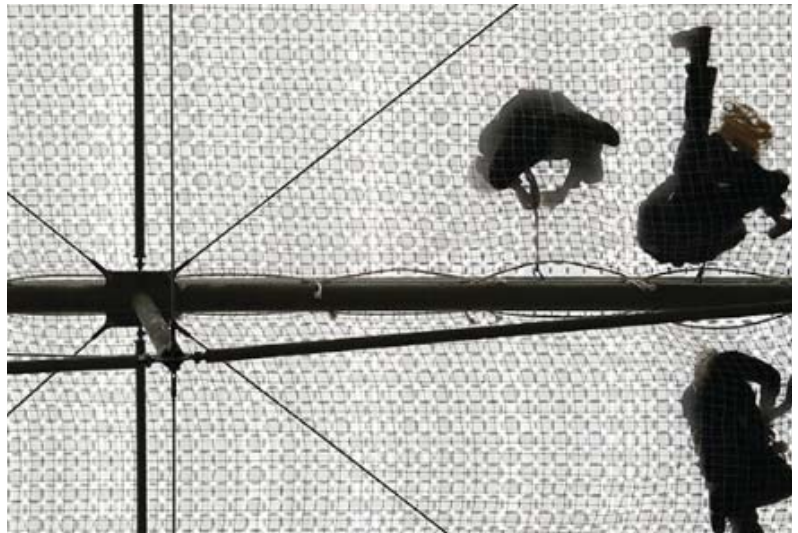
D'autre part, une production d'énergie est assurée grâce à la mise en place de 216 m² de panneaux photovoltaïques.

Enfin, le dernier élément semblant activement participer à ce projet d'éco-construction concerne la conception de la nouvelle enveloppe de la cour intérieure, à savoir une membrane en ETFE.



- Verrière originale -

« De l'Ecole Normale au Pôle régional des Savoirs », Claire Etienne, Jérôme Decoux, Emmanuelle Real



- Mise en oeuvre des coussins -

« De l'Ecole Normale au Pôle régional des Savoirs », Claire Etienne, Jérôme Decoux, Emmanuelle Real



- Nouvelle couverture -

Stephane Plantrou

ENJEUX DE L'ETFE AU SEIN DU PROJET

- Eco-construction -
- Economie d'énergie -
- Economie de matériaux -
- Ambiance lumineuse -

La nouvelle membrane en ETFE, recouvrant les 567 m² de la cour intérieure, est divisée en coussins de trois mètres de large. Chaque coussin est formé de trois feuilles d'ETFE imprimées pour un contrôle de la transmission lumineuse au sein de l'espace.

Cette nouvelle structure est venue remplacer la verrière existante. Dans un discours de l'architecte Stéphane Plantrou, responsable de ce projet, il affirme que l'utilisation de l'ETFE a permis une économie de 63 tonnes de matériaux: une verrière classique en verre et charpente métallique aurait eu un poids de 70 tonnes tandis que la structure actuelle pèse 7 tonnes.



- Vue de la cité des métiers -
Photo personnelle

AVIS DES USAGERS

«L'espace est clair et lumineux, j'adore venir ici»

« Je suis vraiment désolée, je ne vais vous donner que des mauvaises critiques sur cette nouvelle technologie. C'est sûr, c'est beau, mais il y a de nombreux inconvénients ! Le problème majeur, c'est le bruit ! Dès qu'il pleut je n'entends même plus le téléphone sonner à 10cm de moi. »

«J'ai toujours un thermomètre sur mon bureau, en été, il atteint parfois 40°C!»

« Vous savez, cette couverture a des défauts mais ici, on est sous les toits ! Et pour autant, j'adore venir travailler dans la cour ! »



- Vue du toit-
« De l'Ecole Normale au Pôle régional des Savoirs », Claire Etienne, Jérôme Decoux, Emmanuelle Real

REHABILITATION DE LA RESIDENCE DE DRESDE

LOCALISATION

Taschenberg 2
D1067 Dresde, Allemagne

ARCHITECTES

Peter Kulka Architektur

ANNEE DE REALISATION

2007-2009

DIMENSIONS

Aire de la cour: 615m²
Aire de la coupole: 1250m²

DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

La cour de forme trapézoïdale est couverte grâce à un treillis métallique en forme de coupole et reposant directement sur le faîtage des bâtiments bordant l'espace. Le motif de répétition de la structure est un losange et l'enveloppe est alors formée de 2784 coussins de dimensions différentes.

HISTOIRE DU LIEU

La Résidence de Dresde, datant du début du XIII^{ème} siècle, a connu de nombreuses périodes de réhabilitation. Elle fut ensuite agrandie entre 1471 et 1474 par l'architecte Arnold von Westfalen. Par la suite, plusieurs catastrophes ont rythmé les transformations du château. En 1701, un feu ravage en partie l'édifice et Auguste le Fort le reconstruit alors dans un style baroque typique de l'époque. C'est au XX^{ème} siècle qu'il reçoit des apports de style néo-Renaissance. Mais en février 1945, le bâtiment est entièrement détruit et ce ne sera que dans les années 1960 que l'édifice renaitra.

Depuis 2005, des opérations de réhabilitation se succèdent avec la restauration de la voûte verte par exemple.

NOUVEAU PROGRAMME

La Résidence de Dresde actuelle regroupe quatre musées: le Kupfertische-Kabinett, le Münzkabinett, le Türkische Cammer et une bibliothèque d'Art.

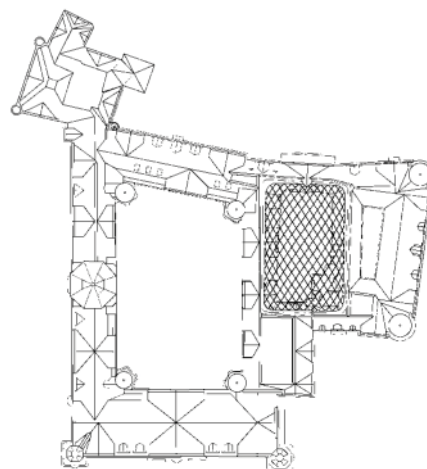
La petite cour intérieure du Palais devait alors devenir son foyer et l'espace central des différents musées qui l'entourent. Il accueille actuellement la billetterie, le point d'information, le magasin du musée ainsi que l'accès au café et aux différents musées.



- Vue de la coupole depuis le sommet de la Frauenkirche -
Photographie personnelle



- Vue de la coupole depuis l'intérieure de la cour -
Lösel, Jürgen, Staatliche Kunstsammlungen Dresden, Membrandach für das Schloss, Bauwelt 22/2009



- Plan de la résidence -

1:2500

Meyer Friederike, Membrandach für das Schloss, Bauwelt 22/2009

- Construire en adéquation avec l'histoire du monument -
- Liberté de forme -
- Ambiance -
- Relation directe avec l'extérieur -

La toiture devait pouvoir s'intégrer dans le paysage de la ville et ainsi respecter l'architecture environnante. Ainsi, il fut décidé qu'elle prenne la forme d'une coupole, afin de rappeler celle de la Frauenkirche, de l'ancienne fabrique de cigarette ou d'autres monuments emblématiques de la ville.

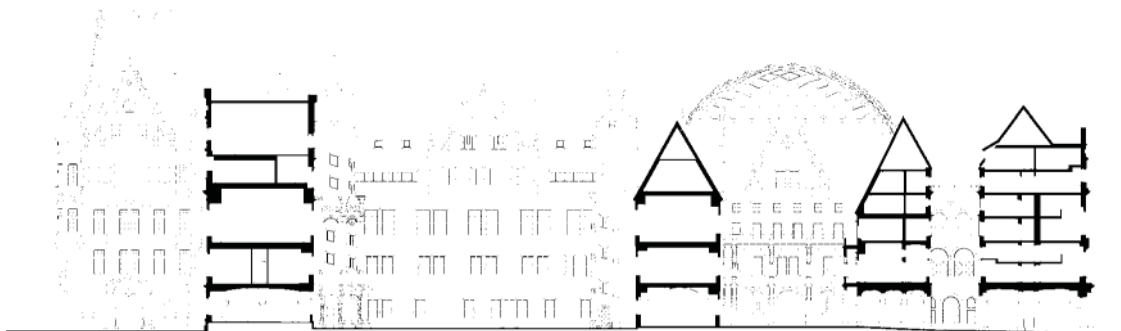
Si un toit en verre était préalablement prévu pour ce projet, les charges qu'il aurait engendré sur les murs de la Résidence auraient été trop élevées. Les différentes opérations de réhabilitation qu'elle a subies ont effectivement engendré une fragilisation de la structure qui n'est alors plus homogène. La solution alternative de l'enveloppe membranaire a alors été adoptée. En plus d'être beaucoup plus léger que le verre, le matériau, très ductile, a permis de réaliser les intentions architecturales de Peter Kulka, qui souhaitait concevoir une enveloppe légère d'une part, ce qu'il a pu facilement réaliser avec l'ETFE malgré la forme trapézoïdale de la cour. D'autre part, l'architecte souhaitait appliquer une trame en losanges pour son enveloppe, une forme géométrique significative dans l'architecture de la Résidence. Dans le cas du verre, seules des formes triangulaires peuvent être facilement mises en oeuvre dans l'optique de la conception d'un dôme.



- Utilisation de la structure pour rappeler la figure du losange -
 A gauche - Ombre portée de la structure - Photographie personnelle
 A droite - Vue de la Riesensaal - www.skdmuseum.com



- Continuité entre intérieur et extérieur -
 Photographie personnelle



- Coupe transversale -
 1:1000

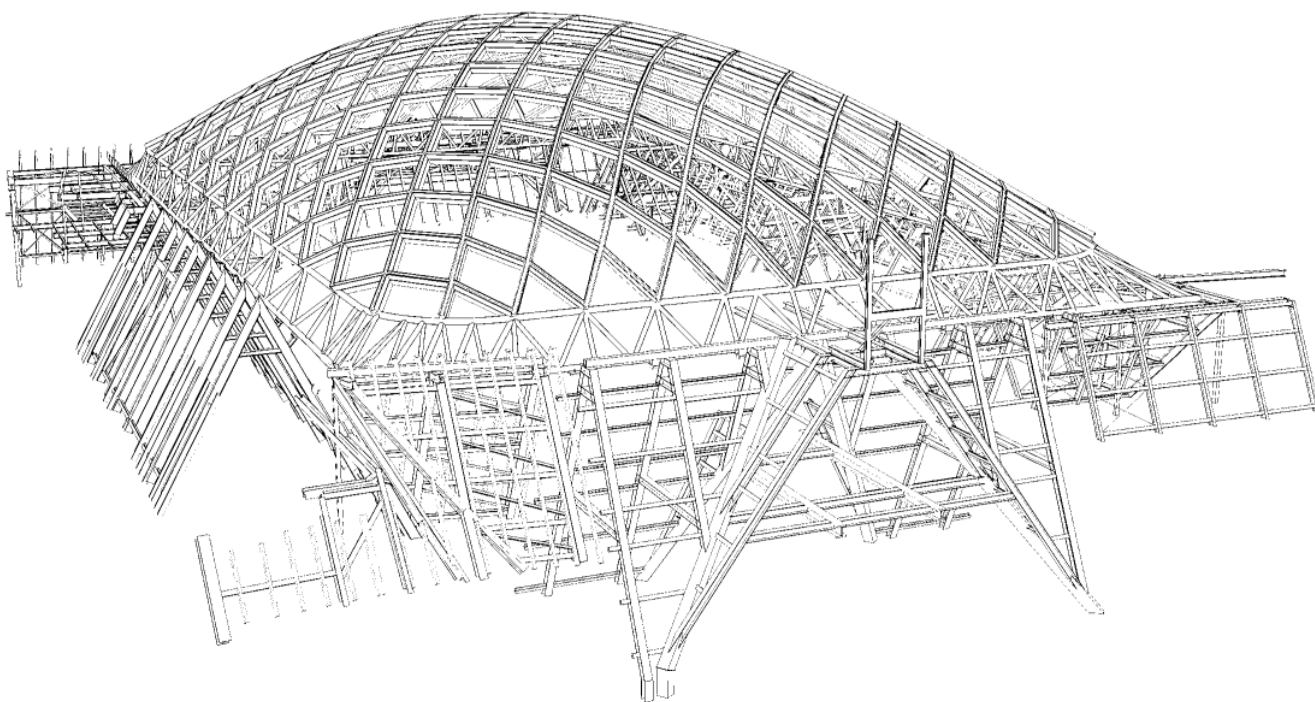
Meyer Friederike, Membrandach für das Schloss, Bauwelt 22/2009

De plus, ce matériau répondait parfaitement aux attentes de l'architecte en terme d'ambiance. Il avait effectivement pour volonté que les usagers de la petite cour ne remarque pas la présence de cette enveloppe mais qu'ils s'y sentent comme dans un espace extérieur.

Lors d'une visite de la Résidence, j'ai pu moi-même expérimenter cet espace. En termes de luminosité, j'ai pu constater que les ombres de la structure métallique animent élégamment la façade. Par ailleurs, j'ai eu la chance d'expérimenter l'adaptation de la membrane à son environnement. Lors de mon arrivée, le soleil était présent et la température à l'intérieur de la cour était relativement élevée. Grâce à un système de capteurs thermiques, les coussins en partie supérieure de la coupole se sont ouverts, rafraîchissant très rapidement l'espace interne.



- Vue des ouvrants-
Photographie personnelle



- Modélisation numérique de la coupole-
Meyer Friederike, *Membrandach für das Schloss*, Bauwelt 22/2009

LOCALISATION

Parcelle singulière, possédant deux ouvertures: une première sur le boulevard de la Croix-Rousse et l'autre sur l'impasse Dupeyroux, à Lyon.

ARCHITECTES

Philippe Villien

ANNEE DE REALISATION

2013

DIMENSIONS

Surface totale des coussins: 30m².

DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

3 coussins triangulaires, chacun de dimensions différentes et portés par une structure primaire en bois.

HISTOIRE DU LIEU

Au sein de cette parcelle longue et étroite, se trouvent une maison individuelle et un entrepôt que Monsieur Duong souhaite reconverter en une maison autonome et accueillant deux chambres à coucher.

Deux grandes problématiques émanent de ce projet: sa situation en coeur d'îlot qui limite les ouvertures en façade du fait d'une mitoyenneté importante et les techniques de construction traditionnelles. Les murs sont effectivement conçus en béton mâchefer.

A ces deux problématiques, Philippe Villien entrevoit une solution: une construction pneumatique et transparente pour le toit de la nouvelle maison.

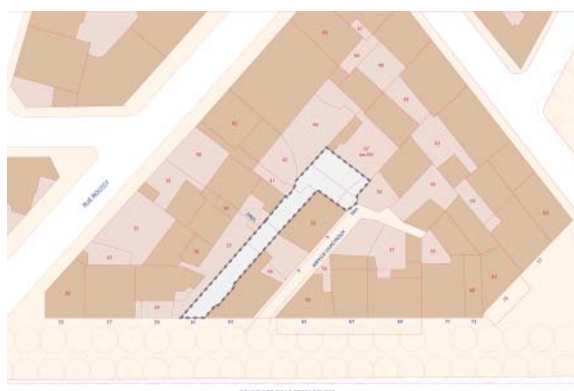
NOUVEAU PROGRAMME

La mitoyenneté de l'édifice étant particulièrement accrue, Philippe Villien a souhaité éliminer tout effet d'enfermement en valorisant les vues profondes, les vues diagonales et en maximisant les vues en contre-plongée vers le ciel.

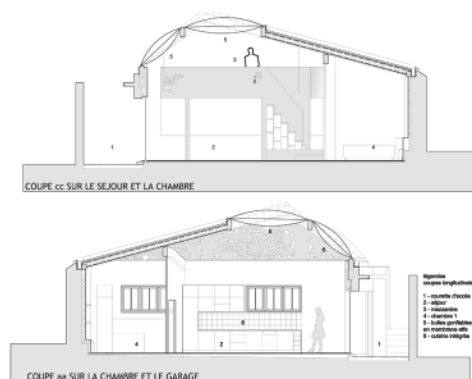
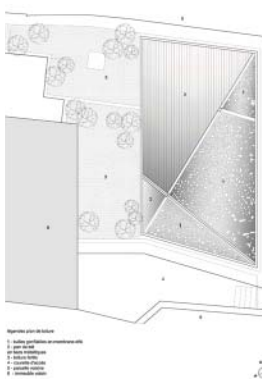
C'est dans cette optique que la toiture terrasse existante a été ouverte afin de recevoir une structure pneumatique en ETFE maintenue grâce à une charpente en lamellé-collé. L'ETFE est utilisé sous forme de coussins à deux chambres à air dont chacune des feuilles a reçu une impression de motifs devant rappeler l'ombre portée par le feuillage des arbres.



- Vue de la toiture réhabilitée -
www.th1-agence.fr



- Parcelle d'implantation -
www.th1-agence.fr



- Plan masse et coupes du projet -
www.th1-agence.fr

ENJEUX DE L'ETFE AU SEIN DU PROJET

- *Logement* -
- *Contrôle de la lumière* -
- *Ambiance lumineuse* -
- *Légèreté* -
- *Ductilité* -

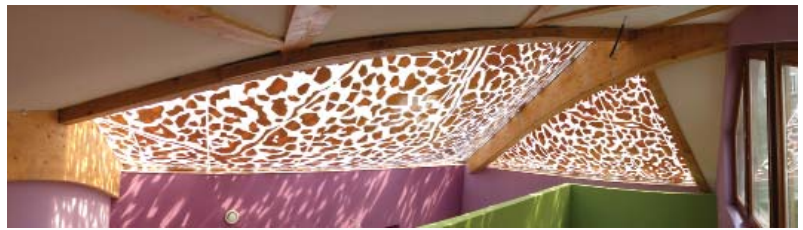
La maison Duong 2 est l'un des seuls projets appelant une toiture en ETFE au sein d'un logement. Effectivement, cette technologie est en majorité utilisée pour des réalisations de grande échelle et semble encore marginale pour les projets d'habitation.

Le caractère ductile du matériau est ici primordial dans la mesure où la structure peut facilement adopter une forme de prisme dans l'optique d'une maximisation d'entrée de la lumière, un facteur indispensable du fait de l'enclavement de la maison en cœur d'îlot.

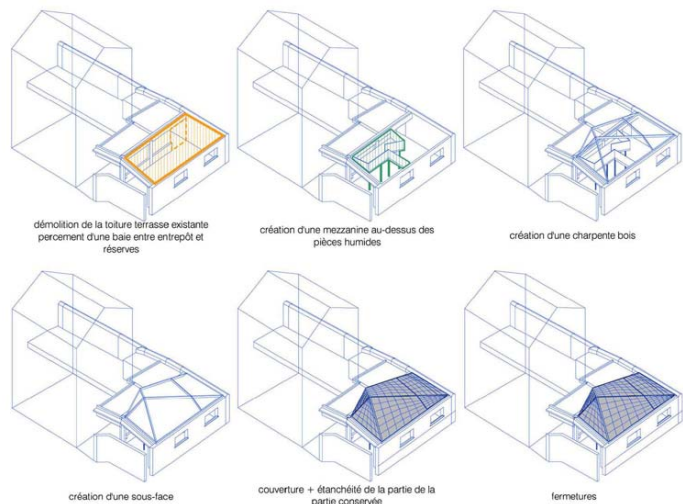
Par ailleurs, la légèreté de l'ETFE constitue le second point clef du projet, les murs de l'entrepôt existant étant effectivement construits en béton de mâchefer. La construction ainsi conçue permet alors d'aboutir à un intéressant mélange de savoir faire traditionnel et de techniques innovantes.

Les motifs imprimés et l'ambiance lumineuse douce qu'ils introduisent au sein de l'espace intérieur constituent également une caractéristique centrale du projet.

Enfin, si le bruit de l'impact des gouttes de pluie ne semble pas gêner les habitants, c'est celui de la pompe qui se déclenche périodiquement qui est le sujet des plaintes. Entre le craquement de la structure en bois et la pompe qui rappelle la respiration humaine, les membranes en ETFE s'apparentent à de véritables enveloppes vivantes.



- Vue des motifs: Vivre sous les arbres -
www.th1-agence.fr



- Etapes successives du projet -
www.th1-agence.fr



- Vue intérieure -
www.th1-agence.fr

ANNEXE 4

REHABILITATION DU COMPLEXE DE BUREAUX VIAG

LOCALISATION

Brienner Strasse 40.
80333 München

ARCHITECTES

Hauschild + Boesel

ANNEE DE REALISATION

2000

DIMENSIONS

Cour triangulaire de 31*54 mètres

DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

14 bandes de coussins, chacun d'une largeur de 3m60 et d'une longueur propre, s'adaptent à la forme triangulaire de la cour et sont soutenues par des poutres métalliques reposant sur le nouveau bâtiment au nord et sur une seconde poutre treillis métallique au sud. Cette dernière est en rupture avec l'ancien bâtiment dans la mesure où elle repose sur de nouveaux poteaux. La fermeture est établie par un ouvrant de verre.

HISTOIRE DU LIEU

Dans l'axe historique de la ville de Munich, menant à la célèbre place des Rois, se trouve le complexe de bureaux VIAG AG.

Ce dernier se compose de quatre bâtiments donnant sur la Brienner Strasse, la Augustenstrasse et la Richard-Wagner Strasse et formant une cour en leur centre.

NOUVEAU PROGRAMME

Dans le cadre de la réhabilitation et de l'extension du complexe, l'agence Hauschild+Boesel prévoit l'implantation d'un nouveau bâtiment au centre de la cour.

Afin d'assurer une entrée maximale de lumière au sein de tous les bâtiments, l'introduction de ce dernier se fait de manière diagonale et engendre alors la formation de différentes cours.

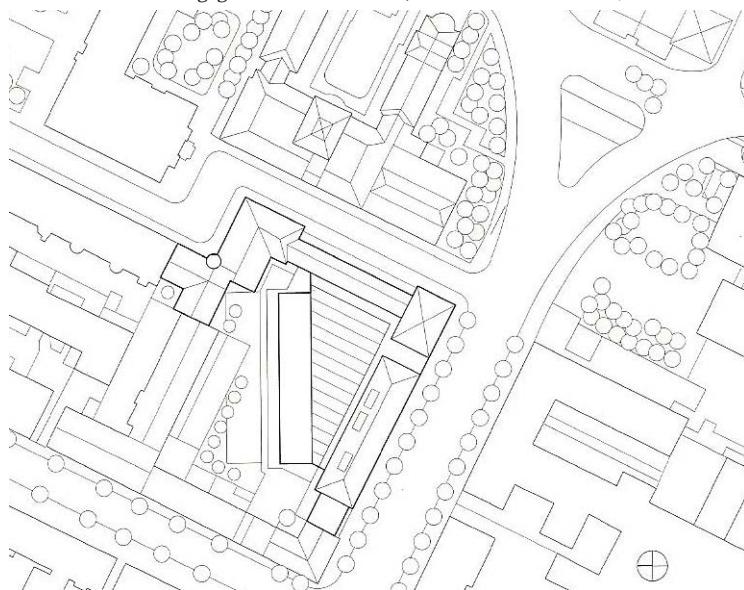
L'agence souhaite alors recouvrir la cour sud afin de créer un espace d'accueil et de rencontre et entre tous les membres de l'entreprise.

Pour ce faire, une couverture en ETFE fut choisie, notamment en considération de la forme triangulaire de la cour.



- Vue intérieure-

Verwaltungsgebäude in München, Bauen mit Membranen, DETAIL 2000/6



- Plan masse 1:2500-

Verwaltungsgebäude in München, Bauen mit Membranen, DETAIL 2000/6

- Transmission lumineuse -
- Légèreté -
- Ductilité -
- Portée -
- Facilité de maintenance -

Les raisons de l'emploi de l'ETFE pour la couverture créée sont multiples. L'utilisation de ce nouveau matériau permettait avant tout une pénétration maximale de la lumière au sein de tous les bâtiments la cour.

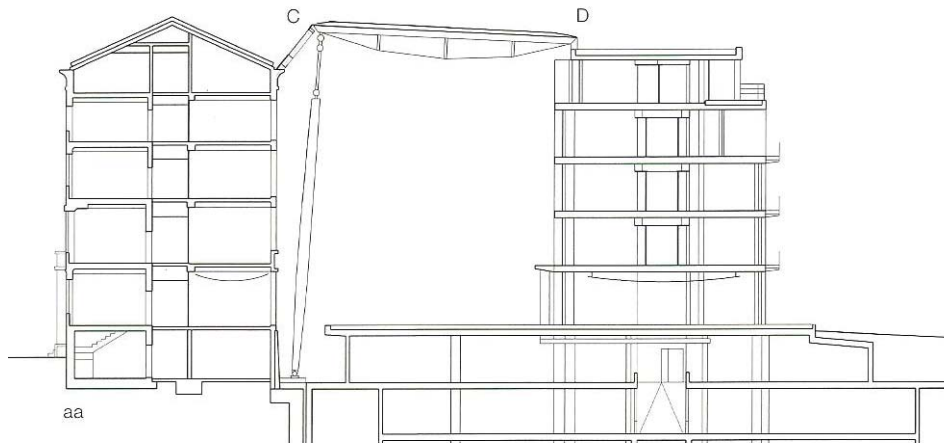
Par ailleurs, il fallait concevoir une enveloppe permettant à la fois de franchir les grandes dimensions de celle-ci mais qui soit également légère dans le but de ne pas apporter trop de charges supplémentaires à l'ensemble.

Lors de la mise en oeuvre de la membrane, sa qualité auto-nettoyante fut en outre très appréciée de l'architecte Moritz Hauschild: en n'appliquant qu'une légère secousse sur les coussins, toute la neige pouvait être évacuée.



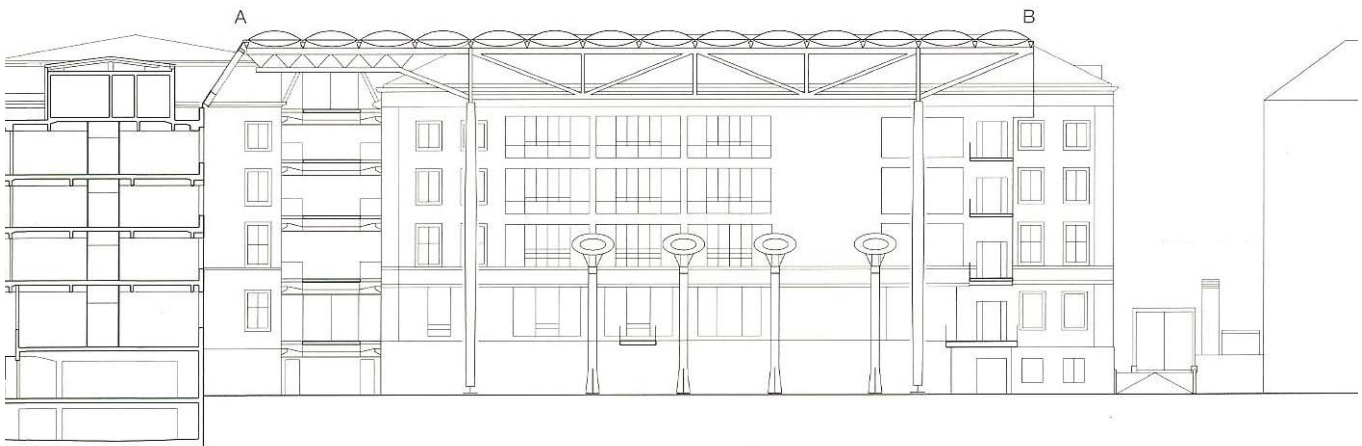
- Vue depuis la rue -

Verwaltungsgebäude in München, Bauen mit Membranen, DETAIL 2000/6



- Coupe transversale 1:500 -

Verwaltungsgebäude in München, Bauen mit Membranen, DETAIL 2000/6



- Coupe longitudinale 1:500 -

Verwaltungsgebäude in München, Bauen mit Membranen, DETAIL 2000/6

LIMITE DU MATERIAU

«Le grand intérêt de ce nouveau matériau vis-à-vis du verre consiste en son comportement mécanique en tension et qui permet plus de créativité. Mais ce comportement a aussi complexifié l'étape de conception !»

Moritz Hauschild

De par sa mise en oeuvre en coussins remplis d'air, de grandes forces de tension sont effectivement exercées au sein d'une membrane en ETFE. Il faut ainsi attacher une grande importance aux renforcements de rives.

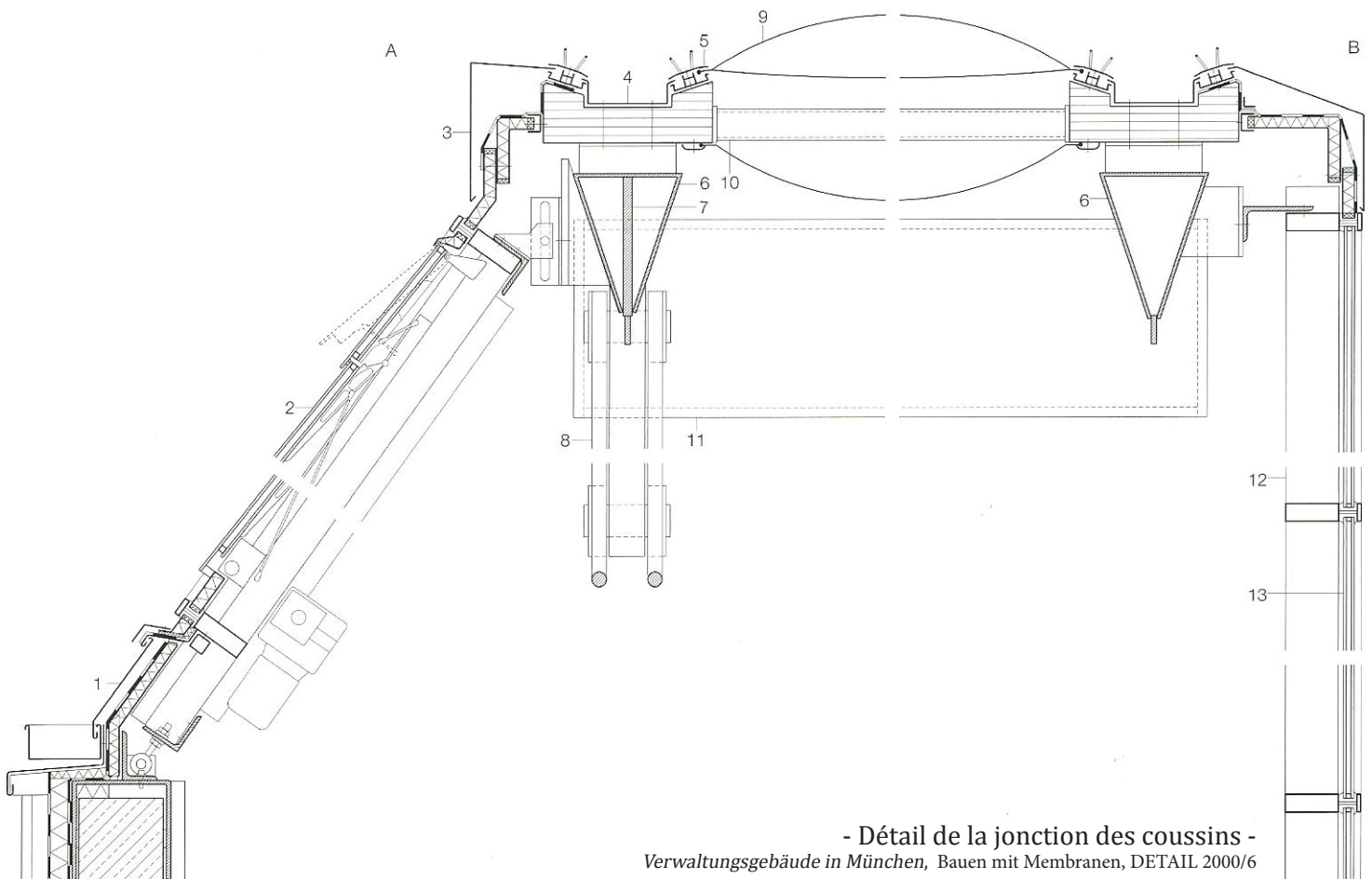
Par ailleurs, la possibilité d'une accumulation d'eau sur les coussins engendre la nécessité de renforcements structurels importants au niveau des appuis. Un renfortement qui fut conçu par des poutres triangulaires dans ce projet, une forme assurant la reprise de forces tout en assurant une finesse vue du sol.

La seconde limite de la membrane illustrée par ce projet concerne la transparence acoustique de l'ETFE. Les impacts de pluie, très fréquents à Munich, engendraient un niveau sonore trop important pour les bureaux mitoyens et ont finalement abouti à un remplacement de la couverture par une verrière. Deux limites qui ont alors poussé Moritz Hauschild à conclure :

«Si la réhabilitation était à refaire, je ne choiserais pas l'ETFE!»



- Vue de la structure porteuse -
Verwaltungsgebäude in München, Bauen mit Membranen, DETAIL 2000/6



- Détail de la jonction des coussins -
Verwaltungsgebäude in München, Bauen mit Membranen, DETAIL 2000/6

LOCALISATION

39 boulevard Ornano
93285 Saint-Denis

ARCHITECTES

Loci Anima

ANNEE DE REALISATION

2009

DIMENSIONS

Enveloppe d'une petite tour de bureaux de 7 étages d'une superficie totale de 5130m².

DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

Coussins d'ETFE rétractables pouvant descendre le long de la façade grâce à des câbles accrochés sur la structure existante.

HISTOIRE DU LIEU

Le projet original consiste en une tour de bureaux, devant accueillir le siège social de Siemens et réalisée en 1970 par l'architecte Bernard Zehrffuss.

Lors de sa construction, la tour affiche un principe constructif novateur : constituée d'un noyau central en béton, les planchers suspendus sont conçus comme de véritables plateaux paysagers sans aucun mur ni poteau susceptibles de bloquer les vues vers l'extérieur. La façade, quant à elle permet à l'architecte d'affirmer l'utilisation du métal par une émergence de la structure. Mais, conçue à une époque où les économies d'énergie ne sont pas une question centrale de la conception, l'ensemble est très mal isolé.

NOUVEAU PROGRAMME

Dans le cadre du concours de Rénovation Bas Carbone organisé par EDF en 2009, Françoise Raynaud, architecte fondatrice de Loci Anima, propose la solution originale d'une enveloppe amovible constituée de coussins d'ETFE tout autour de l'ouvrage. Celle-ci devait s'accrocher aux tiges porteuses des planchers et aurait permis d'emmitoufler le bâtiment en hiver et de le déshabiller lors de l'arrivée de l'été.

Il était également prévu un chauffage par dalles rayonnantes électriques intégrées dans le plafond des bureaux, une injection d'air en provenance du volume entre la membrane ETFE et le bâtiment, réchauffé par le soleil grâce à l'effet de serre créé par la membrane.



- Projet original de Bernard Zehrffuss -
Concours Rénovation Bas Carbone EDF 2009, www.lemoniteur.fr



- Projet de réhabilitation prévu par Loci Anima -
Concours Rénovation Bas Carbone EDF 2009, www.lemoniteur.fr

De plus, la climatisation devait être supprimée et le rafraîchissement du bâtiment devait être effectué par la ventilation et grâce à l'inertie du béton dans le puits de lumière et la cascade intérieure. Enfin devait être mis en place la production d'énergie solaire photovoltaïque installée en toiture ainsi qu'en allège des coussins d'ETFE.

ENJEUX DE L'ETFE AU SEIN DU PROJET

- Isolation par l'extérieur -
- Economie d'énergie -
- Mobilité de la membrane -

Suite à la réalisation de ce projet, il était attendu que le Diagnostic de Performance Energétique du bâtiment passe d'une classe E, correspondant à une consommation de 231 à 330 KWh/m²/an à un DPE de classe B soit une consommation de 51 à 90 KWh/m²/an.

Par ailleurs, il était également prévu que le projet assure non seulement une économie d'énergie mais également une production propre grâce à des panneaux photovoltaïques compris à l'intérieur des coussins.

«Nous voulions non seulement répondre à la conservation du patrimoine mais au-delà, nous avions l'ambition de dépasser le cadre de la remise aux normes et propulser ce bâtiment vers le futur en transformant radicalement les usages et la qualité de vie de ses occupants» Françoise Raynaud

Selon l'architecte, il est important, sur la scène architecturale, de trouver son inspiration de la nature afin de reproduire ou réinterpréter ses qualités d'adaptabilité, d'évolution ou de transformation. C'est cette volonté qu'elle a réussi à illustrer dans ce projet, la membrane du bâtiment variant au rythme des saisons.

LIMITE DU PROJET

Si ce projet fut lauréat du concours organisé par EDF, il ne fut cependant pas réalisé et c'est récemment, en 2013, que la Tour a fait peau neuve selon un concept de l'agence Bléas et Leroy qui consistait en la sauvegarde des éléments architecturaux caractéristiques de la Tour.

On peut ainsi s'interroger sur les limites des enveloppes en ETFE au sein des opérations de réhabilitation et sur l'alliance possible entre bâtiments anciens et nouvelles technologies.



- Coupe du bâtiment prévu par Loci Anima -
Concours Rénovation Bas Carbone EDF 2009, www.lemoniteur.fr



- Evolution du DPE prévue par Loci Anima -
Concours Rénovation Bas Carbone EDF 2009, www.lemoniteur.fr



- Projet réalisé par Bléas et Leroy -
www.businessimmo.com

LOCALISATION

Islands Brygge (quartier de Copenhague),
Danemark

ARCHITECTES

MVRDV

ANNEE DE REALISATION

2001-2005

DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

8 bandes de coussins d'ETFE forment une couverture en forme de sphère. Elles sont portées par des poutres treillis métalliques disposées de manière radiale vers le centre de la sphère.

HISTOIRE DU LIEU

L'Island Brygge, lieu d'implantation de la réhabilitation, fait actuellement l'objet de différentes opérations de reconversions dans le but d'assurer une meilleure liaison avec le centre ville de Copenhague. C'est dans ce contexte que deux silos à grains furent reconvertis immeubles d'habitations de 84 logements.

NOUVEAU PROGRAMME

Ayant constaté que le percement des murs constituant les deux silos s'avérait difficilement réalisable et afin de conserver l'identité du bâtiment, les architectes décidèrent de laisser la structure intacte et de venir ajouter au contraire une seconde peau. L'espace intermédiaire devant alors accueillir les logements.

Le vide des silos, caractéristique de l'Histoire du bâtiment fut alors transformé en deux hall d'entrée toute hauteur permettant d'accueillir les circulations et d'apporter un foyer aux 84 logements mitoyens.

Dans l'optique d'apporter un maximum de lumière naturelle au sein de ces espaces, ils furent surmontés de toiture en ETFE.

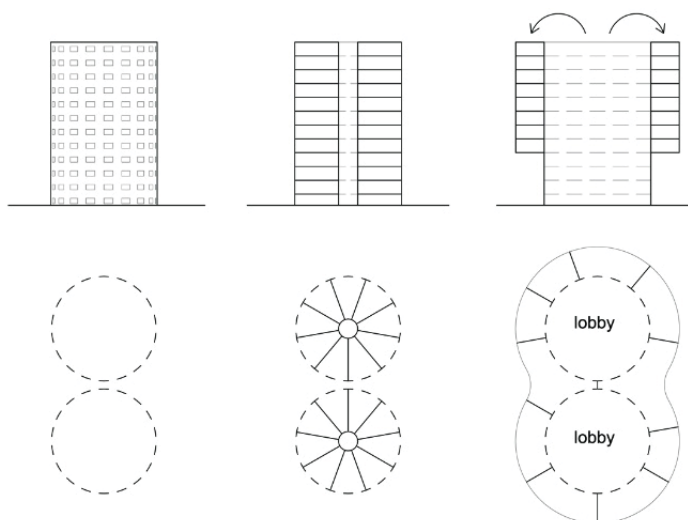
FROSILOS : RECONVERSION DE SILOS A GRAINS



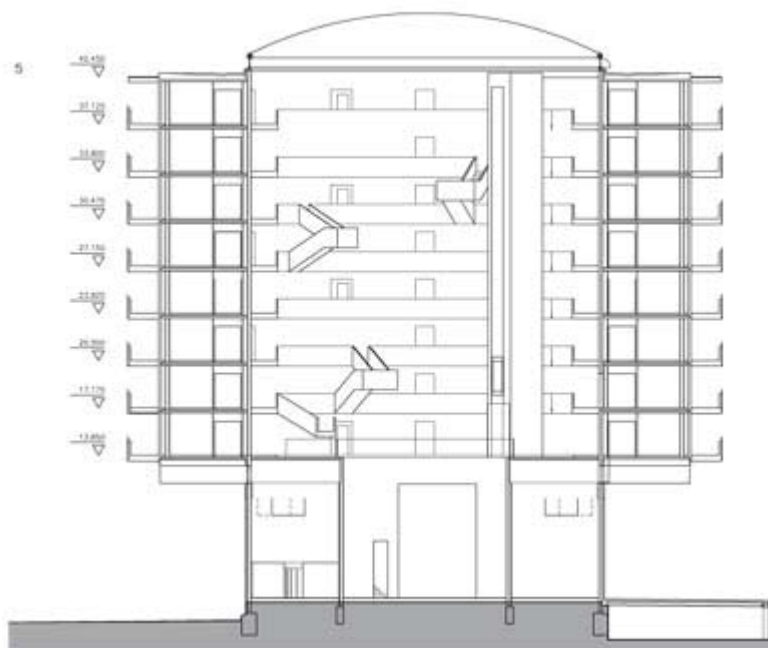
- Silos à grains originels -
www.mvrdv.nl



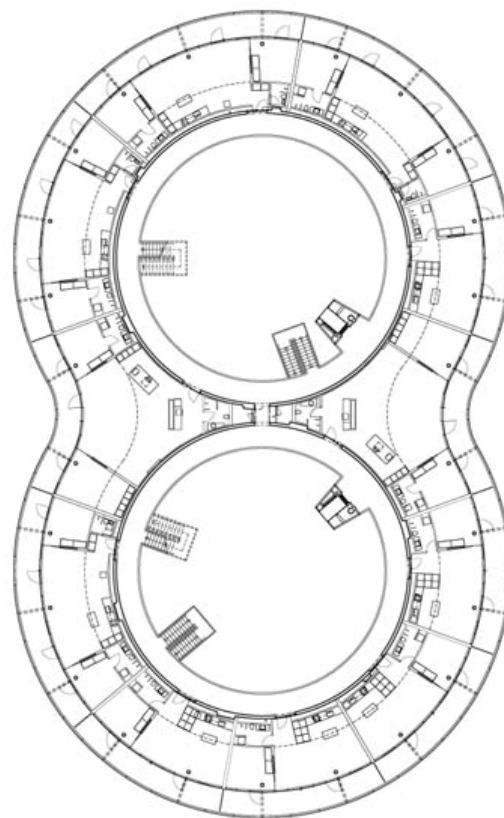
- Vue du projet -
www.mvrdv.nl



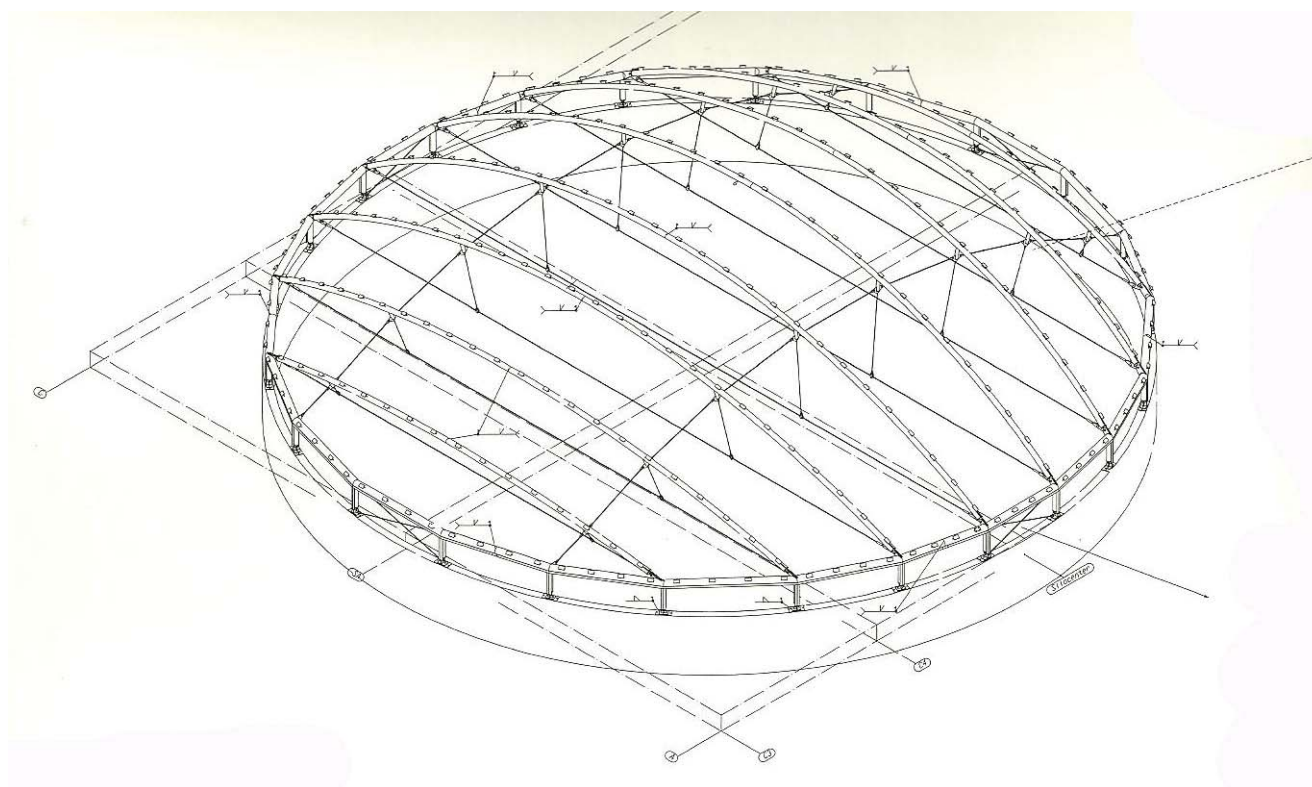
- Concept de réhabilitation -
www.mvrdv.nl



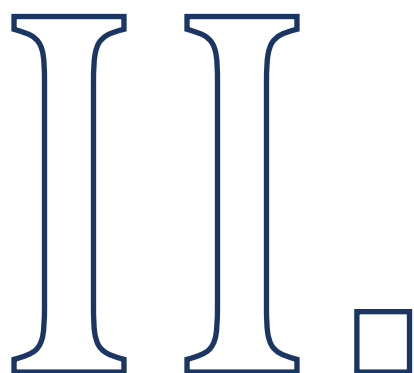
- Coupe de principe -
www.archiinfo.it



- Plan d'étage -
www.archiinfo.it



- Structure de la toiture en ETFE -
LeCuyer Anett, *ETFE: Technology and Design*, p.58



COMPTE- RENDUS
DE
VISISTES
ET
D'ENTRETIENS

Moritz Hauschild est un architecte allemand, co-fondateur de l'agence Hauschild + Boesel et professeur au sein de l'Université Technique de Munich. Il fut le responsable du projet de réhabilitation du complexe de bureaux VIAG AG à Munich.

Raisons du choix de l'ETFE au sein du projet :

Les bâtiments préexistants formaient préalablement une cour carrée et l'appel d'offre concernait la conception d'un nouveau bâtiment au sein de celle-ci. Pour des raisons d'ensoleillement, il fut construit en diagonale, permettant ainsi un éclairage optimal dans tous les bâtiments. Deux petites cours furent ainsi créées aux extrémités ainsi qu'une grande cour au Sud.

C'est dans l'optique d'augmenter la surface du projet que cette dernière cour fut couverte grâce à une enveloppe en ETFE.

Les principales raisons ayant motivé l'utilisation de ce matériau sont les suivantes :

- La légèreté du matériau qui permettait la conception d'une structure porteuse fine afin de ne pas dénaturer le bâti existant
- Sa grande transparence
- Le caractère très lisse des feuilles d'ETFE, un grand atout que Moritz Hauschild pu découvrir par temps neigeux. Il fut ainsi surpris qu'un simple tapotement de la membrane permette une évacuation totale de la neige. Ce fait étant également valable pour la saleté, la transparence n'est ainsi jamais altérée.
- La portée à couvrir était également très grande et la résistance mécanique du matériau était parfaitement adaptée aux dimensions de la cour.

Qualités de l'ETFE vis-à-vis du verre :

Moritz Hauschild mit de nouveau l'accent sur la légèreté des membranes et les grandes portées qu'elles permettent. L'un des éléments qui l'a également fortement intéressé avec les coussins en ETFE concernent leur fonctionnement en tension. Ce comportement permet une liberté formelle beaucoup plus grande qu'avec le verre qui, lui, doit toujours être plan. Les seuls éléments devant être consciencieusement conçus sont alors les éléments reprenant cette tension.

Mais il mit également en évidence la complexité de conception de ces membranes. Effectivement, il m'expliqua qu'il était nécessaire de prendre en considération une éventuelle crevaision des coussins et ainsi la possibilité d'une accumulation d'eau sur ces derniers.

Par conséquent, des renforcements conséquents sont à concevoir au niveau de l'appui des coussins, un renforcement que Moritz Hauschild réalisa grâce à des poutres triangulaires permettant non seulement de reprendre d'importantes charges mais aussi d'assurer, depuis la cour, l'impression d'une structure porteuse fine et légère.

Un des autres problèmes des coussins d'ETFE concerne leur manque d'absorption des ondes sonores. Les personnes travaillant au sein du VIAG se sont beaucoup plaint du bruit de répercussion de la pluie, aboutissant finalement à un remplacement de la structure membranaire par une toiture en verre.

Les caractéristiques constructives de la membrane :

- Dimensions des coussins

La couverture de l'atrium fut réalisée grâce à des bandes de coussins d'une largeur de 3m70 et dont la longueur s'adapte progressivement à la forme triangulaire de la cour.

Une bande de coussin d'ETFE est réalisée grâce à trois feuilles et un système de pompe les gonfle en continu de sorte qu'une légère crevaision est sans grande incidence.

- Liaison des coussins entre eux

La jonction entre les coussins fut réalisée grâce à des profilés métalliques venant reposer sur les poutres triangulaires précédemment décrites. Ces dernières accueillèrent également des chéneaux afin d'assurer l'évacuation d'eau.

- Mise en œuvre de la membrane

La mise en œuvre de la membrane se déroula en deux étapes.

Il fut tout d'abord monté la structure porteuse comprenant la poutre treillis au niveau du bâtiment existant, les poteaux ainsi que les poutres devant reprendre les coussins. Ensuite, les bandes de coussins furent montées les unes après les autres, directement sur le chantier de par leurs grandes dimensions.

- Fondations de la couverture

D'un côté, la membrane repose sur le nouveau bâtiment et les fondations conçues pour celui-ci suffirent tandis que de l'autre côté, la membrane repose sur des poteaux séparés du bâti existant et possède donc leurs fondations propres.

Ressenti sur la couverture:

Moritz Hauschild m'avoua qu'il était déçu du remplacement de la membrane par une structure en verre. Mais il me confia également que cette couverture lui posa de nombreux soucis lors de l'étape de conception et que, par conséquent, s'il avait été pleinement conscient de tous les problèmes qu'il a alors dû affronter, il n'aurait certainement pas tenté l'expérience.

I. VISITE DU CENTRE

Le bâtiment :

La façade principale du bâtiment s'ouvre sur le boulevard de l'Europe, une artère principale au sein de la Rive Gauche de Rouen.

Dès l'entrée, la façade du Pôle témoigne de l'opération de réhabilitation que le bâtiment a connue en 2011. Une double peau en verre est venue s'immiscer entre le bâtiment principal et la chapelle afin de reconstituer un espace d'entrée et permettant alors d'offrir un écrin à l'ancienne Ecole Normale de Garçons. Cette nouvelle façade illustre alors l'un des trois principes ayant conduit le programme de réhabilitation du bâtiment : conservation et mise en valeur du patrimoine.

Après ce premier espace, l'entrée au sein de la cour intérieure s'effectue de manière centrale, selon son grand côté. La cour offre un très grand volume de d'environ 21 mètres sur 27 et ce sur une hauteur de 10 mètres.

La structure en ETFE :

La structure en ETFE contraste immédiatement avec la structure installée en double peau à l'entrée. Effectivement, cette dernière requiert une lourde structure métallique composée d'imposantes jambes de force tandis que la légèreté de l'ETFE est aussitôt repérable.

La toiture de l'ETFE est formée de bandes de coussin dont la longueur correspond à la largeur de la cour (21 mètres) et dont la largeur est identique à celle de la trame de la structure métallique, soit trois mètres. Si la trame est relativement rapprochée, la finesse des poteaux est quant à elle à apprécier. De la même façon, les poutres situées à chaque charnière entre deux coussins paraissent fines et aériennes. Les deux tiges métalliques la composant lui offre une forme de lentille biconvexe et sont recoupées de cinq jambes de force permettant de reprendre les charges de la toiture.

Chaque coussin est formé de trois feuilles d'ETFE : deux feuilles extérieures mobiles et sérigraphiées et une feuille intermédiaire fixe. Les motifs imprimés sur les feuilles sont très présents et l'on peut ressentir qu'ils occultent de manière importante l'espace intérieur même si l'espace reste cependant très clair et agréable grâce à une lumière douce et diffuse. Cette maîtrise de l'ambiance lumineuse s'est très bien accordée avec l'ambiance thermique : malgré l'importance du volume et les températures extérieure froide, je n'ai pas ressenti d'inconfort thermique.

La réputation des mauvaises performances acoustique des coussins d'ETFE se sont cependant révélées être vraie. Lors de ma visite, j'ai effectivement eu la chance d'expérimenter le bruit des impacts de pluie sur la structure. Si dans l'espace intérieur, je n'avais pas l'impression d'un désagrément sonore très marqué, c'est en sortant du bâtiment que j'ai pris conscience de cette transparence acoustique. Effectivement, au sein de la cours et au vue du bruit généré par la pluie, je m'étais imaginée une pluie beaucoup plus importante que ce qu'elle était en réalité.

II. UN BÂTIMENT AUX MULTIPLES REHABILITATION

«De l'Ecole Normale au Pôle Régional des Savoirs », janvier 2012, Conseil Régionale Haute-Normandie, Patrimoine et Territoire, coécrit par DECOUX Jérôme, ETIENNE Claire, MEDAILLE Marie-Noëlle, MOYNE Michelle, REAL Emmanuelle.

Au sein du pôle, j'ai pu lire un ouvrage retraçant les différentes opérations de réhabilitation que le bâtiment a subi depuis sa construction au XVIIème siècle. Je me suis davantage intéressée au dernier volet de cette riche et longue histoire. Dès la deuxième de couverture, Alain Le Vern, ancien Président de la Région Haute-Normandie affirme :

« La réhabilitation et l'utilisation de matériaux innovants comme la membrane climatique qui surplombe l'édifice ont permis de conserver l'âme et l'originalité du geste architectural de la cour intérieure éclairée de manière zénithale et d'en faire un bâtiment basse consommation. Grâce au Pôle Régional des Savoirs, notre collectivité montre qu'il est possible de faire revivre notre patrimoine en lui apportant de profondes modifications mais sans le dénaturer. »

Si le bâtiment a tout d'abord été la Maison Saint-Yon pour se transformer en Asile au cours du XVIIIème siècle, c'est en 1881 qu'il reçoit l'Ecole Normale des Garçons. Lors de cette redéfinition des usages du bâtiment, l'architecte Félix Narjoux, fervent admirateur de Viollet-le-Duc, partage l'avis qu'un bâtiment doit s'adapter à la fonction qu'il reçoit et qu'il doit, en outre, la révéler. C'est dans cette optique que l'opération de réhabilitation du bâtiment se déroule et l'une des transformations majeures concerne le recouvrement de la cour intérieure par une structure métallique surmontée d'une verrière.

En 1963, l'école déménage sur la rive droite de Rouen, à Mont-Saint-Aignan et le bâtiment accueille alors le collège Jean Lecanuet. C'est en 1985 que le bâtiment obtient la protection au titre de Monument historique. Durant ces différentes transformations, la verrière disparaît.

Si le programme préconise alors la reconstruction de la verrière d'origine, l'agence d'architecture Rouennaise ARTEFACT propose la solution d'une structure en coussin d'ETFE ainsi que la remise en l'état des coursives d'origine avec des matériaux résistants au feu.

« Sur cette cour centrale, une enveloppe climatique transparente et non une verrière à structure métallique comme le prévoyait le programme est installée à la place de celle disparue, couvrant tout l'espace. Du point de vue architectural, cette solution réaffirme la volonté d'utiliser, pour chaque nouvelle intervention, des éléments résolument modernes, innovants et de haute qualité environnementale afin de conjuguer création contemporaine, développement durable en ayant soin de conserver l'esprit du lieu. »

Stéphane Plantrou, architecte de l'agence ARTEFACT

L'opération de réhabilitation ainsi conçue est définie dans l'ouvrage comme une opération réussie, de part les économies d'énergie qu'elle permet actuellement d'une part mais également par la facilité de mise en œuvre qu'elle a permis. En outre, le choix de ce matériau a également abouti à une économie budgétaire non négligeable dans la mesure où la membrane en ETFE et sa structure ont eu un coût global de 417 889€, soit une économie de 650 000€ vis-à-vis d'une verrière classique.

J'ai ainsi pu lire dans cet ouvrage mais également dans de nombreuses autres revues de presse, le franc succès de cette nouvelle technologie. Cependant, qu'en est-il en réalité ? Quelle relation entretienne les usagers quotidiens vis-à-vis de ce nouveau type de structure ?

C'est très surprenant que je me suis aperçue de la différence de discours des deux parties.

III. RESENTI DES USAGERS – L'ETFE maîtrise -t-il vraiment toutes les ambiances ?

Mes questions avaient pour objectif de déterminer quelle maîtrise des ambiances permettait la couverture en ETFE d'un point de vue thermique, acoustique et visuel.

Usager 1 :

Travaillant au pôle d'accueil et de renseignements, la femme interrogée se rend donc quotidiennement au sein de la Cité des Métiers depuis son ouverture en 2011.

Son poste de travail est situé à l'entrée et est donc en relation avec le premier espace d'accueil.

« Je suis vraiment désolée, je ne vais vous donner que des mauvaises critiques sur cette nouvelle technologie. C'est sûr, c'est beau, mais il y a de nombreux inconvénients ! »

Confort thermique :

L'hiver, l'usager m'avoua qu'elle avait souvent un peu froid mais qu'elle était consciente que cela était certainement dû à sa position au sein de la cour. Elle est effectivement en relation directe avec l'espace d'entrée qui, lui, est beaucoup plus froid. Cependant, elle mit l'accent sur les températures très élevées en été.

« J'ai installé un petit thermomètre sur mon bureau et j'ai déjà pu constater que les températures peuvent atteindre 40°C ! C'est difficilement soutenable. »

Elle me fit par ailleurs remarquer la présence des huttes en toile permettant de protéger les bureaux des conseillers.

Confort visuel :

L'usager me confia que l'ambiance lumineuse était très agréable mais, qu'une fois de plus, des problèmes étaient à remarquer. Effectivement, la transmission lumineuse engendre d'important reflets sur son écran ce qui représente une forte gêne pour son travail.

« Je sais que les motifs sur les coussins doivent permettre de régler la température et l'occultation mais je crois que le système ne fonctionne pas vraiment. On est obligé de demander à l'administration de s'en occuper et il faut souvent attendre 24 heures pour que les coussins se gonflent et que l'on sente une réelle modification. »

Par ailleurs, elle me confia également que la transmission lumineuse avait pour effet d'abîmer le matériel: lorsqu'elle rentre de vacances, elle retrouve ses feuilles jaunies.

Confort acoustique :

La transparence acoustique de l'ETFE fut affirmée. La répercussion des bruit de pluie constitue une véritable gêne dans le travail quotidien notamment afin de passer des appels téléphoniques.

Usager 2

Travaillant en tant que conseiller, l'homme interrogé se rend quotidiennement au sein de la Cité des Métiers depuis son ouverture en 2011.

« Vous savez, cette couverture a des défauts mais ici, on est sous les toits ! Et pour autant, j'adore venir travailler dans la cour ! »

Confort thermique:

L'usager parut satisfait du confort thermique permit par la bulle même s'il affirma les températures élevées en été.

Confort visuel :

Il parut très content de l'ambiance lumineuse créée au sein de l'espace. Cependant, il émit des doutes concernant bon fonctionnement du système d'occultation prévue par un contrôle de pression des coussins.

Confort acoustique :

Une fois de plus, la transparence acoustique du matériau fut soulignée:

« Vous savez, ici, on est sous les toits ! Alors c'est vrai que quand il pleut, il y a beaucoup de bruit. Mais si vous allez sous vos combles, c'est la même chose. Par contre, c'est vrai que des fois, lorsque je suis avec un jeune et qu'il se met à pleuvoir, je suis obligée d'attendre que l'averse passe pour que l'on puisse reprendre l'entretien... Ce n'est pas toujours très pratique. »

L'usager m'informa également des attaques de goélands sur la membrane et ce à plusieurs reprises. La réparation était simple dans la mesure où un nouveau morceau de feuille d'ETFE était resoudée sur le coussin. Par ailleurs, ce problème fut résolu par l'installation d'un émetteur à ultrasons.

Usager 3 :

Homme qui vient pratiquement quotidiennement au pôle afin d'utiliser les ordinateurs et leur connexion internet qu'ils permettent.

D'un point de vue global, il apprécie beaucoup cet espace qui est calme et lumineux. Il n'a pas de problème du point de vue des confort thermique ou visuel mais il constate également que l'espace est très bruyant quand il pleut ou quand il grêle.

IV. SYNTHÈSE

Les entretiens avec des personnes côtoyant quotidiennement l'espace permettent de relativiser les prouesses techniques et technologiques promises par les structures en ETFE. Si des personnes, visitant le pôle de manière ponctuelle, apprécie souvent cet espace pour ses qualités lumineuses, l'expérience quotidienne ne semble pas encore être complètement satisfaisante.

Ainsi, des processus innovants, comme la maîtrise théorique des occultations grâce à des impressions différentes des feuilles d'ETFE formant le coussin, associées à des pressions internes pouvant varier, la réalité semble beaucoup moins convaincante.

Par ailleurs, la différence d'appréciation du confort sous la toiture semble varier entre une personne protégée par une hutte en textile (un conseiller d'orientation) et une personne non protégée (pôle accueil). Ainsi, la membrane en ETFE ne serait réellement agréable que pour des usages courts ou lorsque une protection supplémentaire est permise. Mais alors, la protection sous une hutte ne soustrait-elle pas l'intérêt de la transparence de la membrane et du rapport entre l'extérieur et l'extérieur que ce type de couverture assure ?

Philippe Villien est un architecte et urbaniste français ayant fondé son agence « Th Villien – Architecture – Urbanisme ». Il enseigne également actuellement au sein de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Belleville.

Raisons de l'utilisation de l'ETFE au sein de son projet de Maison à Lyon :

Philippe Villien me fit remarquer qu'il est très difficile pour un architecte de répondre à cette question et, qu'à l'inverse d'un ingénieur, il n'a pas de méthodologie objective mêlant différents critères pondérés.

Il a cependant choisi l'ETFE afin d'expérimenter un système d'enveloppe architecturale qui soit en rupture totale avec l'idée classique et générale d'un toit, à savoir un système qui marche en adéquation avec l'eau. Dans le projet de la maison Duong 2, il fit ainsi l'expérience d'un toit qui fonctionne avant tout avec l'air, de par sa légèreté et son mode de fonctionnement. Dans ce type de structure, c'est l'air qui confère sa résistance et sa stabilité à l'ensemble. Paradoxalement, l'air, le matériau ayant le moins d'inertie possible, offre une possibilité de portée considérable.

Ainsi, Philippe Villien me permit de comprendre la singularité de ces structures par leur caractère dynamique.

Enveloppe en ETFE = un système dynamique :

Philippe Villien m'expliqua que, par leur mise en œuvre, les structures en ETFE se rapprochent considérablement de systèmes vivants. Il faut savoir que le mécanisme de gonflement des coussins est un circuit ouvert : de l'air est pompé, il passe par un déshumidificateur pour éviter tout risque de condensation à l'intérieur des coussins, il est injecté ensuite dans les deux chambres à air puis est finalement expulsé à l'extérieur grâce à une soupape. Ainsi, tout ce système s'apparente pratiquement à une respiration, un rapprochement souligné par le bruit que le mécanisme génère. Toutes les trois à cinq minutes, la pompe se met en route et un bruit de fond est donc périodiquement présent.

Confort acoustique de l'enveloppe en ETFE :

Dans ce projet, la répercussion des impacts de pluie sur la structure ne fit pas l'objet de plaintes. Cependant, il affirma que le déclenchement régulier de la pompe représentait, quant à lui, une gêne pour les occupants.

Par ailleurs, Philippe Villien me fournit d'intéressantes pistes de réflexions quant à la possibilité de l'utilisation de l'ETFE au sein du logement. Effectivement, il m'expliqua que ces enveloppes étaient liées à un art de vivre. Actuellement, la tendance, notamment dans les normes, est de réaliser une isolation totale de l'habitat, renfermant l'homme dans son logement. Il s'accommode de moins en moins aux bruits extérieurs ou entre logements. Mais certaines personnes ont des habitats plus atypiques comme les bateaux par exemple. Par ailleurs, si un enfant grandit dans un logement contenant ce type d'enveloppes, il ne remarquera pas la périodicité du déclenchement de la pompe.

Dans cette optique, les structures en ETFE peuvent être comparées à des automobiles où un bruit de fond est toujours présent. Il y a donc ici une question d'usages et de rapport au bruit très forts et qui varient entre tous les usagers.

Ressenti sur le matériau :

Philippe Villien considère les enveloppes en ETFE comme des systèmes intelligents dans leur ensemble. Ces structures permettent d'effacer les limites et d'être en relation directe avec le ciel et c'est sûrement dans cette optique qu'ils sont particulièrement bien adaptés aux grands espaces comme les espaces culturels où une part de rêve est attendue.

Cependant, il m'avoua que s'il avait été conscient des risques et problèmes que ces structures pouvaient amener, il aurait peut être modifié le choix de son matériau.

Les problèmes liés aux enveloppes en ETFE :

Philippe Villien m'expliqua que les problèmes liés aux enveloppes en ETFE sont des plusieurs natures.

La ductilité du matériau permet une grande liberté formelle. Cela est notamment dû à la méthode de fabrication du coussin : plusieurs lés d'une largeur d'environ 1m sont découpés et soudés entre eux et c'est seulement ensuite que la forme du coussin est taillée dans l'assemblage des lés. La forme à découper est d'ailleurs obtenue par une modélisation 3D qui doit ensuite être passée en 2D. Selon ce processus, toutes les formes sont donc théoriquement possibles. La véritable limite provient en réalité du cadre structurel du coussin. Effectivement, les angles dans les coins sont des facteurs limitant puisque seuls des angles compris entre 90 et 60° sont réalisables. Au-delà, de nombreux plis se forment et toute l'esthétique et la transparence de la membrane sont alors brisées. Les coussins de la Maison Duong possédant des angles avoisinant les 60° ont effectivement connu des plis lors de leur mise en œuvre.

La conception de la structure porteuse :

Grâce au projet de la Maison Duong, je pris conscience du fonctionnement mécanique particulier des enveloppes en ETFE.

Au sein d'une structure poteaux-poutres, les forces principales à reprendre sont verticales mais dans ce cas, les coussins engendrent d'importantes forces de traction sur l'ensemble et par conséquent la difficulté provient du dimensionnement des éléments dans le cas de forces horizontales. La difficulté supplémentaire provient du fait que des forces verticales sont également à considérer. Effectivement, une éventuelle panne de la pompe doit être envisagée, ce qui provoquerait un dégonflement des coussins et, en cas de pluie, une surcharge d'eau. Le calcul structurel est donc beaucoup plus compliqué et lourd que dans une structure classique.

ETFE et minimisation des ressources :

Philippe Villien me confia son doute quant à la minimisation de matériau que permet l'ETFE ou encore la rentabilité économique de ce dernier.

Du fait de ces différentes forces à reprendre, il fallut au contraire effectuer un renforcement de l'existant. A l'origine, la structure était une structure de murs porteurs et de dalle classique. En ôtant la dalle, les murs porteurs ne sont plus stabilisés et l'effet est accentué par l'ajout d'un système travaillant en traction. Un chainage horizontal a du donc être ajouté pour stabiliser l'ensemble. Cet ajout structurel n'aurait pas été nécessaire dans le cas d'une verrière qui marche souvent par un système de fermes et qui est donc statique.

Cependant, la pose des coussins est quand à elle très simplifiée. L'entreprise Buitink a tout d'abord préfabriqué les différents coussins en usine et, en quatre jours, à quatre, tous les coussins ont été posés.

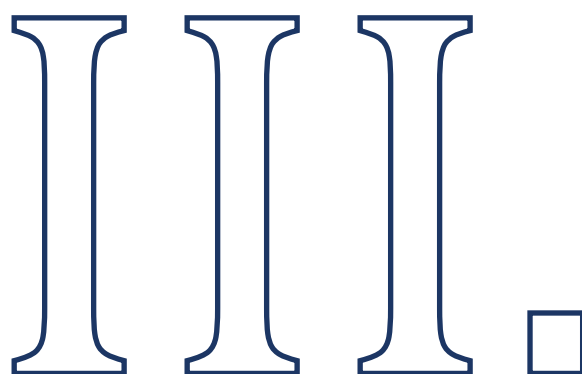
Par ailleurs, Philippe Villien me permit de réaliser de la notion d'échelle à réaliser afin de pouvoir conclure à ces minimisations. Dans le cas de la maison Duong, de petite taille où 3 coussins tous différents les uns des autres ont été réalisés, il fallut compter 60 000€ environ pour une surface de 30m², soit un coût de 2000€/m². De plus, la structure porteuse, une charpente bois a été très difficile à réaliser, les poutres ont été disposées couchées pour assurer une bonne reprise des forces verticales. Ainsi, l'étude préalable de la construction a coûté très chère. Cependant, si on considère une grande structure l'effet de répétition devient très bénéfique dans la mesure où, à l'inverse du verre, lorsque l'on rajoute de la portée, la structure ne doit pas être renforcée, l'ETFE en lui-même ne pesant rien.

Motifs des feuilles d'ETFE :

L'un des points intéressant dans ce projet est l'ambiance lumineuse créée au sein de l'espace et permise grâce à des motifs sur les feuilles d'ETFE. Grâce à une manipulation graphique, des motifs représentant des branchages d'une part et des feuilles d'autre part furent réalisés et placés sur les feuilles externes des coussins afin d'éviter tout risque de craquellement et de vieillissement. La superposition des deux permet d'imiter le feuillage des arbres. Ils ont été réalisés grâce à une peinture couleur or, relativement opaque afin de limiter des apports lumineux et donc thermiques trop importants.

Ventilation de l'espace :

La ventilation de l'espace est permise par une ventilation mécanique mais aussi par de grandes ouvertures en dessous de la membrane afin d'évacuer l'air chaud.



LISTE
DES
FIGURES

- **Figure 1 : Motif de répétition de l'ETFE**
Cremers, Jan; Gabler, Markus; Knippers, Jan; Lienhard, Julian. *Construction Manual for Polymers + Membranes*. Berlin: Birkhäuser. 295p.
- **Figure 2: Agencements des monomères correspondant aux trois catégories de polymères**
Idem précédent.
- **Figure 3 : Vue du projet Mangrove Hall- Burger's Zoo**
LeCuyer, Annette. *ETFE= Technology and Design*. Berlin: Birkhäuser. 2008, 160p.
- **Figure 4: Vue du projet Pillow Dome**
Idem précédent.
- **Figure 5a : Vue de l'Eden Project**
- **Figure 5b : Insertion du projet dans la topographie du site**
- **Figure 5c : Vue de l'Eden Project en coupe**
- **Figure 5d : Structure primaire de l'Eden Project**
The Eden Project, Cornwall. *DETAIL : Membrane Construction*. 2000, n°6. 210p. et p.987 à 989.
- **Figure 6a: Vue d'ensemble de l'Allianz Arena**
Photographie personnelle
- **Figure 6b : Dispositifs lumineux de l'Allianz Arena**
Disponible en ligne sur : www.hausderkunst.de
- **Figure 7 : Synthèse du TFE**
Ebnesajjad, Sina. *Introduction to Fluoropolymers*. In Ebnesajjad, Sina. *Applied Plastics Engineering Handbook*. Waltham : Elsevier, 2011. p.49-60.
- **Figure 8 : Synthèse de l'ETFE**
Teng, Hongxiang. *Overview of the Development of the Fluoropolymer Industry*. *Applied Sciences* [En ligne]. Disponible sur www.mdpi.com/journal/applsci/editors.
- **Figure 9 : Schéma de fonctionnement d'une extrudeuse**
Cremers, Jan; Gabler, Markus; Knippers, Jan; Lienhard, Julian. *Construction Manual for Polymers + Membranes*. Berlin: Birkhäuser. 295p.
- **Figure 10: Extrusion par buse à fente large**
Idem précédent.
- **Figure 11 : Extrusion par buse annulaire**
Idem précédent.

- **Figure 12 :** Transmission lumineuse de l'ETFE et comparaison avec le verre et le polycarbonate

LeCuyer, Annette. ETFE= Technology and Design. Berlin: Birkhäuser. 2008, 160p.

- **Figure 13 :** Elongation de l'ETFE en fonction de la contrainte appliquée
Idem précédent.

- **Figure 14 :** Elongation du matériau en fonction du temps sous l'application d'une contrainte
Idem précédent.

- **Figure 15 :** Détail de liaison entre matériaux textiles et structure primaire.
Cremers, Jan; Gabler, Markus; Knippers, Jan; Lienhard, Julian. Construction Manual for Polymers + Membranes. Berlin: Birkhäuser. 295p.

- **Figure 16 :** Détail de fixation d'un coussin
Idem précédent.

- **Figure 17 :** Différents branchements d'air : en parallèle ou en série
Idem précédent.

- **Figure 18a. :** Prototype GROW de cellules photovoltaïques
- **Figure 18b. :** Prise en compte des cellules photovoltaïques pour la conception d'un coussin
Idem précédent.

- **Figure 19 :** Feuille teintée ou imprimée selon différents motifs
Idem précédent.

- **Figure 20 :** Trame losangique de la couverture de la petite cour de la Résidence de Dresde
Meyer, Friederike. Membrandach in Dresden. Bauwelt, 2009, n°22, p.22-27.

- **Figure 21a. :** Ombre portée de la structure primaire sur les murs
Photographie personnelle

- **Figure 21b. :** Perspective de la Riesensaal
Openings of the new Giant's Hall. Staatliche Kunstsammlungen Dresden. [En ligne] Disponible sur <http://www.skdmuseum/en/museumsinstitutions/residenzschloss/ruestkammer/riesensaal/index.html>

- **Figure 22 :** Maquettes d'étude du projet de la Maison Duong 2
Villien, Philippe. Maison duong 2 à Lyon. TH Villien – Architecture – Urbanisme [En ligne]. Disponible sur <http://www.th1-agence.fr/projet.php?id=PV112&PHPSESSID=hrdunbd7dllq7fi4o30e0nnqd5>.

- **Figure 23 : Angles et répercussions sur la membrane**
Idem précédent.
- **Figure 24 : Structure primaire bois réalisée au sein de la Maison Duong 2.**
Idem précédent.
- **Figure 25a. : Verrière originale au sein du Pôle régional des Savoirs**
Decoux, Jérôme; Etienne, Claire; Real, Emmanuelle. De l'Ecole Normale au Pôle régional des Savoirs. Rouen : Région Haute-Normandie. 2012, 100p.
- **Figure 25b. : Nouvelle enveloppe au sein du Pôle régional des Savoirs**
Idem précédent.
- **Figure 26a. : Tour conçue par Bernard Zehrffuss en 1970**
- **Figure 26b. : Projet de réhabilitation de la Tour Zehrffuss en 2009**
Raynaud, Françoise. Une doudoune pour l'hiver – Rénovation de la Tour Zehrffuss à Saint-Denis. Loci Anima [En ligne]. Disponible sur <http://www.loci-anima.com/fr/#>.
- **Figure 27 : Structure primaire portant l'enveloppe en ETFE**
Meyer, Friederike. Membrandach in Dresden. Bauwelt, 2009, n°22, p.22-27.
- **Figure 28: Vue intérieure**
Photographie personnelle
- **Figure 29: Coupe transversale du complexe de bureaux VIAG AG (1:500)**
VIAG AG. DETAIL : Membrane Construction. 2000, n°6. 210p. et p. 1005 à 1008.
- **Figure 30 : Maquette formée de pellicule de savon – Frei Otto**
Diskussion. DETAIL : Membrane Construction. 2000, n°6. 210p. et p. 970
- **Figure 31 : Cellule de vie pneumatique conçue par le groupe Haus Rucker Co**
LeCuyer, Annette. ETFE= Technology and Desig. Berlin: Birkhäuser. 2008, 160p.
- **Figure 32: Projet de réhabilitation conçu par l'agence Bléas et Leroy**
Business Immo[En ligne]. Disponible sur <http://www.businessimmo.com/tag/B%C3%A2timent+Basse+Consommation+%28BBC%29?page=19>
- **Figure 33 a. : Vue du Pôle régional des Savoirs depuis la rue**
Le Vern, Alain. Bienvenue au Pôle régional des Savoirs. Rouen : Région Haute-Normandie. 2012, 24p.

- **Figure 33b.** : Vue du complexe de bureaux VIAG AG depuis la rue
VIAG AG. DETAIL : Membrane Construction. 2000, n°6. 210p. et p. 1005 à 1008.

- **Figure 34** : Comportement mécanique des structures pneumatiques en ETFE
Cremers, Jan; Gabler, Markus; Knippers, Jan; Lienhard, Julian. Construction Manual for Polymers + Membranes. Berlin: Birkhäuser. 295p.

- **Figure 35** : Vue des poutres triangulaires du complexe de bureaux VIAG AG
VIAG AG. DETAIL : Membrane Construction. 2000, n°6. 210p. et p. 1005 à 1008.

- **Figure 36** : Détail des coussins conçus pour le complexe de bureaux VIAG AG
Idem précédent.

- **Figure 37** : Ambiance lumineuse créée par une impression différenciée des feuilles d'ETFE
Villien, Philippe. Maison duong 2 à Lyon. TH Villien – Architecture – Urbanisme [En ligne]. Disponible sur <http://www.th1-agence.fr/projet.php?id=PV112&PHPSESSID=hrdunbd7dllq7fi4o30e0nnqd5>.

- **Figure 38** : Transmission lumineuse contrôlée par mobilité de la couche centrale
LeCuyer, Annette. ETFE= Technology and Desig. Berlin: Birkhäuser. 2008, 160p.

- **Figure 39**: Comportement thermique d'un coussin d'ETFE
Cremers, Jan; Gabler, Markus; Knippers, Jan; Lienhard, Julian. Construction Manual for Polymers + Membranes. Berlin: Birkhäuser. 295p.

- **Figure 40**: Importance de la convection en fonction du nombre de chambre à air du coussin
Idem précédent.

- **Figure 41** : Valeurs du coefficient de transfert thermique en fonction du nombre de feuille
Idem précédent.

- **Figure 42** : Valeurs du coefficient de transfert thermique et de la transmission lumineuse en fonction de la couche d'aérogel
Cremers, Jan ; Lausch, Félix. "Translucent High-Performance Silica-Aerogel Insulation for Membrane Structures". Plastics. DETAIL. 2008, n°5, p. 524-530.

- **Figure 43** : Valeurs de la transmission lumineuse en fonction du nombre de feuilles constituant le coussin
Cremers, Jan; Gabler, Markus; Knippers, Jan; Lienhard, Julian. Construction Manual for Polymers + Membranes. Berlin: Birkhäuser. 295p.
- **Figure 44a.** : Vue des ouvrants depuis le toit de la Frauenkirche
- **Figures 44b.** : Vue des ouvrants depuis l'intérieur de la cour
Photographies personnelles
- **Figure 45** : Ventilation naturelle au sein de la Maison Duong 2
Villien, Philippe. Maison duong 2 à Lyon. TH Villien – Architecture – Urbanisme [En ligne]. Disponible sur <http://www.th1-agence.fr/projet.php?id=PV112&PH PSESSID=hrdunbd7dllq7fi4o30e0nnqd5>.
- **Figure 46** : Comparaison de l'amortissement acoustique de l'impact d'une pluie forte permis par un coussin d'ETFE, par du verre et par du polycarbonate
Hopkins, C. ; Rain noise from glazed and lightweight roofing – Information paper. 2006. BRE Group [En ligne]. Disponible sur <http://www.bre.co.uk/>.
- **Figure 47** : Transmission sonore en fonction de l'intensité de la pluie et de l'épaisseur de la feuille d'ETFE
Buitink Technology. Dossier ETFE. Buitink Technology [En ligne]. Disponible sur www.buitink-technology.com/fr/.
- **Figure 48** : Détail de l'innovation Texlon Rain Supressors Vector Foiltec
LeCuyer, Annette. ETFE= Technology and Desig. Berlin: Birkhäuser. 2008, 160p.
- **Figure 49**: Ombrelles installées au-dessus des postes de travail au sein du Pôle régional des Savoirs
Pôle régional des Savoirs. Archétype – Mobilier contemporain [En ligne]. Disponible sur <http://www.archetype.fr/realisations/travailler/accueil-et-attente/pole-regional-des-savoirs/>
- **Figure 50** : Vue du projet Frosilo
Van Rijs, Jacob. Fosilo. MVRDV [En ligne]. Disponible sur <http://www.mvrdv.nl/projects/frosilio/>.
- **Figure 51** : Structure de la toiture en d'ETFE
LeCuyer, Annette. ETFE= Technology and Desig. Berlin: Birkhäuser. 2008, 160p.
- **Figure 52**: Vue intérieure du foyer central
Van Rijs, Jacob. Fosilo. MVRDV [En ligne]. Disponible sur <http://www.mvrdv.nl/projects/frosilio/>.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ouvrages:

- Auch-Schwelk, Volker ; Fuchs, Matthias ; Hegger, Manfred ; Rosenkrank, Thorsten. *Construire – Atlas des matériaux*. Lausanne : PPUR, 2010. 280 pages.
- Behling, Stefan; Brensing, Christian; Fuchs, Andreas; Ingenhoven, Christoph; Schittich, Christian. *Innovative Design + Construction*. Munich: DETAIL, Institut für Internationale Architektur-Dokumentation GmbH&Co. 2010, 112p.
- Blaser, Werner. *Werner Sobek - Art of Engineering – Ingenieur Kunst*. Berlin : Birkhäuser. 2000, 192p.
- Cremers, Jan; Gabler, Markus; Knippers, Jan; Lienhard, Julian. *Construction Manual for Polymers + Membranes*. Berlin: Birkhäuser. 295p.
- Decoux, Jérôme; Etienne, Claire; Real, Emmanuelle. *De l'Ecole Normale au Pôle régional des Savoirs*. Rouen : Région Haute-Normandie. 2012, 100p.
- Ebnesajjad, Sina. Introduction to Fluoropolymers. In Ebnesajjad, Sina. *Applied Plastics Engineering Handbook*. Waltham : Elsevier, 2011. p.49-60.
- Goeran, Paul. *Textiles, Polymers and Composite for Buildings*. Philadelphie: Woodhead Publishing. 2010, 478p.
- Heinlein, Frank; Sostmann, Maren. *Werner Sobek, Light works*. Stuttgart: Avedition. 2008, 156p.
- LeCuyer, Annette. *ETFE= Technology and Design*. Berlin: Birkhäuser. 2008, 160p.
- Le Vern, Alain. *Bienvenue au Pôle régional des Savoirs*. Rouen : Région Haute-Normandie. 2012, 24p.
- Songel, Juan Maria. *A conversation with Frei Otto*, New York: Princeton Architectural Press. 2010, 96p.
- Syndram, Dirk, *Das Schloss zu Dresden: Von der Residenz zum Museum*, Seemann, 2012, 144p.

2. Revues:

- *DETAIL : Membrane Construction*. 2000, n°6. 210p.
- Cremers, Jan ; Lausch, Félix. Translucent High-Performance Silica-Aerogel Insulation for Membrane Structures. *DETAIL: Plastics*. 2008, n°5, p. 524-530.
DETAIL : Membrane Construction. 2000, n°6. 210p.
- Karsten, Moritz ; Rainer, Barthel. Transparent Architecture – Building with ETFE Membranes. *DETAIL: Building with plastics*. 2002, n°12, p.1616-1620.
- Meyer, Friederike. Membrandach in Dresden. *Bauwelt*, 2009, n°22, p.22-27.
- Picon, Antoine; Ratti, Carlo. Architecture vivante: du bâtiment aux usagers. *L'Architecture d'Aujourd'hui*. 2013, n°397, p.72-75.

3. Travaux universitaires:

- Campioli, Andrea; Monticelli, Carol; Zanelli, Alessandra. *Environmental loads of ETFE cushions and future ways for their self sufficient performances*. Proceedings of the International Association for Shell & spatial Structures (IASS) Symposium 2009. 13p.
- Karayan, Charles; Nafack, Michaël. *Emballage de la Rotonde*. Rapport de projet énergétique = Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011, 45p.
- Mendonça, P. *Low-span lightweight membranes in housing - environmental and structural potentialities*. Rapport de Structure et Architecture = Ecole d'Architecture de Minho, 2010, 8p.

4. Sites:

- Buitink Technology. Dossier ETFE. *Buitink Technology* [En ligne]. Disponible sur www.buitink-technology.com/fr/.
- Hopkins, C. ; Rain noise from glazed and lightweight roofing – Information paper. 2006. *BRE Group* [En ligne]. Disponible sur <http://www.bre.co.uk/>.

- Lehnert, Stefan; Schween, Tobias. Building with foil cushions. *Vector Foiltec* [En ligne]. Disponible sur <http://www.vector-foiltec.com/fr/home.html>.
- Lescouarc'h, Yvon. L'ETFE. *Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Val de Seine*. [En ligne] Disponible sur : <http://www.paris-valdeseine.archi.fr/extranet/file/M1/lescouarch/efte.pdf>.
- Raynaud, Françoise. Une doudoune pour l'hiver – Rénovation de la Tour Zehrfuss à Saint-Denis. *Loci Anima* [En ligne]. Disponible sur <http://www.loci-anima.com/fr/#>.
- Teng, Hongxiang. Overview of the Development of the Fluoropolymer Industry. *Applied Sciences* [En ligne]. Disponible sur www.mdpi.com/journal/applsci/editors.
- Van Rijs, Jacob. Fosilo. *MVRDV* [En ligne]. Disponible sur <http://www.mvrdv.nl/projects/fosilio/>.
- Villien, Philippe. Maison duong 2 à Lyon. *TH Villien – Architecture – Urbanisme* [En ligne]. Disponible sur http://www.th1-agence.fr/projet.php?id=P_V112&PHPSESSID=hrdunbd7dllq7fi4o30e0nnqd5.

5. Séminaires, Rencontres :

- Philipp, Benedikt ; Schiemann, Lars. *Membran Design and Construction*. Enseignement suivi au sein de l'Université Technique de Munich. Semestre d'été 2014.
- Rencontre avec l'architecte Moritz Hauschild le 04/04/2014.
- Rencontre avec l'architecte Philippe Villien le 04/11/2014.